



МАТЕМАТИЧЕСКИЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНОВ УЗБЕКИСТАНА

Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Мажлимов Ф.Б.,

Ташкентский Государственный технический университет им. Ислама Каримова.,

Ташкентская медицинская академия

Shuhrat-1951@mail.ru

АННОТАЦИЯ. По своим разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу и деструктивному воздействию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест среди других видов природных катастроф. В данной статье приводятся результаты многолетних исследований по наблюдениям за гидрогеосейсмологическими (ГГС) параметрами подземных вод сейсмоактивных районов Узбекистана. Для оценки информативности рассматриваемых предвестников данные об их проявлении по различным видам наблюдений были систематизированы и выполнен анализ связи между числом предвестников, временем их проявления и параметрами землетрясений: магнитудой M и величиной $M/\lg R$. Анализ огромного количества материала за 40-45 лет дал свои результаты по прогнозированию сильных землетрясений. Большинство из наблюдаемых параметров гидрогеологических полей следует рассматривать как кратко- и среднесрочные предвестники и все они являются полезными. Результаты дают возможность более детально изучить природу гидрогеохимических возмущений в недрах земли, которые вероятно, обусловлены интенсивным развитием упругих напряжений и соответствующих деформаций горных пород во время аномальных проявлений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидрогеосейсмология, аномалия, предвестники, геолого-тектонические условия, информативность, фоновое значение.

ВВЕДЕНИЕ

Многие годы наблюдений человека за планетой, на которой он живет, привели к мысли о том, что Земля – не мертвое, бездушное тело, а живой, развивающийся по своим законам, самый сложный организм. Незнание или игнорирование этих законов может привести к бунту "неживой" природы против человека и человечества. Причина катастрофических явлений во многих случаях – проявление той внутренней жизни нашей планеты, которая еще не до конца познана наукой.

По своим разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу и деструктивному воздействию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест среди других видов природных катастроф. Внезапность возникновения землетрясений еще больше усугубляет их разрушительные последствия. Разрушения и гибель людей вызываются не только собственно вибрациями грунта, но и различными вторичными природными явлениями, которые могут активизироваться в результате землетрясения (крип, оползни, обвалы, снежные лавины, разжижение грунта и др.).

По образному выражению академика Б.Б. Голицына: «Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит». Эти слова были сказаны им еще в самом начале 20-го века. Благодаря трудам Б.Б. Голицына наука о землетрясениях из описательной и во многом гипотетической, превратилась в строгую научную дисциплину.

Проблема прогноза землетрясений интересовала человечество со времен его появления. В течение столетий землетрясения и их предсказание были окружены многими легендами. Аристотель размышлял о землетрясениях, как о результате деятельности воздуха и паров в пещерах и др. Впервые научную и вполне обоснованную точку зрения о причинах землетрясения высказал в 1757 году М.В. Ломоносов. В своей речи “о рождении металлов от трясения Земли” он разделил землетрясения на 4 типа, причем, впервые были установлены волнообразные колебания, распространяющиеся в коре, и нечувствительные трясения, незаметные для ощущения. Эдуард Зюсс высказал учение о связи землетрясения с тектоническими процессами. Таким образом, проблемы прогноза землетрясений интересовала человечество многие века. Прогноз землетрясений – сложная научная проблема и благородная цель сейсмологии.

Земные недра никогда не бывают спокойны. Процессы, в них происходящие, вызывают движения земной коры. Под их воздействием поверхность планеты деформируется: она поднимется и опускается, растягивается и сжимается, на ней образуются гигантские трещины. Густая сеть трещин (разломов) покрывает всю Землю, разбивая ее на большие и малые участки - блоки.

Прогноз землетрясений облегчается еще и тем, что лавинообразное образование трещин происходит исключительно на сейсмогенных разломах, где они уже неоднократно происходили ранее.

Под прогнозом землетрясений понимают определение места, времени и силы (магнитуды) землетрясения. По времени прогноз подразделяется на долгосрочный (на десятилетия вперед), среднесрочный (до года вперед), краткосрочный (на дни до месяца вперед) и оперативный (на минуты–часы вперед).

