

14. Проблемът за прогнозиране на земетресения

Много са публикациите в света, които се занимават с проблемите на прогнозиране на земетресенията. Те дават обща представа за усилията, които се правят вече десетилетия с надежда да се намери начин за предотвратяване на най-страшните последствия от катастрофални земетресения. След умерена еуфория през 70-те години на миналия век, когато през 1975 година китайските учени успяха да предскажат катастрофално земетресение и да предпазят от гибел хиляди жители на градовете Инкоу, Хайчен и Ляоян, последваха катастрофи с много човешки жертви и материални загуби без наблюдавани признаци за тяхното приближаване. Този факт показва, че научните изследвания по предсказване на земетресенията се намира все още в стадий, когато съществена роля играе емпиризмът и не е намерен “безгрешният” предвестник. Изследваните феномени и явления, съпътстващи земетресенията показват, че всеки потенциален предвестник реагира по различен начин (или не реагира!) преди земетресения в различните огнищни зони.

За сега, доминиращ в търсенето на решение за предсказване на земетресенията е “феноменологичния” подход – наблюдава се и се изследва определен феномен (или феномени) в даден земетръсен район и се търси закономерност на неговите реакции преди силни земетресения. Понякога се изследват комплексно група феномени и се търсят по-сложни корелации с приближаващата земетръсна катастрофа (случаят с китайското прогнозиране през 1975 г.).

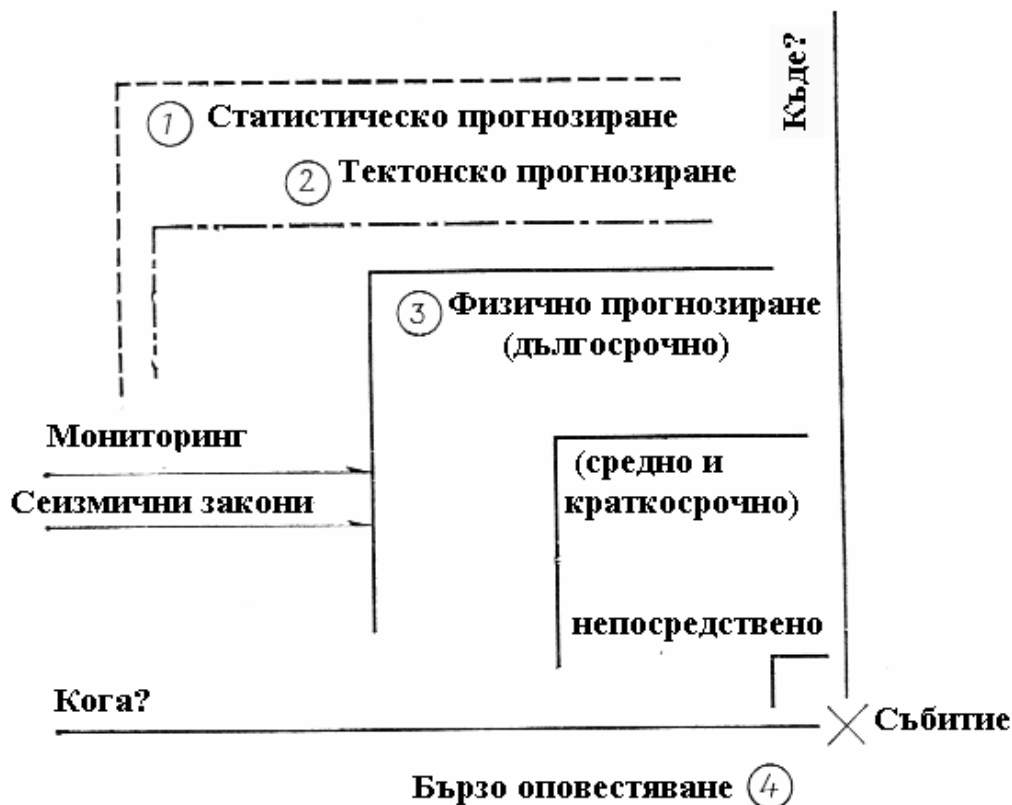
Когато се говори за предсказване на земетресения, на този проблем трябва да се гледа от две коренно различни позиции:

1. От позицията на научното предсказване;
2. От позицията на социалното предсказване.

Тази лекция би трябвало да се спере на геофизичните аспекти на сеизмичното прогнозиране и като се изхожда от това е ясно, че ще се дискутират научните, а не социалните проблеми. Но практически прогнозирането на всички негови етапи се прави за хората и би било правилно да се каже нещо и за социалните и моралните аспекти на прогнозирането на земетресенията. И при двете позиции няма намерено генерално решение. Нито може да се говори за устойчиви успехи в научното прогнозиране на земетресенията, нито пък е създаден адекватен модел за оповестяване на приближаващата земетръсна опасност. Още по-неприятен е и фактът за проблема за връзката на научното прогнозиране с административния апарат за взимане на управленчески решения.

Стратегия при прогнозирането на земетресения

Успешно може да се смята всяко прогнозиране, което включва правилна оценка на три елемента: **време, място и сила на прогнозираното земетресение**. За да се постигне тази цел е необходимо да се премине последователно през всички етапи, които са показани на фиг. 14.1 (по Касахара, 1985).



Фиг. 14.1 Стратегия за прогнозиране на земетресение. Размерите на правоъгълниците на диаграмата съответстват на степента на неопределеност при прогнозите от различно ниво (по Касахара, 1985).

Статистическо прогнозиране

Първият етап е статистическото прогнозиране, с което практически от много години се занимават сеизмолозите. Този тип прогнозиране се основава на предположението, че последователността на земетресенията в определен район има статистически неизменящ се във времето характер. Т.е., когато се създаде график на повтаряемостта на земетресенията за района, вече има идея за статистическата вероятност за поява на събитие с определена сила. В случая, въпреки сравнително лекия начин за изготвяне на статистическо прогнозиране, при наличието на достатъчно регистрации и исторически записи, остава един значителен елемент на неопределеност. Статистическото прогнозиране е удобно за предварителния етап на изследванията, както и за дългосрочно планиране на оптимални системи за контрол или даже за дейности за предотвратяване на разрушенията, за които дейности тази неопределеност е напълно допустима.

Тектонско прогнозиране

Тектонското прогнозиране е свързано с магнитуда, типа и тектонските параметри на очакваното земетресение. Това е фактически сеизмотектонско прогнозиране, за което стана дума в по-предните лекции. За това предсказване като основна хипотеза се използва правилото за натрупване на сеизмотектонски

движения. Определянето на точното време на проява на силно земетресение не е задача на тези изследвания, но се оценява времето между появата на силни земетресения в сеизмичния цикъл. Тук е и мястото на палеосеизмоложките изследвания.

