

Szeizmikus első beérkezések automatikus detektálására szolgáló eljárások összehasonlító vizsgálata

T Á L A S S Á N D O R *

Az első beérkezések ideje a szeizmika sok területén igen fontos információk hordozója. Automatikus meghatározásukra több algoritmus született. Dolgozatomban ezek közül három, az utóbbi években publikált, elveikben különbözőt vizsgáltam meg. Elemeztem hatékonyságukat modell-szeizmogramokon és terepi felvételeken a pontosság, a zajérzékenységi és a futási idő szempontjából. A vizsgálatok azt mutatták, hogy legcélszerűbb a Gelchinsky és Shtivelman (1983) által leírt algoritmus használata, mivel pontossága igen jó, míg Hatherly (1982) és Coppens (1985) módszerénél a jel/zaj arány növekedésével jelentős hibák fordulhatnak elő.

First arrival times are one of the most important information used in many fields of seismics. Several methods were suggested for computer based automatic picking. In this paper three principally different ones are introduced. Numerous tests were made on model-seismograms and field data with the focus on accuracy, sensibility to noise and running time. Experiments have proved that out of these three the most successful was the one proposed by Gelchinsky and Shtivelman (1983), while methods proposed by Hatherly (1982) and Coppens (1985) may results numerous mispicks with the increase of the signal to noise ratio.

Время первых вступлений является носителем очень важной информации, которая может быть использована во многих областях сейсморазведки. Различные алгоритмы были разработаны для автоматического их определения с помощью ЭВМ.

В данном исследовании было проведено сравнение эффективности трех принципиально отличающихся алгоритмов, используя синтетические и полевые сейсмограммы, на основании таких показателей, как достоверность, чувствительность к шумам и потребляемое машинное время. Исследования показали, что применение метода, описанного в работе Gelchinsky и Shtivelman (1983), является наиболее целесообразным благодаря его высокой достоверности; при использовании методов предложенных в работах Hatherly (1982) и Coppens (1985) с увеличением отношения сигнал/шум значительно повышается количество ошибок.

Bevezetés

A digitális regisztrálás egyre nagyobb mértékű térhódításával megteremtődött az első beérkezések automatikus (számítógéppel történő) kijelölésének lehetősége, és a gépi feldolgozás elterjedésével párhuzamosan felmerült ennek igénye is. Az utóbbi két évtizedben több olyan eljárás született, mely több-kevesebb sikerrel, valamilyen szinten megoldotta a feladatot.

A legelső probléma, ami a feladat megoldásakor felmerül, az első beérkezés definíciója. A hagyományos felfogás szerint az első beérkezés ideje megegyezik azon első mintavételi időponttal, melynél az amplitúdó (a regisztrált érték) egyértelműen kiemelkedik a háttérzajból. Ez a meghatározás szolgál ugyan alapjául a manuális feldolgozásnak, de több szempontból is kívánivalókat hagy maga után. A nehézségeket leggyakrabban a következő jelenségek okozzák:

— a háttérzaj elfedi a jel kezdetét, s így növeli a beérkezés látszólagos idejét,

— csatornáról csatornára változik mind a jel, mind a zaj nagysága, s így különböző csatornákon különböző fázisát jelöljük ki a jelnek.

— a távolsággal romlik a jel/zaj arány, az egyre jobban gyengülő jelek „belesimulnak” a zajba,

ami szintén megnehezíti a következetes beérkezés-kijelölést.

Persze a fent vázolt gondok jelentős részét egy gyakorlott kiértékelő többé-kevésbé automatikusan megoldja, de nagyszámú felvétel esetén a kézi kiértékelés igen időigényes. A munka gépesítése szempontjából sajnos nem járható az az út, hogy megpróbáljuk utánozni a kiértékelőt, mivel döntései nehezen algoritmizálhatóak, programozásukról nem is szólva.

Az általam vizsgált három eljárás szerzői némileg eltérő módon közelítették meg a jelkezdet definiálásának fentebb vázolt problémáját, és próbálták úgy megválasztani az alkalmazott algoritmust, hogy az az első beérkezések általuk legjellemzőbbnek tartott tulajdonságaira legyen fókuszálva. A definíciókban így jelentkező különbségeket az adott módszer tárgyalásakor részletezem.

A vizsgált eljárások ismertetése

Coppens módszere

Coppens (1985) véleménye szerint az általam felhasznált két első beérkezés kritérium — az energia hirtelen megnövekedése az adott csatornán és ezen megnövekedések ideinek koherenciája az egymást követő csatornákon, — kiegészíthető egy harmaddal, a szomszédos csatornákon re-

* Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Budapest

gisztrált jelalakok hasonlóságával. Továbbá zajos csatornákon célszerűbbnek és biztonságosabbnak látja a jel nehezen kijelölhető, és ezáltal bizonytalanabb kezdete helyett — a jel polaritásától függően, — az első pozitív, vagy negatív csúcs meghatározását. Mivel e módszert elsősorban a statikus korrekciók meghatározásához ajánlja, így a számításokhoz a különböző felvételekből összegyűjtött egyenlő offsetű csatornákat használja, melyeknél feltételezi, hogy adott szelvény mentén a jelalak nem változik jelentősen, s így az első csúcs és a jel kezdete közti különbség gyakorlatilag konstans tolásként jelentkezik.

