

ПРОГНОЗ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ СЕЙСМОТЕКТОНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Т. Вербицький, Ю. Вербицький

(КВ ІГФ НАН України)

Вступ

Закарпаття є одним з найбільш активних сейсмічних регіонів України. Сучасна активність Закарпатської сейсмогенної зони підтверджується її геотермічним і сейсмічним режимами. Тут зафіксовані найбільш в Карпатському регіоні величини теплового потоку і концентрації епіцентрів місцевих землетрусів, інтенсивність яких досягала 7 балів [1]. На основі даних про особливості геологічної будови і сейсмічного режиму Закарпаття ділиться Оашським поперечним розломом на дві сейсмонебезпечні зони - Тячівську і Мукачівську.

Період повторення землетрусів з інтенсивністю 7 балів в Мукачівській сейсмонебезпечній зоні - біля 160 років [1]. Останній землетрус такої інтенсивності був тут ще в січні 1908 року (епі-

центр на східній околиці м.Сваляви). Відчутних поштовхів тут не було вже кілька десятиріч років. Все це свідчить про ріст ймовірності сильного землетрусу в Мукачівській сейсмонебезпечній зоні.

Для контролю за змінами сейсмічної небезпеки в Закарпатті Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України створило геодинамічний полігон із чотирьох стаціонарних ("Тросник" - у Виноградівському р-ні, "Н.Селище" - в Хустському р-ні, "Берегове" і "Мукачеве") і двох тимчасових ("Буштина" - в Тячівському р-ні і "Брід" - в Іршавському р-ні) режимних геофізичних станцій (РГС). На РГС зареєстровано досить довгі ряди варіацій різних геофізичних полів. Так, за період часу з січня 1992р. До кінця 1997р. є записи місцевих землетрусів зі всіх станцій полігону; мікросейсм, температури і акустичної емісії у свердловині РГС "Тросник" на глибині

500м; горизонтальної деформації і нахилів масиву гірських порід у штольні РГС "Берегове". Відсутність теорії, яка зв'язувала б різні геофізичні поля з напружено-деформованим станом земної кори та сейсмічністю не дозволяє встановити функціональні зв'язки між геофізичними полями та підготовкою місцевих землетрусів, стримує застосування одержаних результатів для біжучої оцінки сейсмічної небезпеки в регіоні.

Дана робота присвячена розробці методики комплексного аналізу часових варіацій геофізичних полів і сейсмічності на Карпатському геодинамічному полігоні КВ ІГФ НАН України з метою вивчення зв'язків між ними і використання цих зв'язків для контролю за динамікою сейсмотектонічних процесів, які визначають стан сейсмічної небезпеки в регіоні. Досліджувались ряди середньогодинних і середньомісячних значень мікросейсм, акустичної емісії, деформації, нахилів і температури масиву гірських порід; атмосферного тиску і температури повітря, а також місцеві землетруси та їх енергія

Методика оброблення та аналізу часових варіацій геофізичних полів

Візуальний аналіз досліджуваних рядів показав, що їх варіації мають складний коливний характер. В часових рядах деформації, температури земної кори та енергії, виділеної місцевими землетрусами, ці коливання накладаються на дуже малозмінну трендоподібну компоненту.

Для дослідження фізичної природи і складу гармонічної компоненти у варіаціях геофізичних полів спочатку виключалась їх трендова компонента [2]. Тренд виділявся методом апроксимації досліджуваного ряду оптимальним ортогональним поліномом Чебишева [3,4]. Опісля, виділений тренд віднімався від спостережуваного ряду значень даної характеристики геофізичного поля.

Для спектрального аналізу детрендованих варіацій використовувалась програма швидкого перетворення Фур'є (FFT). Перед застосуванням цієї процедури детрендовані ряди піддавались у заданому часовому вікні низькочастотній фільтрації (точкове згладжування методом ковзного середнього) з метою очищення їх від високочастотних завад - нестационарних похибок вимірювання. Довжина цього вікна підбиралась шляхом спеціальних досліджень.

Згладжування методом ковзного середнього застосовувалось також для усунення високо-частотних (добових, півдобових) припливних

гармонік перед аналізом більш низькочастотних варіацій.