Начало широкомасштабных исследований по проблеме прогноза землетрясений относится к середине 50-х годов XX века. Значительными вехами в изучении физики

очага и выявлении прогностических признаков (эмиссия радона, деформации земной поверхности и др.) стали результаты исследований природы разрушительного Ташкентского землетрясения 1966 г. и первый Международный симпозиум по прогнозу землетрясений, состоявшийся в Ташкенте в 1974 г. под эгидой Международной Ассоциации по Сейсмологии и Физике Недр Земли (МАСФНЗ) [1-4] и т.д.].

После ряда разрушительных землетрясений во многих странах мира - в Японии, США, КНР и в те годы еще не распавшемся СССР в первую очередь начались организационные работы по прогнозу землетрясений

Предвестники землетрясений. Те характеристики Земли, значения которых регулярно изменяются перед землетрясениями, называют предвестниками, а сами отклонения от нормальных значений – аномалиями [5].

К настоящему времени во всем мире насчитывается несколько сотен различных по своей природе предвестников землетрясений. Геофизические предвестники делятся на сейсмические, гидрогеодинамические, деформационные, геохимические, термические, гравитационные, геомагнитные, электромагнитные и т.д. [6]. Одним из возможных выходов из ситуации является совместное использование нескольких прогностических признаков. Поэтому их комплексное использование позволит повысить надежность и эффективность прогнозных оценок. Практика последних лет показала оправданность такого подхода, по крайней мере, для среднесрочного (до 1 года) прогноза [7].

По историческим данным из Японии многочисленным сильным землетрясениям предшествовали внезапные падение уровней подземных вод в скважинах, а также внезапные уменьшения или возрастания дебитов подземных источников [8]. Например, в Японии зарегистрировано 200 случаев необычных флуктуаций уровней подземных вод до 40 ощутимых землетрясений в период с мая 1975 г. по январь 1978 г. в Илу-Ошима. На эпицентральных расстояниях до 50 км амплитуды упомянутых аномалий были очень большими, многие скважины на эпицентральных расстояниях 50-100 км показывали внушительные предвестниковые аномалии [9].

Прогнозные работы в КНР были развернуты с необычайной широтой. Здесь было создано Центральное сейсмологическое бюро и провинциальные центры, куда должны были регулярно поступать сведения о всякого рода аномалиях в природе. Работа началась, опыт копился, несколько раз довольно удачно сейсмологи указывали места и примерное время землетрясений. И первая грандиозная удача о которой китайские сейсмологи подробно рассказали в 1976 году на Межправительственном совещании ЮНЕСКО – это предсказанное за несколько часов землетрясение 1975 года в городе Хайчен.

Анализированы результаты эмпирического соотношения между временами возникновения и местоположениями аномальных изменений уровней подземных вод, наблюдаемых перед Хайченским землетрясением; использованы данные 200 пунктов

регистрации. Аномалии существовали с 10 октября 1974 года по 13 февраля 1975 года, на эпицентральных расстояниях 0-230 км. [10].

В 1966 г. во время подготовки и свершения Ташкентского землетрясения были зафиксированы изменения химических, газовых, изотопных и геофизических параметров, особенно растворенный газ радон в подземных водах. В результате, впервые в мире, выявлена научно-обоснованная закономерность изменения параметров подземных вод в связи с проявлением подготовки и свершения сильных землетрясений. И в 1967 году в Государственном комитете по делам открытий и изобретений бывшего СССР было зарегистрировано научное открытие под номером №129.

Можно сказать, что именно Ташкентское землетрясение стало точкой отсчета начало исследований по поиску Гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений и особенностей их проявлений в Узбекистане. Изучались предвестники землетрясений по наблюдениям медленных наклонов земной поверхности [11] и др. Узбекскими сейсмологами получены первые результаты по прогнозированию подземных толчков, основанные на данных о вариациях инертного газа радона в термоминеральной воде Приташкентского артезианского бассейна [12,13].