A szerző tapasztalata szerint az alábbiakban leírt módszer alkalmazásának bár vannak korlátai, de összehasonlítva azokat *Gelchinsky* és *Shtivelman* (1983), valamint *Hatherly* (1982) által javasolt, e dolgozatban is vizsgált módszerekkel, feltétlenül e módszer javára billen a mérleg. Véleménye szerint az eljárás a legtöbb esetben jó eredményre vezet — feltéve, hogy a jel/zaj arány elég magas, — pontossága megfelelő és zajérzékenysége nem túl nagy. Saját tapasztalataim mindezeket nem támasztották alá.

A módszer elve a következő: határozzuk meg a vizsgált csatornára, melyen $S(t)$ értékeket regisztráltunk, a következő energiafüggvényt:

$$F(\tau) = \frac{\int_{\tau-L}^{\tau} S^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau} S^2(\tau) d\tau}.$$

Lényegében így egy rövidebb, L hosszúságú futó ablak energiájának és egy hosszabb, a csatorna elejétől a futó ablak végéig tartó ablak energiájának hányadosát számítjuk ki. Az $F(\tau)$ függvény maximumának helyét meghatározva, annak a környezetében található — a jel polaritásától függően negatív, vagy pozitív — csúcs helye adja meg a keresett időt. Az egyetlen beállítandó paraméter a futó ablak hossza, de — tapasztalataim alapján — L értékének változására a módszer viszonylag széles tartományban érzéketlen.

Mint már említettem, tapasztalataim szerint Coppens módszere nem volt olyan hatásos, mint azt cikke alapján képzelni lehetett. Legnagyobb problémát az $F(\tau)$ energiafüggvény maximumának meghatározása után a jel első szélsőértékét megtaláló algoritmus kidolgozása okozta. Ennek mikéntjére a szerző nem tett utalást, nekem pedig többszöri próbálkozás alapján sem sikerült használhatót találnom. Ennek okai jól megfigyelhetők az 1.—4. ábrákon. Az 1. ábrán egy gyengén zajos, míg a 2. ábrán egy erősen zajos műszeizmogramon jelöltem be az energiafüggvény maximumhelyeit. Jól látható, hogy e helyek mindig a jel első egy-másfél periódusán belül találhatóak, de ott már a jel/zaj arány csökkenésével egyre hátrébb kerülnek, és egyre inkább *csúszkálnak*. Hasonló jelenség látható a 3.—4. ábrán, ahol két terepi felvétel kritikus jel/zaj arányú csatornáit

láthatók, s ezeken is megfigyelhető a fenti bizonytalanság. Mindennek az oka, hogy az energiafüggvénynek több lokális maximuma van a kérdéses tartományban, s azt, hogy ezek közül melyik lesz a legnagyobb, a csatorna korai szakaszán regisztrált zaj időbeni eloszlása határozza meg. Így nem igazán megbízható az az eljárás, ha az energiafüggvény maximumhelyét megelőző pozitív csúcsot jelöljük ki a csatornában (hisz a maximumhely megelőzheti azt), de gyakran az sem vezet jó eredményre, ha a legközelebbi pozitív csúcsot jelöljük ki (mivel a maximumhely kis jel/zaj arány esetén a jel első periódusának vége felé helyezkedik el, mi több időnként átsúszik a második periódusra). A felmerülő bizonytalanságok csökkentésére Coppens azt ajánlja, hogy válogassuk össze az azonos offsetű csatornákat, és azokon — kihasználva a jelalakok hasonlóságát, — koherencia-szűrést hajtsunk végre, így növelve a jel/zaj arányt. Az ajánlott szűrő a következő:

$$R_{j, j+1}(t) = \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{N^+ - N_-}{N^+ + N_-} \right)$$

ahol N^+ (illetve N_-) azon minták száma, melyek előjele megegyezik (illetve ellentétes) a j és a $j+1$. csatornán a $[t-\Delta t, t+\Delta t]$ időablakban. A szűrt szeizmogramot az eredetiből a minták $W_j(t)$ -vel való szorzásával kapjuk meg, ahol

$$W_j(t) = \frac{1}{4} [R_{j, j+1}(t) + 1] [R_{j, j-1}(t) + 1]$$

Megvizsgáltam e szűrő hatását egy azonos offsetű csatornákat tartamazó műszeizmogramon, de tapasztalataim szerint az $F(\tau)$ maximumhelyei és a jel első maximumhelyei közötti kapcsolat lényegében ugyanolyan bizonytalan maradt, sőt egyes csatornákon még rosszabb eredményt is kaptam a szűrés előttihez viszonyítva.