Для оцінки зв'язків між варіаціями в часі характеристик різних геофізичних полів використовувались методи кореляційного і когерентного аналізу [5]. З цією метою була розроблена спеціальна програма (COGERENT). Ефективність програми перевірялась шляхом тестування на синтетичних часових рядах, котрі описуються полгармонічними функціями.

Для оцінки точності визначення спектрів, амплітуди і фази когерентності використовуються відомі методики [6]. Запропонована методика випробовувалась на матеріалах режимних геофізичних спостережень на станціях Карпатського геодинамічного полігону.

Аналіз трендової компоненти в часових рядах значень горизонтальної компоненти деформації земної кори показав, що в напрямку північний захід - південний схід до 1994р. відбувався стиск з швидкістю 4×10^{-7} на рік. Потім стиск припинився (Рис. 1а).

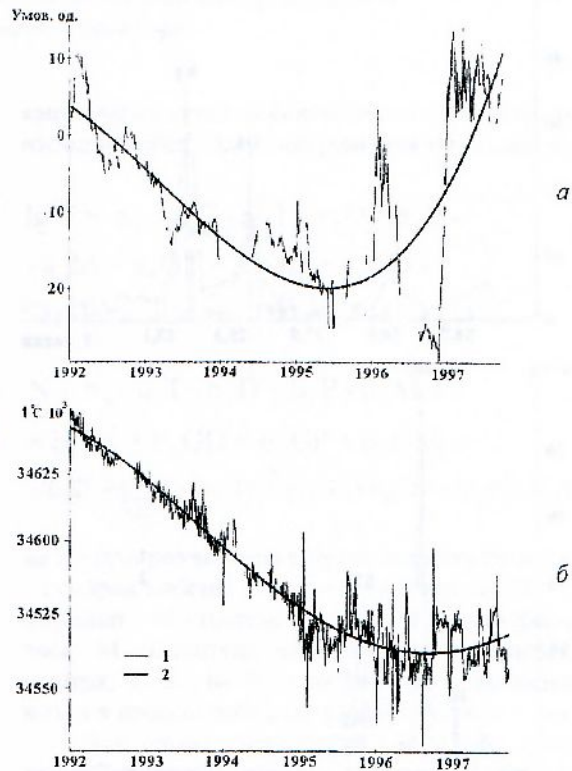


Рис. 1. Варіації в часі горизонтальної деформації масиву гірських порід в штольні РГС "Берегове" (а) і температури масиву гірських порід у свердловині РГС "Тросник" (б) 1 - результати спостережень; 2 - трендова компонента.

Характер трендової компоненти температури земної кори вказує на її зниження з градієнтом $0,033^{\circ}\text{C}$ на рік, але до початку 1995р. температура також стабілізувалася (Рис. 1б).

Тренд розподілу в часі енергії місцевих землетрусів вказує на зменшення виділення сейсмічної енергії починаючи з 1994 року.

З метою вивчення природи полігармонічних варіацій деформації земної кори застосовувались методи спектрального, кореляційного і когерентного аналізу. На амплітудному спектрі часового ряду середньогодинних значень деформації виділяється декілька максимумів. Зіставлення цього спектра з аналогічним спектром теоретично розрахованої припливоутворюючої сили [7] показує, що ці максимуми відповідають півдобовим K_2 , S_2 , M_2 , N_2 і добовим K_1 , P_1 , M_1 , O_1 припливним хвилям (Рис. 2)