Описаните по-горе два етапа определят дейностите по така нареченото дългосрочно прогнозиране. При него **не се прави предсказване на конкретно сеизмично събитие**, но се определят тези сеизмични параметри на даден район, които са необходими за сеизмичното райониране и създаване на нормативна база за противоземетръсно строителство. Въз основа на дългосрочното прогнозиране, достатъчно точно се дефинират районите с повишена сеизмична опасност и се насочват дейностите за следващите етапи на прогнозирането на земетресения.

Физично (или точно) прогнозиране

На този етап се поставя целта да се определят трите елемента на прогнозирането – времето, мястото и силата на очакваното земетресение, като по правило това се прави по основните разпознаваеми предвестници на земетресения. Крайната цел на физичното прогнозиране е в получаването на детерминистично прогнозиране. Основно изискване към подобен вид работи е достатъчно добро познаване на физичните закони на механиката на земетресението и точен контрол на физичното състояние (в най-общ смисъл) на сеизмичния район и неговите околности в нужния момент. Именно на този етап се правят всички феноменологични и комплексни наблюдения и проследяване на хода на различни предвестници.

Бързо оповестяване

Този последен стадий изобщо не е прогнозиране. Но все пак за него трябва да стане дума, доколкото в него се съдържат ключови дейности за намаляване на разрушителните последствия. Той е свързан с наличието и готовността на системи за бързо оповестяване, чрез които местните административни и промишлено-аварийни служби, групите за гражданска защита и населението като цяло, биха могли да получават своевременна и точна информация за да могат да реагират бързо и адекватно.

Практиката за прогнозиране на земетресенията трябва да следва последователността на тези етапи. Т.Рикитаке през 1976 г. предлага алтернативна класификация – дългосрочно, средносрочно и краткосрочно предсказване. В последните години именно тази терминология се наложи като по-масово използвана. По-нататък ще се съобразяваме с мястото на използваните предвестници именно в рамките на тази класификация.

Принципи и методични подходи

По-долу ще се представят някои принципни положения и резултати от изследвания по прогнозиране на земетресения, без претенции за изчерпване на всичко, което се знае и е писано по този въпрос.

** Дългосрочно прогнозиране*

Никой в света не поставя под съмнение нуждата от този вид прогнозиране. Мястото и очакваната енергия на максималното по сила земетресение, което може да се случи в даден район, повтаряемостта на подобни събития и очакваните земни ускорения са необходимия минимум за предпазване от сеизмичната катастрофа. На решаването на този проблем бе посветен целият настоящ курс по Сеизмотектоника. Наистина, в целия свят се работи сериозно по този проблем, на тези изследвания се основават нормите за строителство в земетръсни райони. Един от най-важните моменти от този етап на прогнозирането е използването на комплексен методичен подход с използването на данни от сеизмологията, геофизичните изследвания, геодезията и формализирана информация от геологията и тектониката.

** Средносрочно прогнозиране на земетресения*

Месеци и даже година (или години) преди силно земетресение, могат да се наблюдават изменения в някои характерни параметри на сеизмичния режим или в поведението на геополетата (геофизични и геодезични) в обширен район около подготвящото се земетресение. Прогнозиране може да се прави чрез изследване на сеизмичния режим. Подобен подход разработи през 80-те години на миналия век групата от Института по Физика на Земята на РАН под ръководството на акад. Кейлис-Борок. По-късно на базата на този екип се създаде Европейски Център за прогнозиране на земетресения със седалище в гр. Москва. Разработеният Алгоритъм "CORA-3" работи много добре. Част от неговите програмни продукти бяха използвани в практическото обучение в настоящия курс. Като пример за неговото успешно прилагане може да се посочи фактът, че 6 месеца преди катастрофалното земетресение в Армения през 1988 г., когато загинаха ХИЛЯДИ, групата от ИФЗ обявява прогнозиране в което се посочва висока вероятност за катастрофа именно в района на случилото се земетресение. Но администрацията отказва да реагира адекватно, не се взимат никакви мерки и последствията са ужасни. Ето тук се сблъскваме с неяснотата как научното прогнозиране, в случая стигнало и до конкретно предсказване, не намира механизъм да се превърне в социално прогнозиране.

Използвани методи

1. Сеизмичен режим

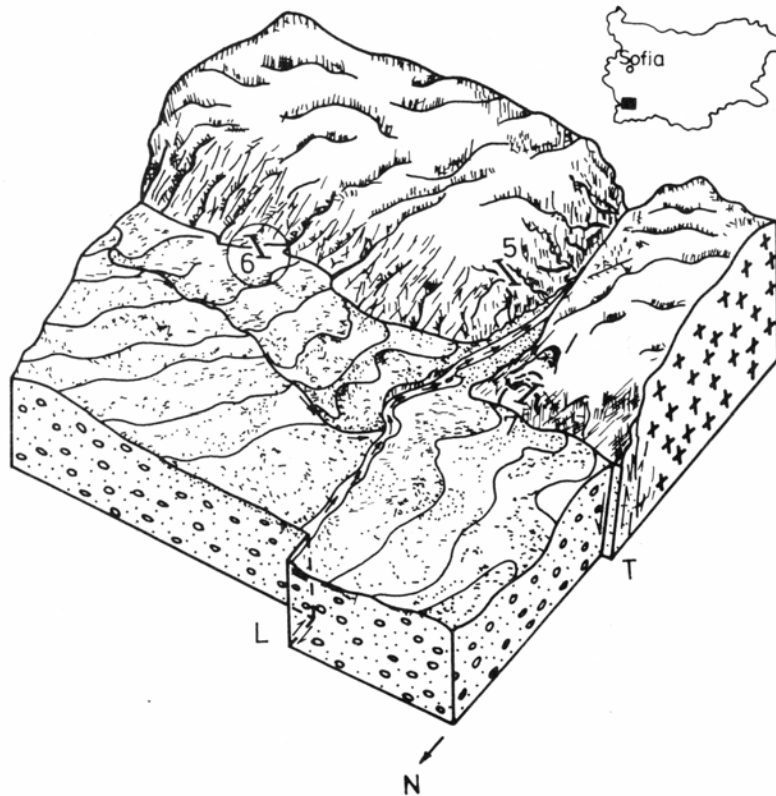
Чрез изследване на промените на сеизмичния режим в даден район преди силни земетресения по данни от каталозите на земетресенията, могат да се очертаят такива промени в него, които са характерни за приближаващо силно земетресение години или месеци преди реализацията му. Към тези промени се отнасят както сеизмичното затишие, така и появата форшокова активност. Последната може да започне и много месеци преди самата катастрофа. Именно сеизмичният режим е в основата на прогнозирането с алгоритъм "CORA-3". В него се използва методът за "разпознаване на образи" чрез обучаващи, характерни аномалии в сеизмичния режим преди силни земетресения. Подходът е комплексен, като се използва широк набор от аномални характеристики с различни времеви продължителности.