Mindezen tapasztalatok alapján azt a következőket vontam le, hogy Coppens módszere túl érzékeny a jel/zaj arány változásaira, és nagyon meg tudja zavarni a zaj időbeni nem egyenletes eloszlása. Összefoglalva: túl bizonytalan ahhoz, hogy az első beérkezések automatikus kijelölésére használhassuk.

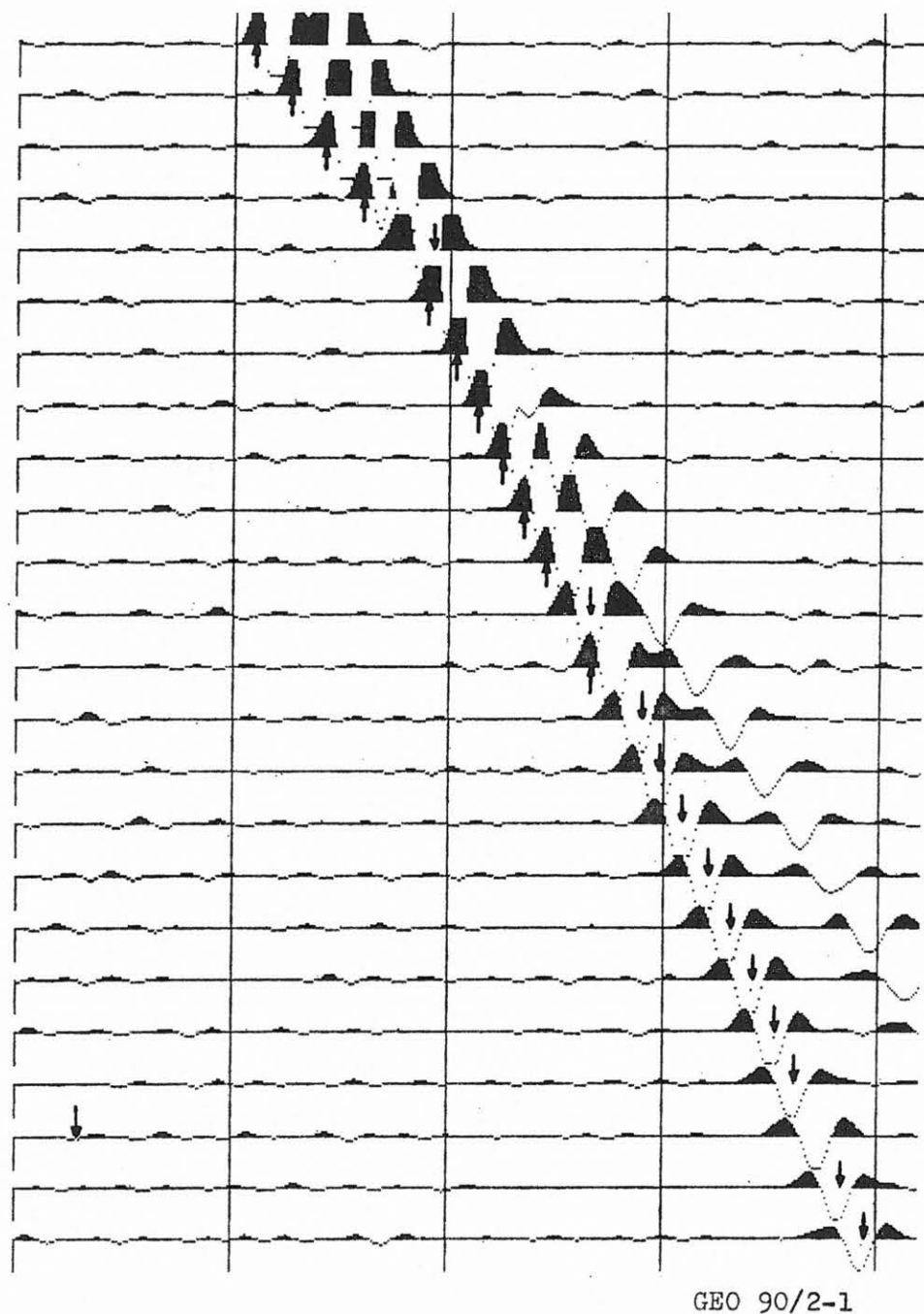
Hatherly módszere

Ricker (1953) első beérkezésként az első metszet-időt, azaz a jelalak első inflexió pontjában húzott érintő tengelymetszetét definiálta. Ez annyiban objektív definíció, hogy független az erősítéstől és kiküszöböli a különböző jel/zaj arány okozta bizonytalanságot, de van hátránya is: az így meghatározott első beérkezés minden esetben későbbi a valódinál.

Hatherly 1982-ben publikált cikkében olyan számítógépes algoritmust javasolt, mely némileg *Ricker* fenti definíciójára emlékeztet, de megpróbálja kiküszöbölni annak hiányosságait. A módszer lényege, hogy első beérkezésnek azon első minta idejét tekinti, mely statisztikusan eléggé különböző az azt megelőzőektől. Az így kapott időket viszont még nem konzisztensek, azaz némileg függnek az adott csatorna jel/zaj arányától.