Объектом наблюдения теперь стали подземные воды, а параметрами изучения являются: Rn , CO_2 , CH_4 , Ar , O_2 , N_2 , H_2 , He и др. газы; из химических элементов: K^+ , F^- , Cl^- , B^- , Ca^{2+} , Hg и др.; из геофизических параметров подземных вод: уровень и расход, давление, температура воды; соотношении изотопов элементов ($\delta^{13}C$, $^{40}Ar/^{36}Ar$, $^3He/^4He$, δD , $\delta^{18}O$) и др.. Научный анализ и систематизирование аномальных проявлений всех вышеперечисленных параметров в комплексе во время подготовки и свершения землетрясения на основе современного научного метода – это был новый подход в прогнозе землетрясений. Таким образом, в прогнозировании землетрясений геохимия подземных вод заняла свое место и вскоре была признана в мировом масштабе. Параметры подземных вод, тесно связанные с процессами подготовки, свершения и периодом после совершения землетрясений, такие как гидрогеодинамический режим, физико-химические, газовые и, в том числе, изотопные играют важную роль в выявлении закономерностей проявления предвестников землетрясений и прогнозе сейсмических событий выводя гидрогеосейсмологический (ГГС) метод на решающие позиции. Результаты не заставили долго ждать. В 1975 году после успешного прогнозирования Китайскими учеными Хайченское землетрясение ($M=7,3$) (основными предвестниками были ГГС параметры), в 1978 году узбекскими учеными спрогнозировано Алайское землетрясение с точностью до 6 часов. После этих событий предсказано ещё несколько сильных землетрясений. Нововыявленный метод (ГГС) демонстрировал себя один из надежных среди других методов в средне- и краткосрочном прогнозах сильных землетрясений.

Основная цель – определить аномальные отклонения от фоновых значений предвестников в период режимных наблюдений, разработать методические

рекомендации по ГГС исследованиях и их применение в практике прогноза землетрясений не только в Узбекистане, но и во всех Центрально-азиатских Сейсмологических учреждениях. Так, в 1978 году в Узбекистане впервые в мире создана Опытно-методическая партия по поиску предвестников землетрясений (КОМППЗ), с 1983 года переименована Комплексная экспедиция по поиску предвестников землетрясений (КОМЭПЗ). Создана сеть прогностических станций в различных по сейсмологическим и гидрогеологическим признакам регионах Узбекистана.



Многолетние наблюдения за предвестниками землетрясений с 1973 годов дали возможность в создании банка данных, который охватывает почти 45 летний период. Это результаты режимных наблюдений за ГГС параметрами подземных вод и геомагнитными параметрами Земли. Получены уникальные результаты по прогнозированию сильных землетрясений. Выявлен ряд особенностей и закономерностей поведения ГГС параметров подземных вод, предшествующий и сопутствующий землетрясению. Эти работы оформлены в виде монографий, отчетов, диссертаций, статей и тезисов научных конференции различного ранга [14-16].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оценка информативности гидрогеосейсмологического предвестника землетрясения. Для оценки информативности рассматриваемых предвестников данные об их проявлении по различным видам наблюдений были систематизированы и выполнен анализ связи между числом предвестников, временем их проявления и параметрами землетрясений: магнитудой M и величиной отношения $M/\lg R$. Величина $M/\lg R$ применяется в качестве параметра, характеризующего интенсивность процессов подготовки землетрясений с учетом удаленности соответствующих очагов от наблюдательного пункта [17,18]. Был использован алгоритм, разработанный в ИФЗ РАН [19] и применяемый до сегодняшнего дня [20-23]. По этому алгоритму рассматриваемый предвестник характеризуется тройкой чисел:

$$m/n; \Sigma \tau / T; \Phi(\xi) \quad (1)$$

где: n - число свершившихся землетрясений в области наблюдений;
 m - число предсказанных землетрясений;
 T - период наблюдений;

$\Sigma \tau$ - суммарное время всех интервалов тревог за время наблюдений T .

В приведенной тройке чисел первое дает процент успешно спрогнозированных землетрясений; второе - процент тревожного времени, равносильный проценту землетрясений, которые можно спрогнозировать абсолютно случайным образом; третье означает вероятность того, насколько значимо различие m/n и $\Sigma \tau / T$ выявленных связей по формулам

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-t^2/2} dt, \quad \text{где} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{m/n - \tau/T}{\left[\frac{1}{n} \tau/T (1 - \tau/T) \right]^{1/2}}$$

При оценке статистической значимости предвестника с сейсмической активностью мы рассматриваем три градации:

- $\Phi(\xi) < 0,7$ - связь отсутствует;
- $0,7 < \Phi(\xi) < 0,9$ - связь не достаточно значимая;
- $\Phi(\xi) > 0,9$ - связь значимая.