2. Предсеизмични движения на земната повърхност

Този метод се използва доста ефективно в Япония. Извършват се наклонометрични измервания в различни пунктове и се следи за аномални наклони на терена. Обикновено преди силни земетресения започва по-бързо изменение на наклона, което се счита за средносрочен предвестник. Използват се и прецизни многократни нивелирания по фиксирана триангулационна мрежа. Информация за такива измервания дава Рикитаке (1976), Касахара (1985) и други японски учени.

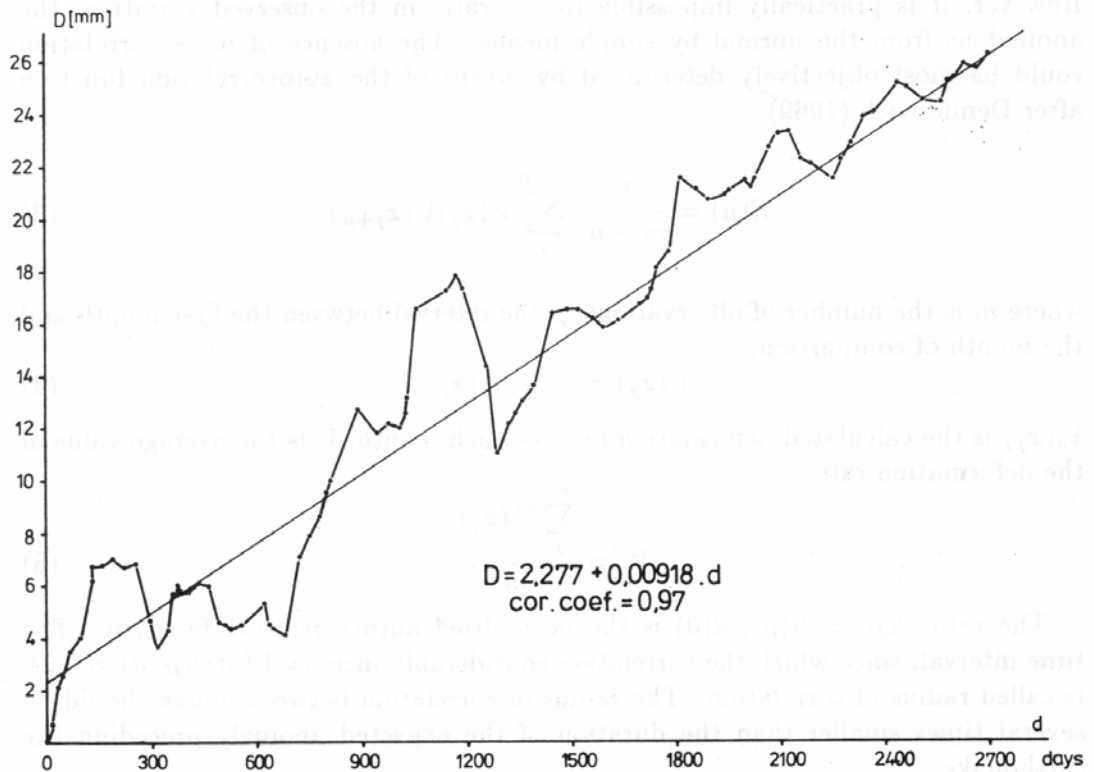
3. Измервания на скоростта на движение по разломи

Нарастването на аномални концентрации на напрежения в даден обем от земната кора преди земетресение води до промени в напрегнатото състояние на много по-големи обеми от земната кора, отколкото обема на огнището на бъдещото земетресение. Тази промяна в напреженията е и причината за възбуждане на различни феномени, даже в зони доста отдалечени от огнището. В България бяха изследвани реакциите на активен разлом от системата на Крупнишкия разлом, на който от 1982 г. се измерва преместването с трикомпонентен екстензометър (фиг.14.2). Няколко месеца преди силни земетресения в Северна Гърция се маркират ясни промени в скоростта на деформациите по разлома. Местните слаби земетресения не оказват никакво влияние върху скоростта на движение по този разлом.



Фиг. 14.2 Разломното съчленяване в ЮЗ България на Струмския (L) и Крупнишкия (T) разломи и местоположение на екстензометричните станции ТМ-71 в района (с номера). Анализирани са данните от станция No 6.

Данните от станция No 6 показват (фиг.14.3), че тоталната деформация (тоталния вектор получен от трите компоненти x, y, z) за период от 2700 дни може да се опише с линейна регресия, която определя средна скорост на дневните деформации 0.00918 mm, а на годишните деформации – 3.35 mm.



Фиг. 14.3 Тотални деформации, регистрирани на станция No 6 с линейната регресия за периода на наблюденията от 1982 г. до 1998 г.

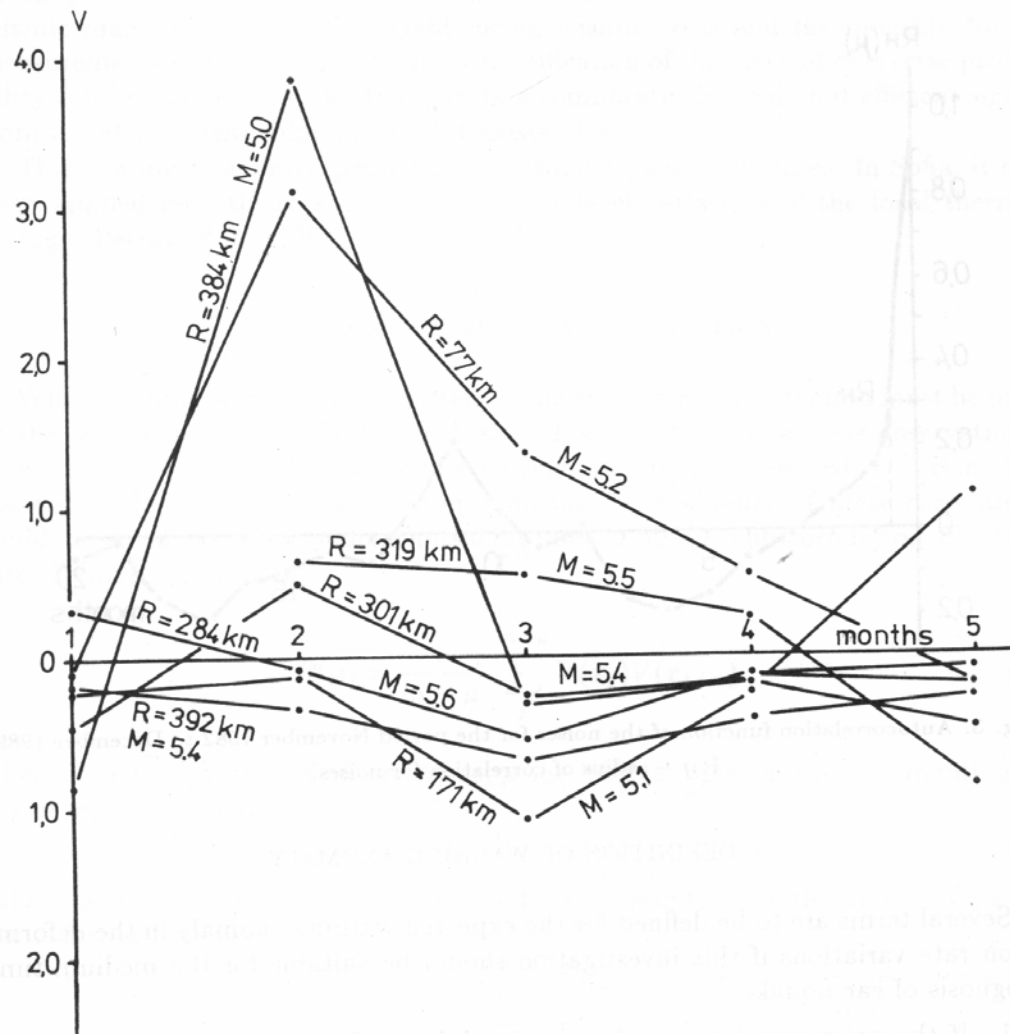
Оказа се, че наблюдаваните отклонения от линейната регресия са свързани със сеизмичния режим на юг от Крупнишкия разлом до един полукръг с радиус от 300-400 km. Оценката за перспективността на тези наблюдения за предсказване на земетресения се направи по метода на “обратните вероятности” (Демидович, 1969).