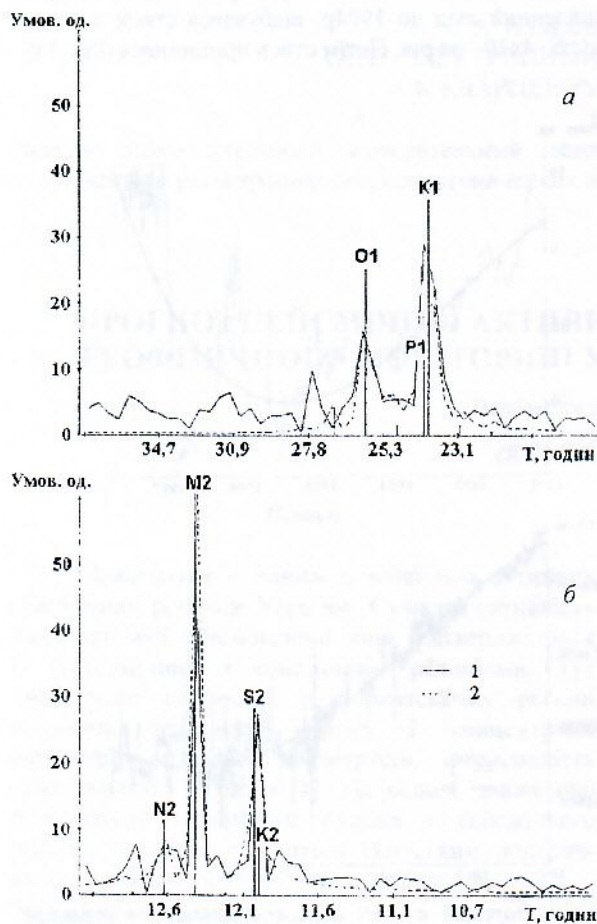


Рис. 2. Амплітудні спектри деформації (1) і теоретично розрахованої приливо - утворюючої сили (2) добових (а) і півдобових (б) діапазонів хвиль.

Найбільша когерентність між деформацією і припливоутворюючою силою характерна для хвиль S_2 , M_2 , K_1 і O_1 . Вона коливається в межах 0,86-0,92, що свідчить про малий вплив завад на заміри цих найбільш інтенсивних приливних хвиль (Рис 3). Слід зауважити, що такий же висновок зроблено на основі аналізу результатів деформографічних спостережень в районі Фріулі (північно-західна Італія) [8].

Аналогічне дослідження рядів середньодобових значень деформації і припливоутворюючої сили дозволив ідентифікувати на спектрі деформації припливні хвилі M_f (період біля 14 діб) і M_m (період біля 28 діб). Когерентність цих хвиль з відповідними їм гармоніками теоретично розрахованої приливо-утворюючої сили значно менша, що можна пояснити впливом метеофакторів на варіації деформації даної частоти [9]. Природа ще кількох максимумів на цьому спектрі, котрі відповідають хвилям з періодами біля 7, 10, 12 і 20 діб, вимагає дальшого вивчення.

Після виключення з детрендованих рядів значень геофізичних полів полігармонічних приливних коливань (періоди 1/3 - 28 діб), залишаються досить значні варіації невизначеної природи. Серед них можуть бути варіації, котрі зумовлені припливами в твердій Землі і метеорологічними факторами ще більших періодів (сезонні варіації) та геодинамічними і сейсмотектонічними процесами.

Сезонні варіації з детрендованих рядів значень геофізичних полів виключались шляхом застосування смугового фільтра Гауса у спектральній області.

Для вивчення природи залишкових варіацій геофізичних полів та встановлення зв'язків між ними доцільно використовувати статистичні методи факторного, кореляційного та регресійного аналізу [10,11].

Результати комплексного аналізу матеріалів режимних геофізичних спостережень

Сумісний аналіз детрендованої і фільтрованої від сезонних варіацій послідовності середньомісячних значень температури масиву гірських порід на глибині 500 м у свердловині РГС "Тросник" та розподілу в часі закарпатських землетрусів (в радіусі не більше 100 км від РГС "Тросник") за період 1992-1997 р.р. показує, що більшість цих землетрусів відбулась в періоди пониження температури надр. Якщо ж графік варіацій температури зсунути на три місяці вперед