Ezekből oly módon kapunk minden csatornára konzisztens első beérkezéseket, hogy idejüket hozzáigazítjuk az első inflexiós pontokhoz. A módszer három lépésből áll:

1. Elsőként különböző statisztikai módszerekkel megkeressük azt a mintát, mely a vizsgált i csatornán egyértelműen *kilóg* a korábbi minták sorából. Ezt nevezzük a jel első pontjának, ideje



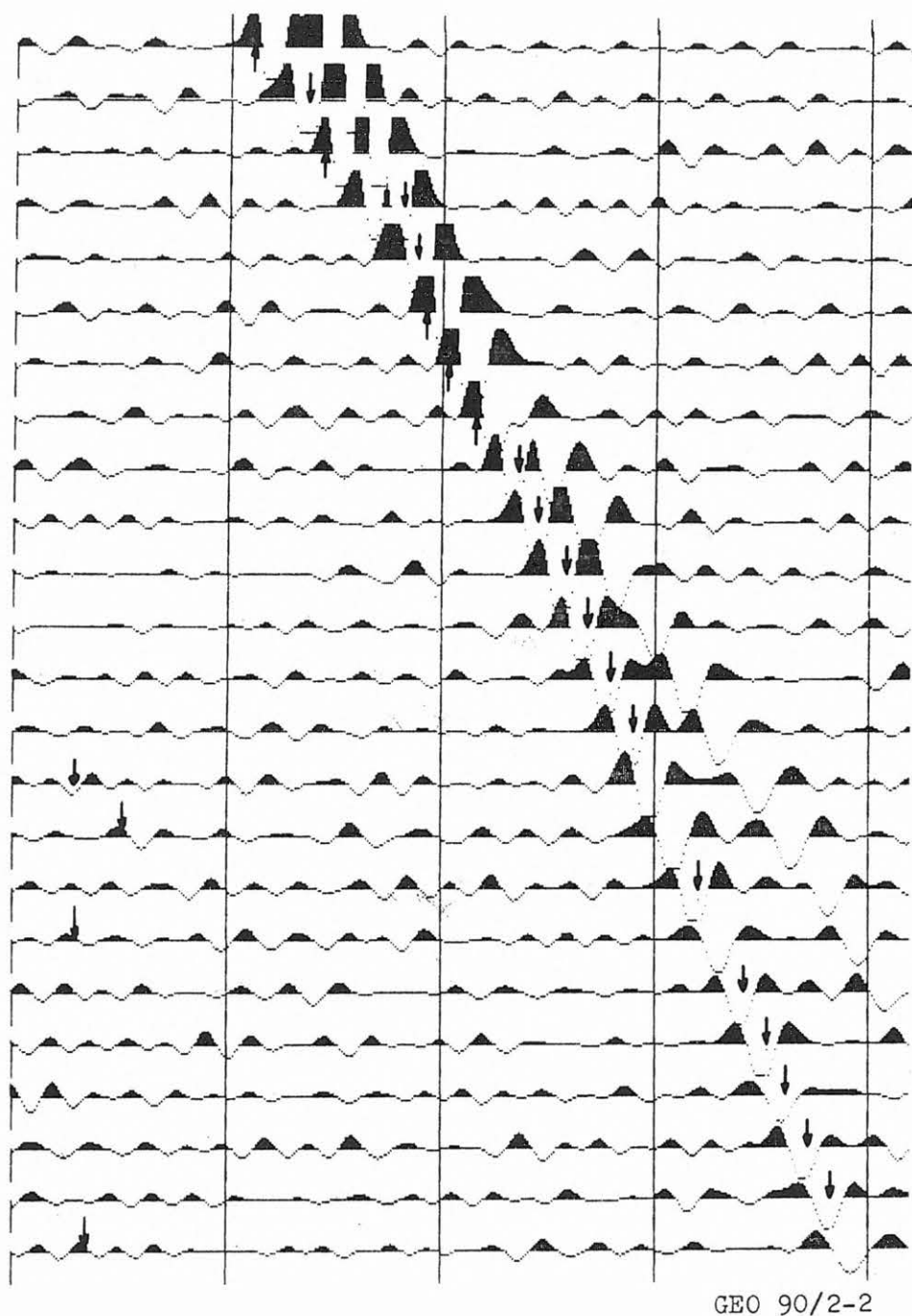
1. ábra. A Coppens-féle energiafüggvény maximumhelyei gyenge zajjal terhelt műszeizmogramon. Látható a maximumhelyek eltolódása a kisebb energiájú jeleknél

Рис. 1. Места максимума функции энергии по методу Coppens-а на синтетической сейсмограмме, нагруженной слабым шумом. Виден сдвиг мест максимума у сигналов с малой энергией

Fig. 1. Maximums of the energy function proposed by Coppens on synthetic seismogram obtained by adding low-amplitude noise. The maximums are shifted with the decrease of the energy of the signal

pedig legyen t_i . Helyének meghatározása ugyan eléggé precízen történik, de mint már említettük, függ az adott csatorna jel/zaj arányától, s ezen bizonytalanság következtében az összes csatornát tekintve az így kijelölt beérkezések nem konzisztensek.