За да бъде аномалията прогнозна, тя би трябвало да отговаря на три условия (това се отнася и за краткосрочните предвестници):

1. Дължината на аномалията трябва да превишава поне 3 пъти корелационния радиус на “шума” (т.е. случайните вариации). Автокорелационната функция за екстензометричните измервания от станция No 6 показва радиус на корелация от 1 месец. Следователно, аномалното поведение на скоростта на тоталната деформация трябва да продължи поне 3 месеца.

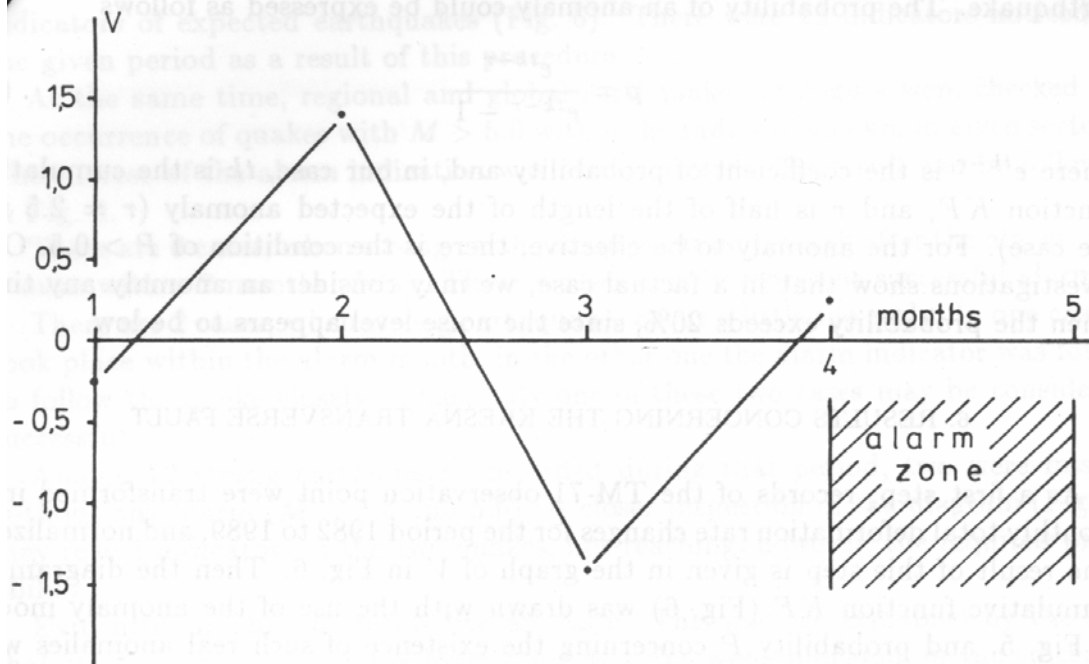
2. За да има смисъл едно подобно прогнозиране, което се приближава до краткосрочното, аномалията трябва да завърши своя ход поне един месец преди очакваното силно земетресение.
3. Ако се използва нормализация на данните спрямо стандартното им отклонение, то моделната аномалия трябва да има дисперсия $\sigma^2=1$ и средната стойност по дължината на аномалията да бъде 0 (това преобразуване на данните автоматично изключва от изчисленията тяхното стандартното отклонение)

За дефиниране на моделната аномалия се използваха нормализираните деформации за 5 месеца преди всички земетресения с магнитуд над 5.0 в радиус от 400 km около станцията. Тогава се разбра, че разломът реагира на готвещи се земетресения в Северна Гърция и Северна Егея (фиг. 14.4).



Фиг. 14.4 Нормирани деформации по разлома 5 месеца преди силни земетресения в Ю-ЮЗ сектор спрямо станция No 6 на Крупнишкия разлом.

Въз основа на тези графици се изчисли моделната аномалия, която има дисперсия 1 и средна стойност 0 (фиг. 14.5).



Фиг. 14.5 Модел на нормираната аномалия 5 месеца преди силни земетресения за екстензометрична станция No 6 на Крупнишкия разлом.