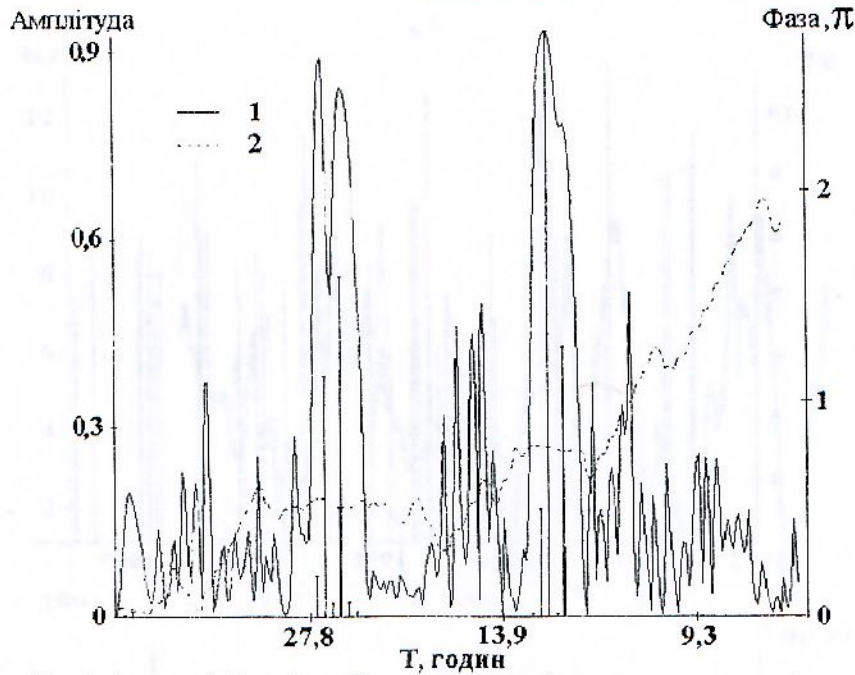


Рис.3 Амплітуд (1) і фаза (2) когерентності приливуотворюючої сили і приливної деформації земної кори.

відносно графіка розподілу в часі місцевих землетрусів, то на періоди часу понижених значень температури накладається 36 землетрусів із 45, котрі відбулися в 1992-1997р.р. (Рис.4)

Кореляційний аналіз досліджуваних характеристик геофізичних полів показав, що між ними існує тісний кореляційний зв'язок, який може бути використаний для побудови статистичних моделей місцевої сейсмічності. Слід зауважити, що найбільші значення коефіцієнта парної кореляції між сейсмічною енергією, виділеною місцевими землетрусами, та їх кількістю, з одного боку, і температурою та деформацією земної кори з другого, спостерігаються у випадку випередження варіаціями геотемператури і деформації на 2-3 місяці відповідних варіацій енергії та кількості землетрусів. Виявлений характер кореляційних зв'язків створює основу для побудови статистичної моделі сейсмічності і використання цієї моделі для прогнозування сейсмічної небезпеки

Застосування статистичного методу регресійного аналізу до часових рядів значень досліджуваних характеристик геофізичних полів за 1992-1996 р.р. дало можливість побудувати багатфакторну нелнійну емпіричну залежність характеристик сейсмічності від характеристик геофізичних полів, яку можна використати для прогнозу-

вання характеристик сейсмічності приблизно на 3 місяці наперед. Одержані рівняння мають вигляд.

$$\lg E = a_0 - a_1 G - a_2 T - a_3 D + a_4 P - a_5 M + a_6 GT + a_7 GD + a_8 TD - a_9 TP + a_{10} TM + a_{11} DM - a_{12} PM + a_{13} M^2;$$

$$N = b_0 - b_1 T - b_2 D + b_3 P - b_4 M + b_5 G^2 + b_6 GD + b_7 GP + b_8 GM + b_9 T^2 + b_{10} TD - b_{11} TP + b_{12} D^2 + b_{13} DP + b_{14} P^2 - b_{15} PM,$$

де E - сумарна місячна енергія землетрусів в Дж; N - сумарна місячна кількість землетрусів; D - деформації; G - геотемпература; P - атмосферний тиск; M - амплітуда мікросейсм; T - температура повітря; a_0, a_{13}, b_0, b_{15} - коефіцієнти, що визначаються в процесі побудови рівнянь регресії.

Для оцінки значущості одержаних рівнянь регресії використовувався критерій Фішера [11]. Розраховане значення критерію Фішера перевищує його табличне значення при рівні значущості 0.05 для кількості землетрусів і 0.20 для їх енергії.