2. Ezután meghatározzuk a vizsgált csatornán a jel első pontját követő inflexiós pont helyét; ideje legyen T_i . Ezen időket tekinthetjük már mint megfelelően konzisztens beérkezéseket, de a valódi időkhöz képest késleltetettek.



2. ábra. A Coppens-féle energiafüggvény maximumhelyei erős zajjal terhelt műszeizmogramon. Megfigyelhetők a maximumhelyek eltolódása a jel energiájának csökkenésével, és „ugrálása” a kritikus jel/zaj arányú csatornákon

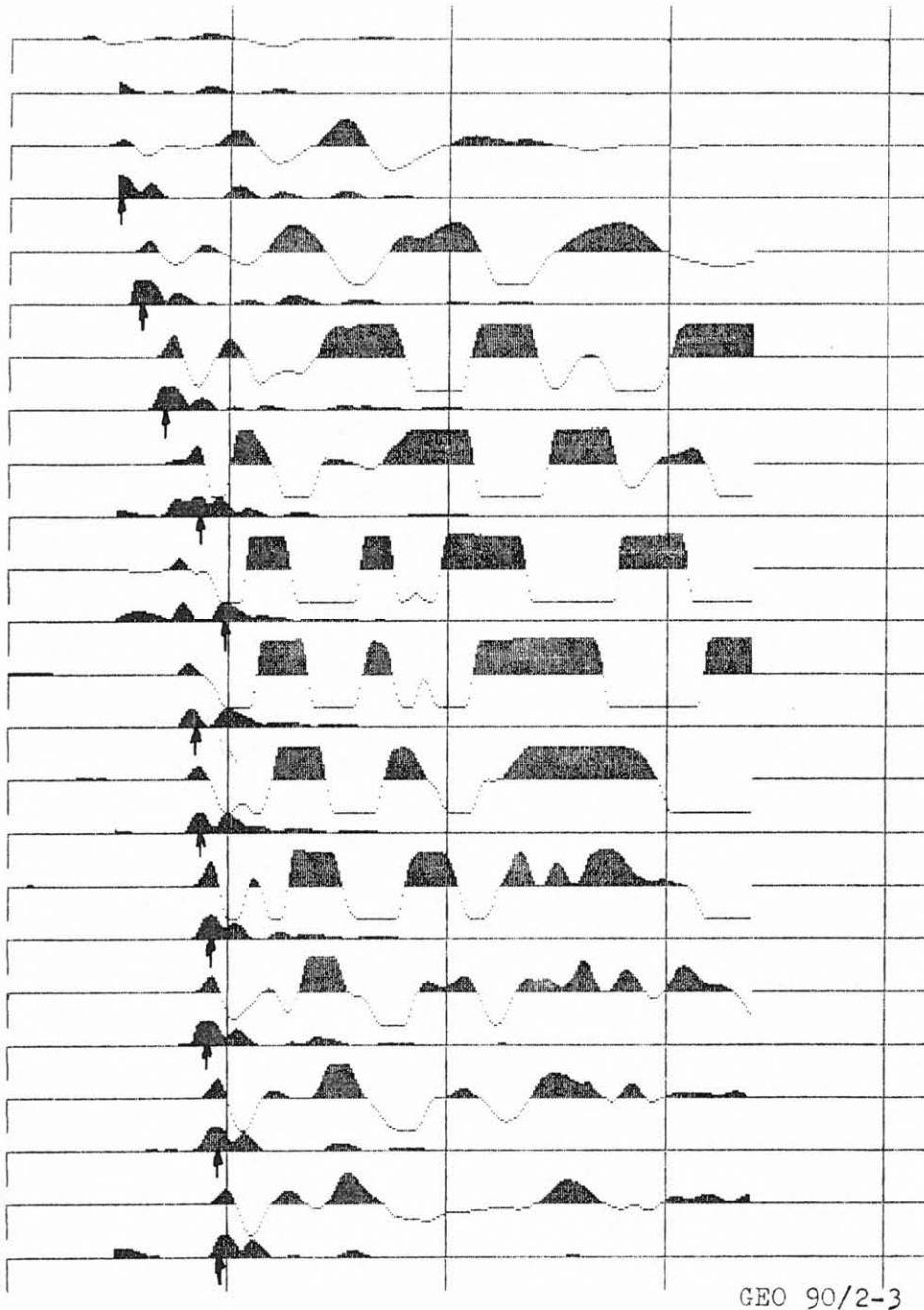
Рис. 2. Места максимума функции энергии по методу Coppens-a на синтетической сейсмограмме, нагруженной сильным шумом. Виден сдвиг и «прыгание» мест максимума при уменьшении энергии сигнала на каналах с критическим отношением сигнал/шум

Fig. 2. Maximums of the energy function proposed by Coppens on synthetic seismogram obtained by adding high-amplitude noise. The maximums are shifted with the decrease of the energy of the signal, and on channels with critical signal-to-noise ratio „skipping” can be observed