Отделянето на полезния сигнал по дължината на записа става чрез изследване на взаимната корелация между тези данни и моделния сигнал. Процедурата е следната:

Наблюдава се редица от дискретни измервания на параметъра $F(x)$. Освен това, предполага се, че в някой интервал от измерванията съществува аномалия $a(x)$, която обаче може да интерферира с някакви случайни “шумове” $f(x)$, които са от определен статистически тип. Трябва да се определи дали съществува аномалията или не. Решението се основава на формулата на Байес за обратната вероятност (Демидович, 1969, Никитин, 1979). В случая се взема под внимание това, че дисперсията на очакваната аномалия е равна на дисперсията на “шума” след нормирането на измерванията. Корелацията се изчислява чрез стъпково умножение на наблюдаваните нормирани стойности по стойностите на моделната аномалия с m стойности и произведенията се сумират:

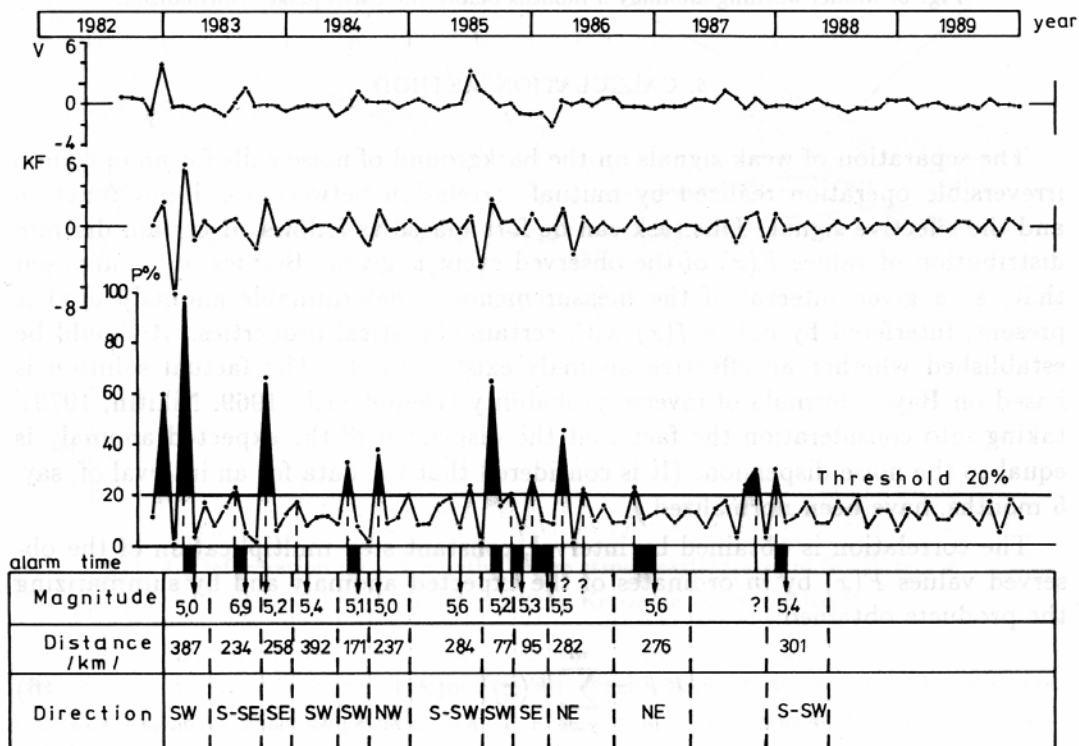
$$KF = \sum_{j=1}^m F(x_j) \cdot a(x_j)$$

За целите на изследването, получената стойност се приписва на последното измерване от интервала. Полученият график на кумулативната функция съдържа цялата информация за ефективната аномалия. Максимумите определят интервалите, в които има вероятност да присъства търсената аномалия. Тази вероятност може да се изчисли:

$$p = \frac{e^{tk-r}}{e^{tk-r} + 1}$$

където e^{tk-r} е коефициентът на вероятност, като tk е кумулативната функция KF, а r е половината от дължината на очакваната аномалия – в случая 2.5 месеца. Приема се, че ефективно аномалията присъства, ако вероятността е по-голяма от 0.5. Нашите изследвания показват, че практически 20% могат да се смятат за прагово ниво, над което може да се предполага предсказване на приближаващо земетръсно събитие.

На фиг.14.6 е показан резултатът от ретро-анализа на данните от екстензометрична станция No 6 на Крупнишкия разлом.



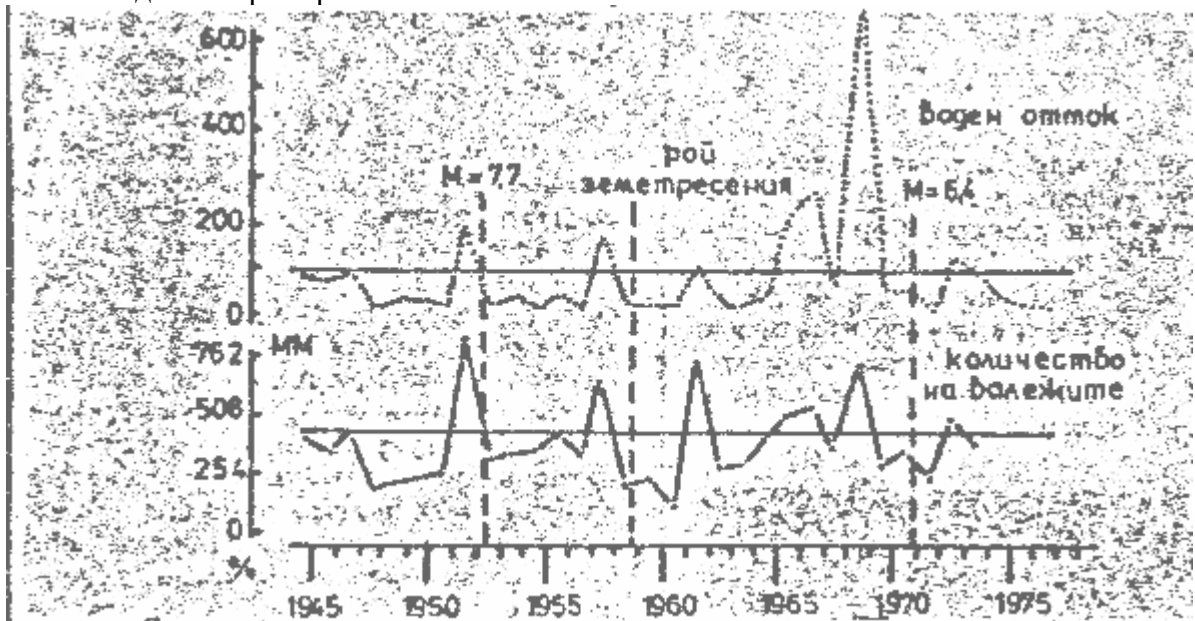
Фиг. 14.6 Вероятност за възникване на силни земетресения в сектор от 400 km южно и югозападно от екстензометрична станция No 6 на Крупнишкия разлом.

В 15 случая има индикации за готвеци се земетресения. В 6 от случаите земетресението е ставало 1 месец след максимума на вероятностната функция, в 2 случая – след 2 месеца, или има 8 успешни “прогнози”. В два случая земетресенията стават в месеца на обявена опасност. Това също са успешни прогнози. От записаните 12 силни земетресения за този период само 2 са

пропуснати. Като цяло, методът показва 60 % ефективност, което е доста добър показател. Преди силните земетресения през м.май 1995 г. в Северна Гърция, Кожани и по-късно близо до Солун, моделната аномалия бе регистрирана от екстензометъра, но не може да се каже към кое от двете събития тя има отношение. Една точка не дава ясен отговор за мястото на готвещото се събитие.