З метою визначення ефективності прогнозування характеристик сейсмічності за допомогою

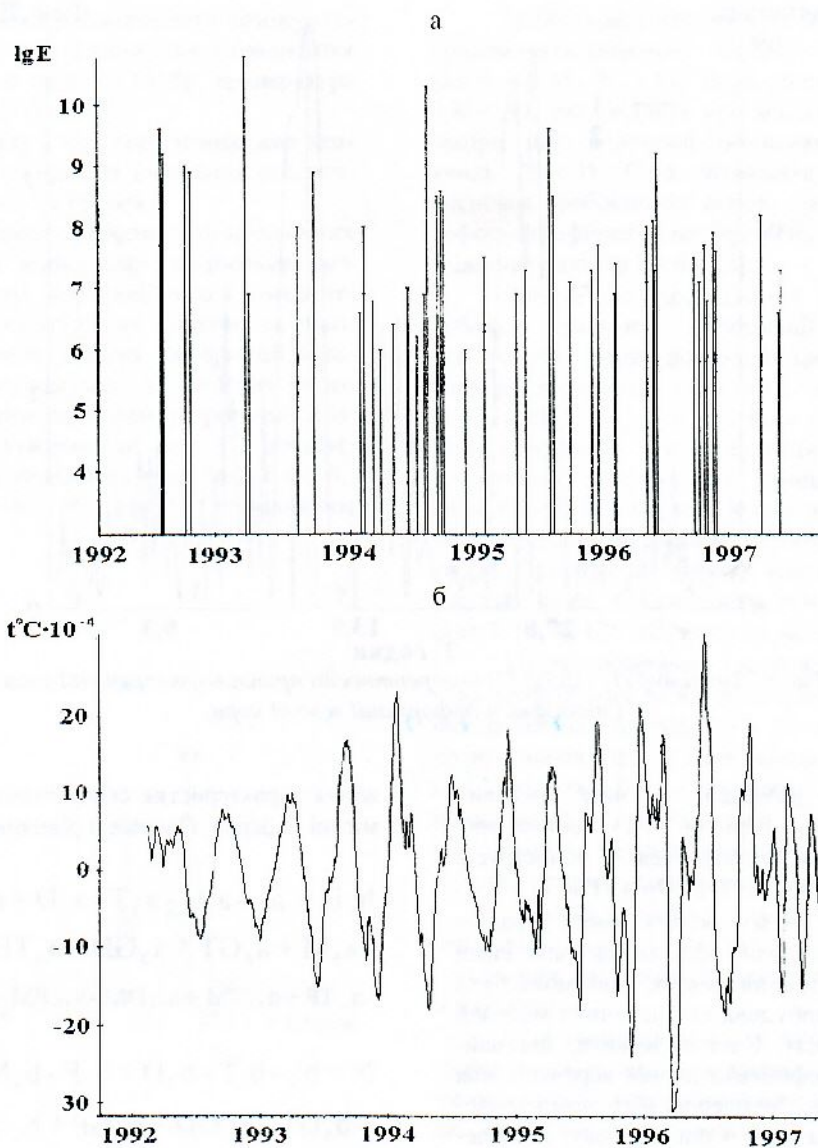


Рис 4. Графіки розподілу в часі місцевих землетрусів (а) і температури земних надр (б).

одержаного модельного рівняння проведено їх розрахунок для 1997 року. Графіки спостережуваних та розрахованих змін в часі енергії та кількості землетрусів показано на рис.5. Коефіцієнти взаємної кореляції цих величин на прогнозований період часу (1997 р.) для енергії землетрусів та їх кількості рівні відповідно

$$\Gamma_E = 0.69 \pm 0.03; \quad \Gamma_N = 0.58 \pm 0.04.$$

Отже, використані часові варіації даного комплексу характеристик геофізичних полів дозволяють на три місяці наперед оцінювати зміни енергії і кількості Закарпатських землетрусів, які характеризують стан сейсмічної небезпеки.

Висновки

Аналіз модельного рівняння показує, що збільшення енергії, виділеної місцевими землетрусами, відбувається при зменшенні температури земної кори і повітря, рівня ендогенних мікросейсм та при зростанні деформації стиску і атмосферного тиску.