3. Végül úgy kapjuk meg a valódi első beérkezéseket leginkább megközelítő időket, hogy az első és második lépésben meghatározott pontok távolságát átlagoljuk az összes csatornára, s az inflexió pontoktól így visszaszámított t_i' első beérkezések már megfelelően pontosak és konzisztensek:

$$t_i' = T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_j - t_j).$$

A fenti három lépés megvalósításánál már csak az elsőben felhasznált statisztikai módszerek



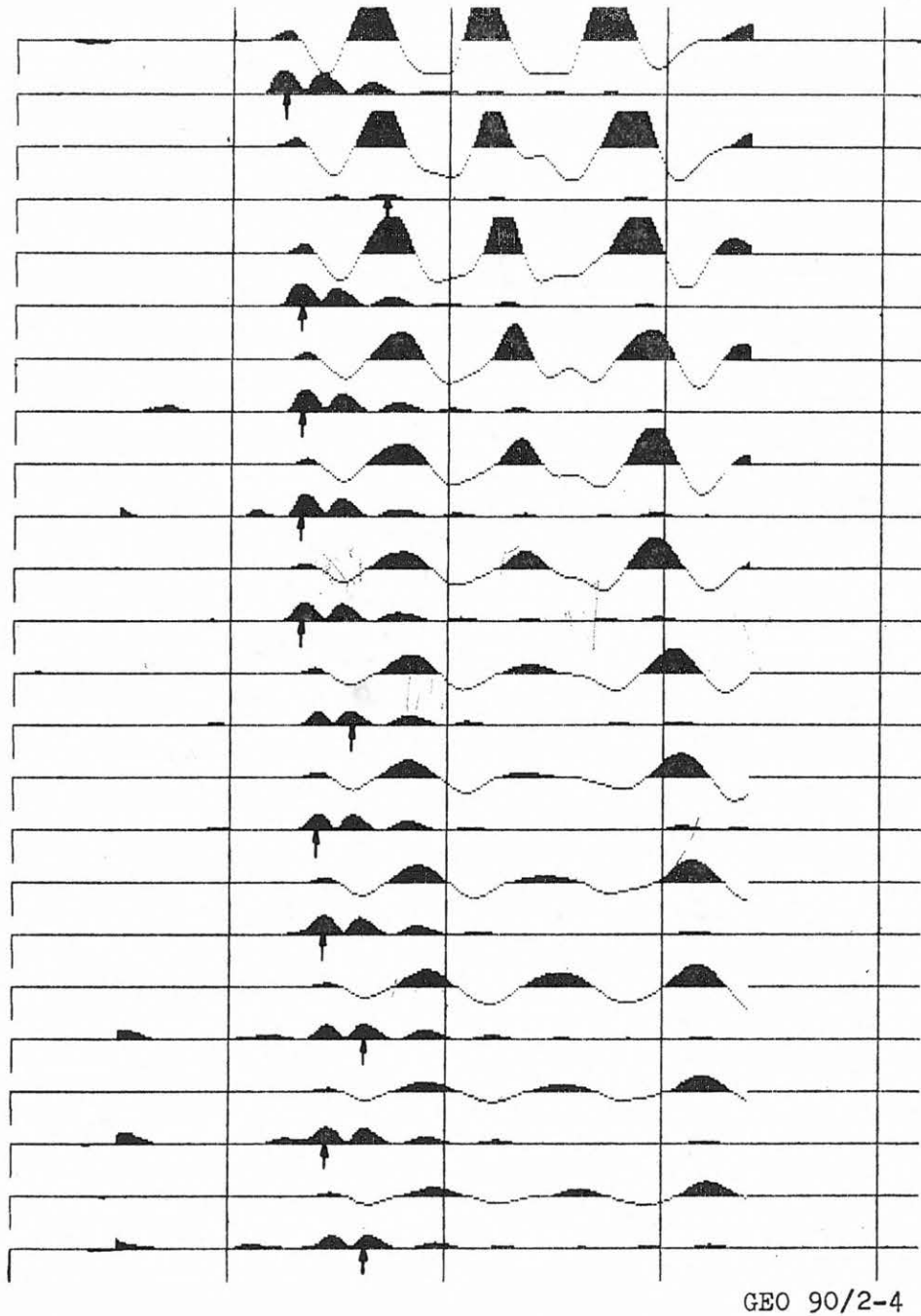
3. ábra. Kritikus jel/zaj arányú csatornák, Coppens-féle energiafüggvényeik és azok maximumhelyei terepi felvételeken. Látható az energiafüggvény kettős-hármas maximumhelye, amit a rövid ablak hosszának (L) változtatásával sem lehet kiküszöbölni

Рис. 3. Каналы с критическим отношением сигнал/шум, функции энергии по Коппенсу и их места максимума на полевой сейсмограмме. Видно, что функция энергии имеет 2—3 пика, которые нельзя устранить даже с помощью изменения длины короткого окна (L)