Хидроложки предвестници

Сравнявайки данни за количеството на валежите от 90 годишен период и възникването на земетресения с магнитуд над 6.0 в района на разломната система Сан Андреас в Калифорния, група учени от университета на Южна Калифорния в Лос Анжелис са получили интересни корелационни зависимости. Повечето от силните земетресения са били предшествани от години, в които количеството на валежите е било под нормалното за района, следвани от сезон с по-големи валежи от нормалните. Тази двойка от отрицателни и положителни валежни аномалии, в различна степен разтеглена във времето, е предшествава всички двацет земетресения с магнитуд над 6 в района. Това се вижда на фиг. 14.7, където е показан един от примерите.



Фиг. 14.7 Вариации на количеството на валежите и корелацията им със силни земетресения в Сан Фернандо, Калифорния.

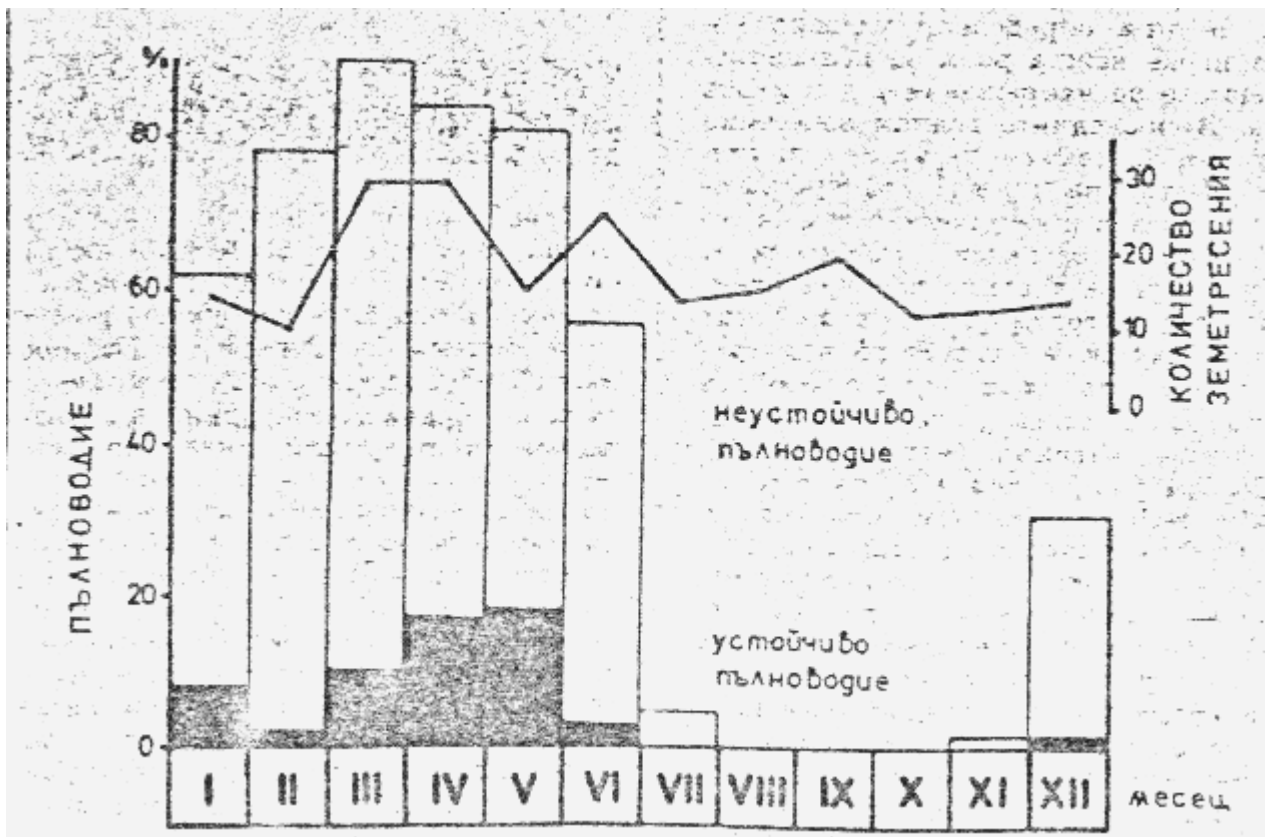
Речният отток, който се влияе от валежите, следователно, би трябвало да има същото прогнозно значение. Средната оценка за описания прогнозен параметър е:

- 1) четири до шест години преди земетресението има количество на валежите под нормалното;
- 2) следва две-три годишен период на валежи, значително над средното количество;
- 3) рязко спадане на количеството на валежите;

- 4) освобождаване на сеизмична енергия 4-24 месеца след максимума на графициите.

Явно проникващат в дълбочина вода играе някаква роля за нарушаване на критичното тектонско равновесие в зоната на готвещо се земетресение. Този пример може да се съгласува и с дилатантно-дифузионната теория за възникване на земетресения, където в определен момент водата играе съществена роля.

Ако се анализира месечното разпределение на количеството на известните земетресения с магнитуд над 4 на територията на България и водния отток за същата територия (фиг. 14.8) ясно се вижда, че най-често земетресения възникват в периодите на пълноводие или малко след него, през месеците март, април и юни. Водата, която прониква в скалните масиви несъмнено играе важна роля за подготовката на земетресенията.



Фиг. 14.8. Сравнение между пълноводието по месеци за територията на България и количеството на регистрираните земетресения с магнитуд над 4.0.

**Краткосрочно предсказване на земетресения*

Най-много надежди за предпазване на хората от земетръсните катастрофи се възлагат на краткосрочното предсказване на земетресенията. Но и най-много се и спекулира с този проблем. Мониторингът на различни геофизични сигнали или промени на потенциалните геофизични полета може да се отнесе към феноменологичния подход. Под същият показател може да се постави изследването