На основі результатів проведеного дослідження пропонується такий механізм росту сейсмічності на території Закарпаття: Оскільки земна кора регіону розчленована на численні блоки, то під дією тектонічних процесів відбувається накопичення напружень в зонах, де виник опір їх

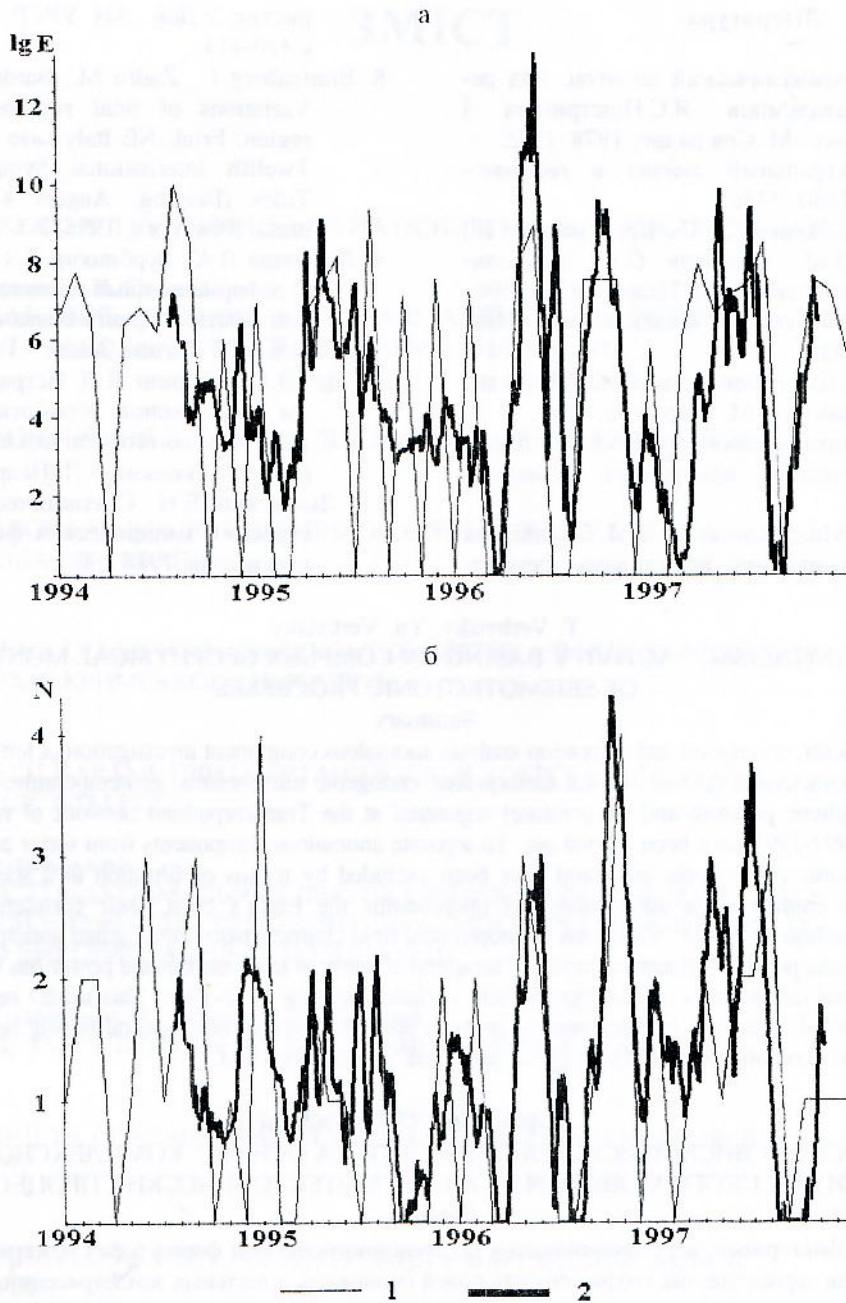


Рис. 5. Варіації в часі енергій, Дж (а) і кількості (б) землетрусів.
1- спостережувані значення; 2 - розраховані значення.

взаємному переміщенню. Про концентрацію напружень свідчить ріст ендегенних мікросейсм. В період часу пониження температури надр відбувається зменшення об'єму охолоджених блоків земної кори, яке визначається температурним коефіці-

єнтом об'ємного розширення гірських порід, зменшення зчеплення між блоками і розрядка накопичених напружень у вигляді землетрусів.