Кроме тройки чисел, определяемых алгоритмом, введен еще один параметр: q - мера информативности данного предвестника, отражающая количественно статистическую значимость связи данного предвестника с землетрясением

$$q = \frac{1}{4} \ln \left[\frac{m/n(1-\tau/T)}{\tau/T(1-m/n)} \right] \quad (3)$$

Согласно алгоритму, предвестник можно считать полезным, если $q > 0,1 - 0,2$. Если $q > 0,3 - 0,5$, то предвестник следует рассматривать как весьма полезный, а в случае $q < 0,05$ использование данного предвестника не приведет к заметному улучшению прогноза.

В таблице 1 видно, что около 75% наблюдательных пунктов имеют относительно короткое время тревог $< 30\%$ и 70% объектов наблюдения имеют сравнительно прогностическую способность $> 70\%$ эффективности. Такой результат можно считать удовлетворительным.

Таблица 1. Оценка связи между проявлениями содержание CO₂ по скважинам на КПС Ташкент, Чартак, Чимион и Хаватаг с землетрясениями с $M / \lg R \geq 2.5$ 1982–2014 гг.

Пункт ы наблю дений	Шурчи			Чартак			Чим ионс кв.Н Р-1	Хава тагс кв. 745	Ташкент		
	скв. 5	скв. 7	скв. 8	скв. 2	скв. 6	скв. Наман Г			БИЙ	Текс - тиль	Наза р- бек
перио д наблю д. годы	1993 - 2015	1999 - 2010	1988 - 2012	1982 - 2013	1988 - 2014	1983– 2013	1982 - 2011	1988 - 2004	1983 - 2011	1999 - 2014	2002 - 2014
n	16	11	13	21	16	20	18	7	12	7	7
m	12	8	10	17	9	15	7	6	10	6	5
m/n	0,75	0,72	0,77	0,81	0,56	0,75	0,38 9	0,85 7	0,83	0,86	0,74
T(мес)	374	144	289	384	300	360	360	198	347	172	142
□τ(ме с)	68,5	19	129	173	62	95,5	74,3	74	55	31,2	42
□□ /T	0,18 3	0,13 2	0,44 4	0,45	0,20 7	0,27	0,20 6	0,37 4	0,15 9	0,18 1	0,29 6
q	0,64 8	0,72	0,36	0,41	0,39 9	0,53	0,22	0,57 7	0,82	0,82 5	0,44 9
Φ(ξ)	0,99 9	0,99 9	0,97 8	0,99 8	0,99 8	0,999	0,92 8	0,99 0	0,99 9	0,99 9	0,98 8

При использовании данного алгоритма предвестника CO₂ приняты следующие условия, а именно: несмотря на большое количество экспериментальных результатов, полученных за более чем 35 лет наблюдений, к сожалению, эти результаты недостаточно формализованы, т.е. не проведено сглаживание полученных кривых; возникают трудности с установлением истинного среднего значения величины CO₂ за весь период наблюдений, что в свою очередь вызывает некоторые неопределенности при оценке величин T, τ, входящих в алгоритм. Статистическая обработка экспериментального материала за 1976-2014 гг. позволила определить средние значения CO₂, соответственно, для подземных вод всех источников и скважин, которые были под наблюдением. При ретроспективном анализе эти средние значения распространены на

весь цикл наблюдений. Там же, на графиках проведены линии среднеквадратичного отклонения, позволяющие более точно получить цифровые значения для T , τ и, соответственно, оценить величину m .