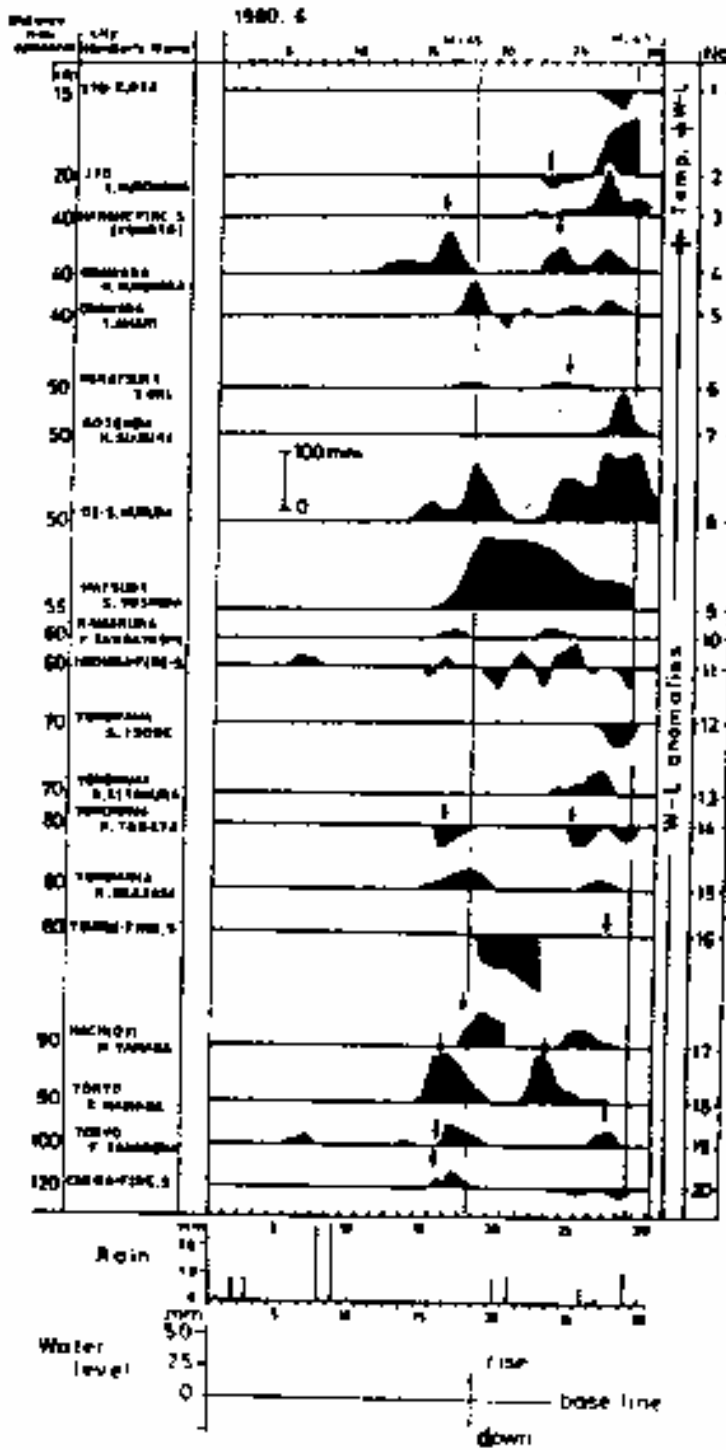
на някои хидрогеоложки параметри, радоновите емисии и т.н. Обикновено аномалните сигнали от тези изследвания се сравняват с параметрите на сеизмичния режим и се търсят корелации.

Опитите от геодинамичните полигони в различни страни недвусмислено подсказва, че без комплексен подход не могат да се решат проблемите на предсказването на земетресенията. Все пак, само отделни събития са предсказани до сега.

Хидрогеоложки параметри

Непосредствено преди силни земетресения се наблюдават вариации в параметрите на подземните води – дебит, температура, химически състав, радоново съдържание. Населението в различни райони на Земята съобщава за размътване на водата в кладенците преди земетресения, понякога се увеличава водата, понякога изчезва. Хидроложките параметри си остават едни от най-експлоатираните за целите на краткосрочното прогнозиране. Сложността на намирането на еднозначно решение от тези изследвания е показана от Чен Йонг (Chen Yong, 1988) от Държавното сеизмолошко бюро на Китай (фиг. 14.9). Той показва, че преди силни земетресения, реакциите на водното ниво не винаги са използвани за предсказване на земетресения. Когато приближава земетресението водното ниво в наблюдаваните сондажи показва драстични вариации, но в някои сондажи има покачване, а в други понижение. Няма два сондажа, които да показват еднакъв тип на вариациите. Някои от по-отдалечените сондажи от епицентралната зона показват по-големи амплитудни аномалии от други, намиращи се в непосредствена близост до огнището на земетресението.

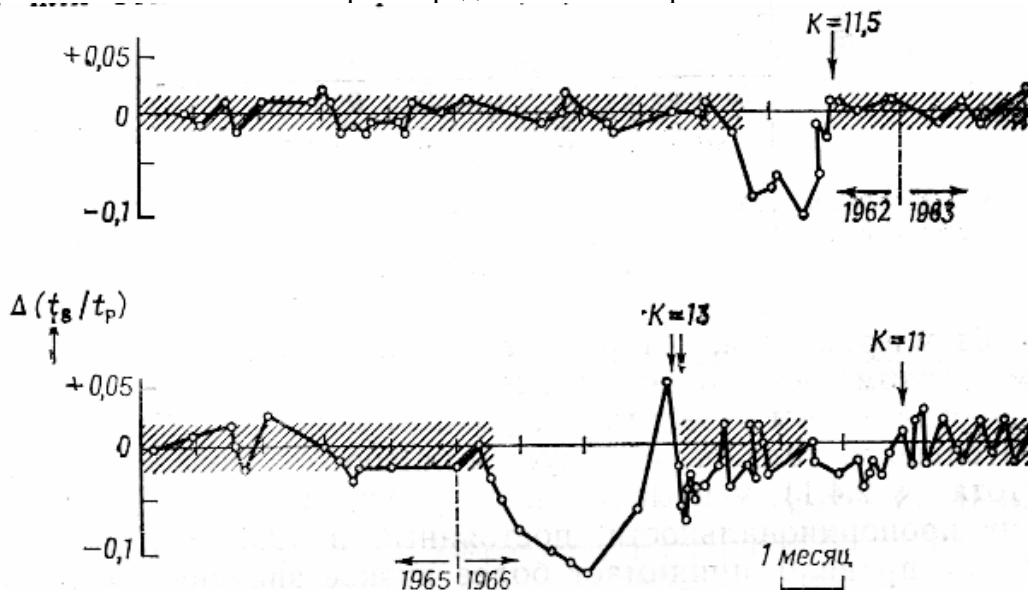
Подобни ефекти са наблюдавани в сондажа на Софийския минерален извор. Особено драстични са вариациите, регистрирани преди и след земетресението от 1977 г. в района на Вранча (Румъния) с $M=7.2$. Анализът по метода на обратните вероятности показва, че и преди други силни земетресения в региона изворът показва аномални изменения в дебита си. За съжаление, данни от него вече не се получават и той практически не може да се използва в момента за целите на предсказване на земетресения.



Фиг. 14.9 Вариации на водното ниво в 20 сондажа от област с радиус 120 km около епизентралната зона на земетресението от 29 юни 1980 г. на полуостров Изу в Япония с магнитуд 6.7.