Ці дослідження проведені при фінансовій підтримці грантом ЄС № IC15-CT96-0205.

Література

- 1 Карпатский геодинамический полигон. Під редакцією академіків Я.С.Підстригача і А.В.Чекунова. -М.:Сов.радио, 1978. 127с.
- 2 Бат М. Спектральный анализ в геофизике. - М.:Недра, 1980 -535с.
- 3 Вергасов В.А., Журкин И.Г., Красикова М.В., Нейман Ю.М., Смирнов С.А. Вычислительная математика. - М.:Недра, 1976.-230с.
- 4 Худсон Д. Статистика для физиков. - М.: Мир. т.2, 1967.-242с.
- 5 Марпл С.Л.-мл.Цифровой спектральный анализ и его приложения.-М.:Мир,1990.-584с.
- 6 Макс Ж. Методика и техника обработки сигнала при физических измерениях. :Мир.т.2, 1983 -256с.
7. Куксенко В.І., Михайловський В.М. Зменшення помилки розрахунку припливних характеристик // Доп. АН УРСР, сер.Б,-1979.-№6.- с 420-424.
8. Braitenberg C., Zadro M., Bardelli M., Mao W.J. Variations of tidal responses in a seismic region: Friuli-NE Italy case. Procidings of the Twelfth International Symposium of Earth Tides (Beiging, August 4-7,1997). Science press. New York, 1995, P.1-7.
9. Лягьшина Л.А., Вербицкий Т.З., Игнатишин В.В. О деформационных процессах в северо-восточной части Карпато-Балканского региона // Изв.РАН. Физика Земли. - 1995.-№4. - с.3-16.
10. Деч В.Н., Кноринг Л.Д. Нетрадиционные методы комплексной обработки и интерпретации геолого-геофизических наблюдений в разрезах скважин. - Л.:Недра, 1997. 192 с.
11. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. -М.: Высшая школа, 1988. 239 с.

T. Verbytsky, Yu. Verbytsky

PREDICTING SEISMIC ACTIVITY BASING ON COMPLEX GEOPHYSICAL MONITORING OF SEISMOTECTONIC PROCESSES

Summary

Using methods of factor. correlation and regression analysis anomalous component investigation of temporal variations of geophysical field characteristic (power of local earthquakes, endogenic microseisms, geotemperatures, the Earth's crust deformation, atmospheric pressure and temperature) registered at the Transcarpathian network of regime geophysical stations (RGS) in 1992-1997 have been carried out. To separate anomalous components from series of geophysical field characteristics harmonic components and trend have been excluded by means of filtration in a spectral domain. The investigation results confirm high informativity of microseisms the Earth's crust, their correlation with temporal variations of local earthquake power. Variations of geophysical field characteristics investigated anticipate by 2-3 months variations of earthquake power. A statistical model of temporal changes of local earthquake power has been developed on the base of anomalous components of geophysical field variations during 1992-1996. This model makes it possible to predict the time of local seismicity enhancement in order to take due precautions. Special testing held at RGS data in 1997 testifies to good correlation between variations "predicted" and observations.

Т. Вербицкий, Ю. Вербицкий

ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Резюме

Используя методы факторного, корреляционного и регрессионного анализа фномальных компонент, исследованы временные вариации характеристик геофизических полей (мощность локальных землетрясений, эндогенные микросейсмсы, геотемпературы деформации земной коры, атмосферное давление и температура), зарегистрированные Транскарпатской сетью режимных геофизических станций (РГС) в 1992-1997 годах. Для выделения аномальных компонент из рядов характеристик геофизических полей гармонические коэффициенты и тренд исключались путем фильтрации в спектральной области. Результаты исследований подтверждают высокую информативность микросейсмсов земной коры, их корреляцию с временными вариациями мощности локальных землетрясений. Исследованные вариации характеристик геофизических полей позволяют на 2-3 месяца предсказать вариации мощности землетрясений. Статистическая модель временных изменений мощности локальных землетрясений разработана на основе вариаций аномальных компонент геофизических полей за 1992-1996 годы. Эта модель позволяем прогнозировать время повышения локальной сейсмической активности. Специальное тестирование данных РГС за 1997 год показало высокую корреляцию между предсказанными и наблюдаемыми вариациями.