Fig. 3. Channels with critical signal-to-noise, energy function proposed by Coppens and its maximums on field record. Double or triple peaks cannot be eliminated by changing the length of the small window.

megfelelő megválasztása a feladat. Hatherly cikkében négy empirikus próbát ajánl annak megállapítására, hogy a vizsgált minta tekinthető-e egy jel kezdőpontjának, összehasonlítva a csatorna korábbi elemeivel. Ezek rendre a következők:

1. Korrelációs teszt, mely összehasonlítja a vizsgált minta és a rákövetkező különbségét a korábbi minták közötti különbségekkel. A minták különbségeiről feltételezzük, hogy normális eloszlásúak. A vizsgált minta kiállja a próbát, ha az



4. ábra. Kritikus jel/zaj arányú csatornák, Coppens-féle energiafüggvényeik és azok maximumhelyei terepi felvételen. Megfigyelhető a maximumhely „ugrálása” a két lokális maximum között, melyet erősen befolyásol a jel előtt regisztrált zajok elhelyezkedése

Рис. 4. Каналы с критическим отношением сигнал/шум, функции энергии по Coppens-у и их места максимума на полевой сейсмограмме. Можно наблюдать „прыгание” мест максимума между двумя локальными пиками; большое влияние оказывает на „прыгание” место расположения шума, регистрируемого перед сигналом

Fig. 4. Channels with critical signal-to-noise ratio, energy function proposed by Coppens and its maximums on field record. The „skipping” between the two local peaks is affected by the noise registered before the signal

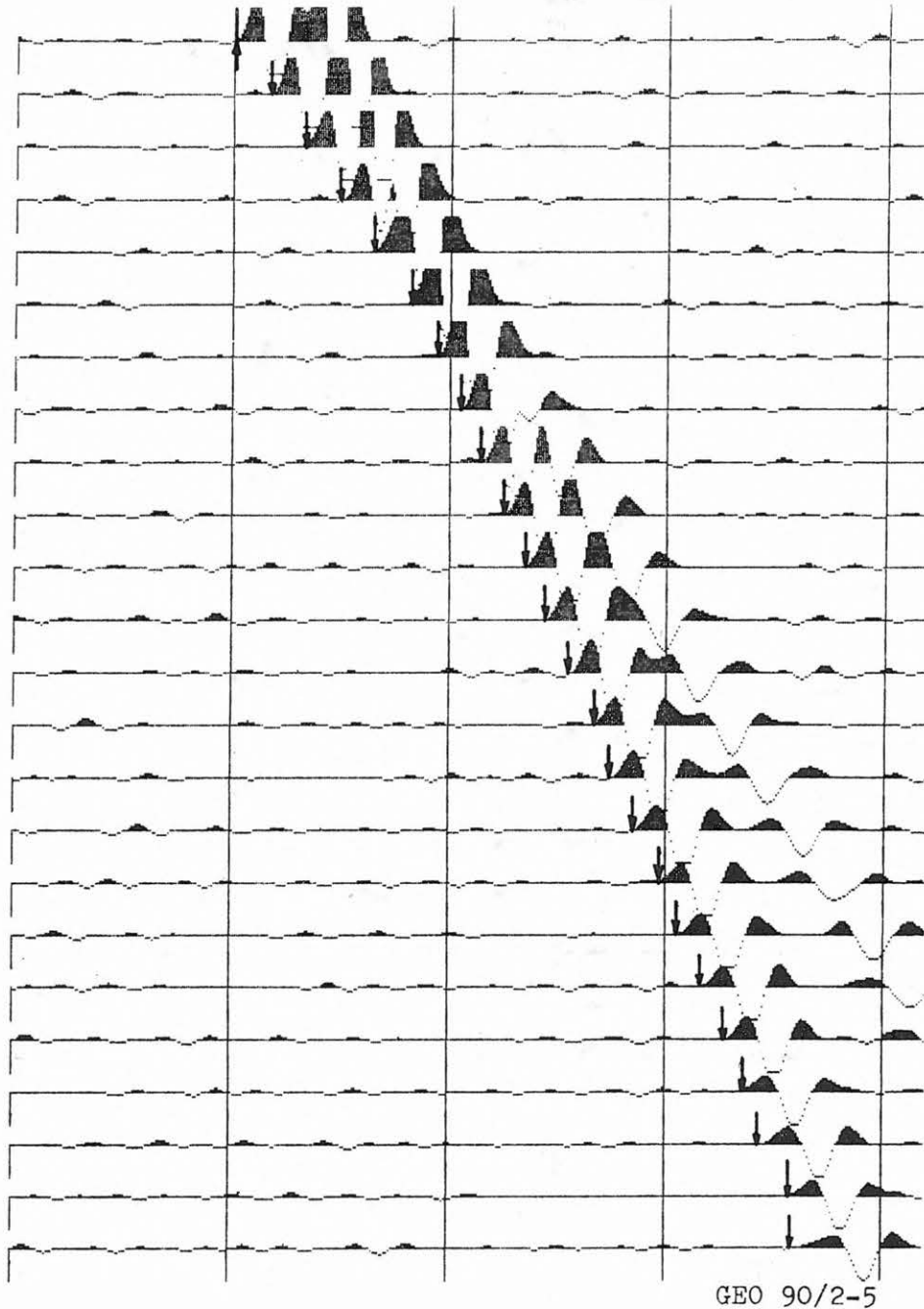
öt követő különbség nagysága, valamint a két rákövetkező, 90%-nál kisebb valószínűségű.