Вариации на отношението V_p/V_s

Изменението на отношението V_p/V_s (скорост на надлъжна към напречна сеизмични вълни) в сеизмични райони се показва в някои изследвания на Wallace за Китай, но този параметър се е изследвал особено внимателно през последните 30-40 години на миналия век на Гармския полигон в бившия СССР. Някои от първите резултати са много окуражаващи (фиг. 14.10). Вижда се ясно аномалното изменение на отношението V_p/V_s преди силни земетресения.



Фиг. 14.10 Изменение на отношението на скоростите V_p/V_s преди силни земетресения на Гармския полигон. Енергията на земетресенията е по възприетата в този период енергийна класификация в СССР (десетичен логаритъм на енергията в джаули).

Последвалите експерименти в други райони дават колебливи резултати, което се обяснява или с неотчитане на скоростната анизотропия на средата, или с недостатъчна прецизност на експериментите. Като цяло този предвестник не е отхвърлен категорично, тъй като и лабораторни експерименти потвърждават аномалиите преди разрушаване на отношението V_p/V_s .

Електромагнитни предвестници

Един от най-дискутираните предвестници в последните години е този, който стана особено популярен като "метод VAN". Създаден е от група гръцки физици и по принцип представлява регистриране на електромагнитни аномалии в определени станции чрез различни по база диполни схеми, които могат и да са различно ориентирани.

Още в процеса на експериментиране на метода, неговият основен теоретик проф. Варотцос започва да рекламира силно метода, което му донася доста средства за експериментиране и за създаване на специален институт в Атина. Всяка аномалия, която се регистрира се интерпретира и ако се приеме, че е предвестник на земетресение, то моментално се обявява по радио, телевизия и преса, пишат се

телеграми до правителството. Това определено води до повишаване на напрежението сред населението и се започна да се поставя под съмнение метода след няколко фалшиви тревоги. Започна световен дебат по “метода VAN”. В него бе въвличен и Комитетът по оценка на прогнозите на земетресения към Съвета на Европа.

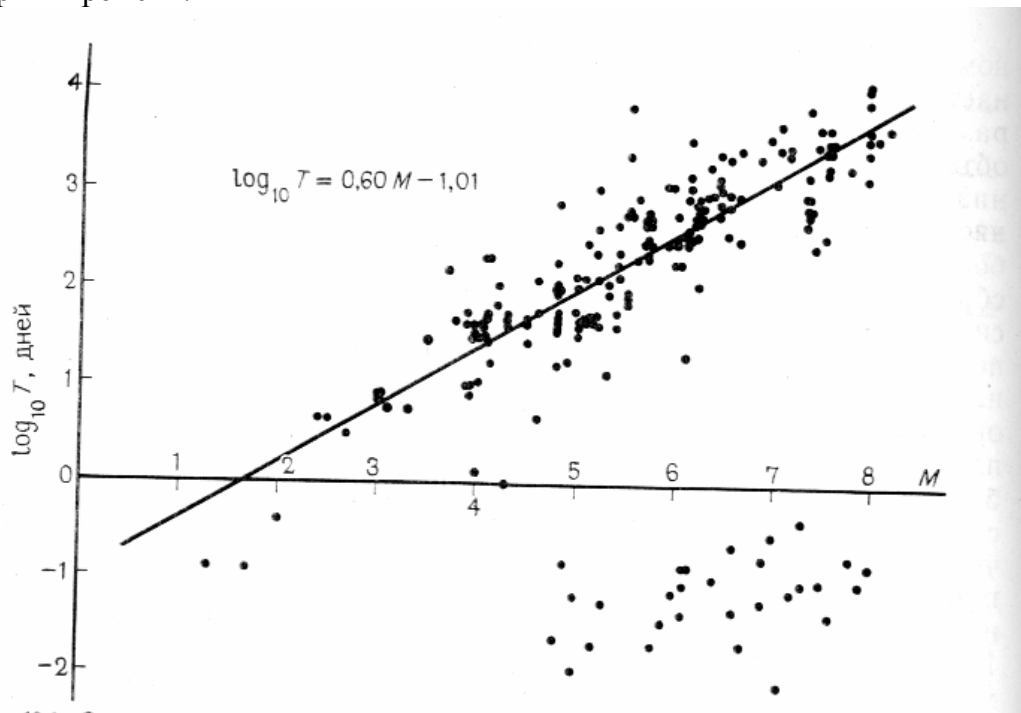
Поисканата експертиза през 1995 г. от гръцкото правителство доведе до дълбок анализ на едно от поредните предсказания на земетресение с магнитуд 5 от екипа на проф. Варотцос. Земетресението не се случи, но дебатите и до сега продължават за ефективността на електромагнитните предвестници.

Относно времето на предвестниците

Има различни анализи за времето на ефективност на предвестниците на земетресения. Касахара привежда като пример анализа на Цубокава, който събира всички данни за предсеизмичните движения на земната повърхност в Япония и показва, че има линейна зависимост между логаритъма на времето на предвестника T (в денонощия) и магнитуда на задаващото се земетресение:

$$\text{Lg}T = 0.79 M - 1.88$$

Много са подобно изведените формули за различни предвестници. По-късно Рикитаке, Шолц, Цубокава и др. публикуват график, в който се опитват да дадат връзката между времето на предвестника и магнитуда на земетресението (фиг. 14.11). Но информацията продължава да се натрупва и подобни зависимости търпят промени.



Фиг. 14.11 Зависимост на стойността на десетичния логаритъм на продължителността на предвестника T (в денонощия) от магнитуда на земетресението M (по Рикитаке).

Етика на прогнозирането

Научното прогнозиране може да не бъде перфектно, то може да бъде критикувано и анализирано, даже може да се отхвърли. Това е естественият път на познанието. За сеизмичното предсказване трябва да се измине целият този дълъг път преди да се стигне до социално обявяване на прогнозите. Тук е и голямата грешка на екипа на проф. Варотцос. Те започват да излъчват социални предсказвания без достатъчна научна апробация на метода. В света няма създаден адекватен механизъм за обявяване на прогнози и предсказвания на земетресения. Тук трябва да се намесят социолози и психолози, за да се изработи система за обявяване на прогнозите. Тази процедура, вероятно, ще се съобразява с характеристиките на местното население – социален статус, степен на образование, религия и т.н. Научната общност е много далеч от “времето на телеграмите” и надали скоро ще се похвалят с успешен, унифициран подход за предсказване на земетресения.

Всяко обявено предсказване на земетръсна катастрофа в последния момент, въз основа на краткосрочни предвестници, може да има “ефект на ядрен взрив” – паника и неконтролируем хаос с последствия, равни на тези от земетресението.