Оценивая полученные расчеты можно считать, что результаты по данным 56% - 86% предсказанных землетрясений, при сравнительно небольшом времени тревог от 15,9% до 27%, подтверждены высоким значением значимости $\Phi(\xi) = 0,996$, рассчитанным m/n и τ/T , содержат в себе некоторые подгонки, свойственные ретроспективному анализу. Правда, в нашем случае варьирование величин, входящих в m/n , τ/T , q не очень сильно изменяет значения, приведенные в таблице, даже в пределах 10-15% в сторону ухудшения. Это позволяет считать их верхним пределом ретроспективного прогноза. При этом наиболее удовлетворительным следует признать результат оценки информативности данного предвестника. Поэтому, даже во всех случаях намеренного ухудшения значений, входящих в m/n , τ/T , величина q всегда больше 0,1, что дает основание считать данный предвестник полезным.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения. // ДАН СССР. 1967, т.176, № 2, с.35-37.
2. Уломов В.И. На пути к прогнозу землетрясений. // Земля и Вселенная. 1968, № 3.
3. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1996 года. //Ташкент: ФАН Узб. ССР. 1971, 672 с.
4. Поиски предвестников землетрясений. Отв. ред. Е.Ф. Саваренский, В.И. Уломов. // Международный симпозиум 27 мая – 3 июня 1974 г. Ташкент: ФАН Узб. ССР. 1974, 264 с.
5. Гир ДЖ., Шах Х. Зыбкая твердь. М., Мир, 1988. 220 с.
6. Зубков С.И. Предвестники землетрясений. // М.:ОИФЗ РАН. 2002, 140 с.
7. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. // М.: Наука, 2006, 254 с.
8. Т. Рикитак. Предсказание землетрясений. М., Мир, 1978. 388 с.
9. Н. Oki, Bull. Hot Spring Res. Inst., 1978, v.9, №4, p. 2-49.
10. С. Yang. Temporal and spatial distribution of anomalous ground water changes before the 1975 Haicheng earthquake. Acta Seismol. Sinica, v.4, №1, p. 84-89.
11. Яковлев В.Н. Результат наклонеирических наблюдений в Ташкенте в период повторных толчков. В кн. “Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года”. 1971, ФАН, стр. 176-182.
12. Уломов В.И., Мавашев Б.З. Предвестники Ташкентского землетрясений. В кн. “Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года”. 1971, ФАН, стр. 188-192.
13. Касымов Х.К., Воробьев Е.Л., Закиров Д.М. Попытка прогнозирования момента возникновения повторных толчков Ташкентского землетрясения по наблюдениям за

вариацией радона. В кн. “Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года”. 1971, ФАН, стр. 192-198.

14. Султанходжаев А.Н. и др. Гидрогеосейсмологические исследования в Восточной Фергане. Ташкент, Фан, 1978, 184 с.

15. Султанходжаев А.Н. и др. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений. Ташкент. ФАН, 1983, 127 с.

16. Султанходжаев А.Н. Основы гидрогеосейсмологии. Ташкент, 2006, 151 с.

17. Копылова Г.Н. [Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, Камчатка \(по данным наблюдений 1996-2007 гг.\)](#) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24-28.

18. Серафимова Ю.К., Копылова Г.Н. [Среднесрочные предвестники сильных \(\$M \geq 6.6\$ \) землетрясений Камчатки 1987-2007 гг. : ретроспективная оценка их информативности для прогноза](#) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 3-12.

19. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. О зависимости времени подготовки землетрясения от его энергии. ДАН СССР, 1983, т.271, N2, стр. 330-333.

20. Султанходжаев А.Н., Юсупов Ш.С. Оценка информативности геохимического предвестника $\delta^{13}C$. Узб. геол. журн., № 2, 1994. стр. 95-97.

21. Ибрагимова Т.Л., Азизов Г.Ю. Информативность комплекса гидрогеохимических подземных вод в различных геодинамических условиях. Проблемы сейсмологии в Узбекистане - №9, 2012. стр. 60-64.

22. Султанходжаев А.Н., Азизов Г.Ю., Зиган Ф.Г., Юсупов Ш.С. Выявление информативности гидрогеосейсмологических предвестников на прогностических полигонах Узбекистана. В кн.: Прогноз сейсмической опасности. Ташкент, 1996, стр. 24-26.

23. Султанходжаев А.Н., Латипов С.У., Юсупов Ш.С., Будина А.Е., Тураева П. Пространственно-временные особенности аномальных вариации газогидрогеохимических параметров. В кн.: Прогноз сейсмической опасности. Ташкент, 1996, стр. 26.