2. Ellenőrizzük a jel alakját is. Elfogadjuk a mintát, ha a rákövetkező négy minta különbsége azonos előjelű, azaz a sorozat vagy szigorúan monoton növekvő, vagy fogyó. Így elkerülhetjük az esetleges tüskék helyének kijelölését.

3. Megvizsgáljuk, hogy a feltételezett jel erősödik-e. Összehasonlítjuk a vizsgált mintát követő

négy minta szórását a fél periódussal későbbi négy minta szórásával. Sekélyrefrakciós méréseknél a periódusidő 10 msec-nek becsülhető. Megfelel a mintánk, ha a második négy minta szórása nagyobb az elsőnél.

4. Végül megpróbáljuk megjósolni a minta értékét az előző minták értékéből. Ha ugyanis az adott mintára, valamint a rákövetkező kettőre számított jóslási hiba jelentősen különbözik a



5. ábra. Hatherly módszerével bejelölt első beérkezések gyenge zajjal terhelt műzeizmogramon. A legtöbb csatornán megfelelnek kézzel bejelölt első beérkezéseknek, de előfordulnak kisebb eltérések

Рис. 5. Первые вступления, выявленные по методу Hatherly, на синтетической сейсмограмме, нагруженной слабым шумом. В большинстве каналов они совпадают с первыми вступлениями, указанными вручную, иногда возможны небольшие расхождения

Fig. 5. First arrivals picked by using the method proposed by Hatherly on synthetic seismogram obtained by adding low-amplitude noise. On most channels they can be accepted as manually picked ones, but slips also can be observed

1. táblázat (az 5. ábrához)

Az adatok a mintavételi pontszámokat adják meg. Mintavételi távolság: 0,5 ms

Table 1. (to Fig. 5.)

Numbers are representing sample points. Sampling interval 0,5 ms.

Таблица 1. (Цифровые данные к рис. 5.)

Указаны номера точек дискретизации. Шаг дискретизации: 0,5 мс.

Csatorna	Jel kezdete	Első beérkezés	Különbség
1	102	102,3	0,3
2	117	118,2	1,2
3	133	134,2	1,2
4	149	150,2	1,2
5	165	166,2	1,2
6	181	183,2	2,2
7 ^a	194	195,2	1,2
8	205	206,2	1,2
9	214	215,2	1,2
10	225	226,2	1,2
11	235	236,2	1,2
12	245	245,2	0,2
13	255	256,2	1,2
14	266	268,2	2,2
15	276	275,2	-0,8
16	286	286,2	0,2
17	296	298,2	2,2
18	306	306,2	0,2
19	316	317,2	1,2
20	327	328,2	1,2
21	336	337,2	1,2
22	347	344,2	-2,8
23	357	358,2	1,2
24	367	359,2	-7,8

megelőző mintákra kapott jóslási hibáktól, úgy már egészen biztosak lehetünk abban, hogy a vizsgált minta a keresett szeizmikus jel első szignifikáns eleme.

A cikk írója viszont nem közölte, hogy mit tekinthetünk szignifikáns jóslási hibának. Kézenfekvőnek látszik felhasználni az összes korábbi pontra számított jóslási hibát, s például ezen értékek szórásához viszonyítani az adott mintára számított jóslási hibát. Persze így a 4. próbát minden pontra el kell végezni. Látható továbbá az is, hogy a jel domináns hullámhossza és a mintavételi távolság aránya határozza meg azt, hogy a fenti próbák teljesülését hány egymást követő pontra kívánjuk meg. Beállításukat empirikusan is meg lehet oldani, de célszerű lehet az automatikus beállítás lehetőségét is megvizsgálni.

Ezen megfontolások és különböző szeizmogramokon végzett próba futások alapján a következő módon alakítottam át a fenti algoritmust:

1. Első lépésként meghatároztam a vizsgált pontra a jóslási hibát, s azon ponttól kezdve ahonnan már megfelelően megbízhatóvá válik a jóslás (ez az általam használt szűrőnél a negyvenedik pont környéke), összehasonlítottam a korábbi pontokra számított hibák szórásával. Amennyiben három egymást követő pontra a jóslott és a valódi érték különbsége meghaladta a korábbi különbségek szórásának háromszorosát, úgy közülük az elsőt vizsgáltam tovább.

2. Ezután végeztem el a jelalak fent már leírt vizsgálatát a monotonitás szempontjából.

3. Következett annak vizsgálata, hogy megelőzően erősödik-e a feltételezett jel.

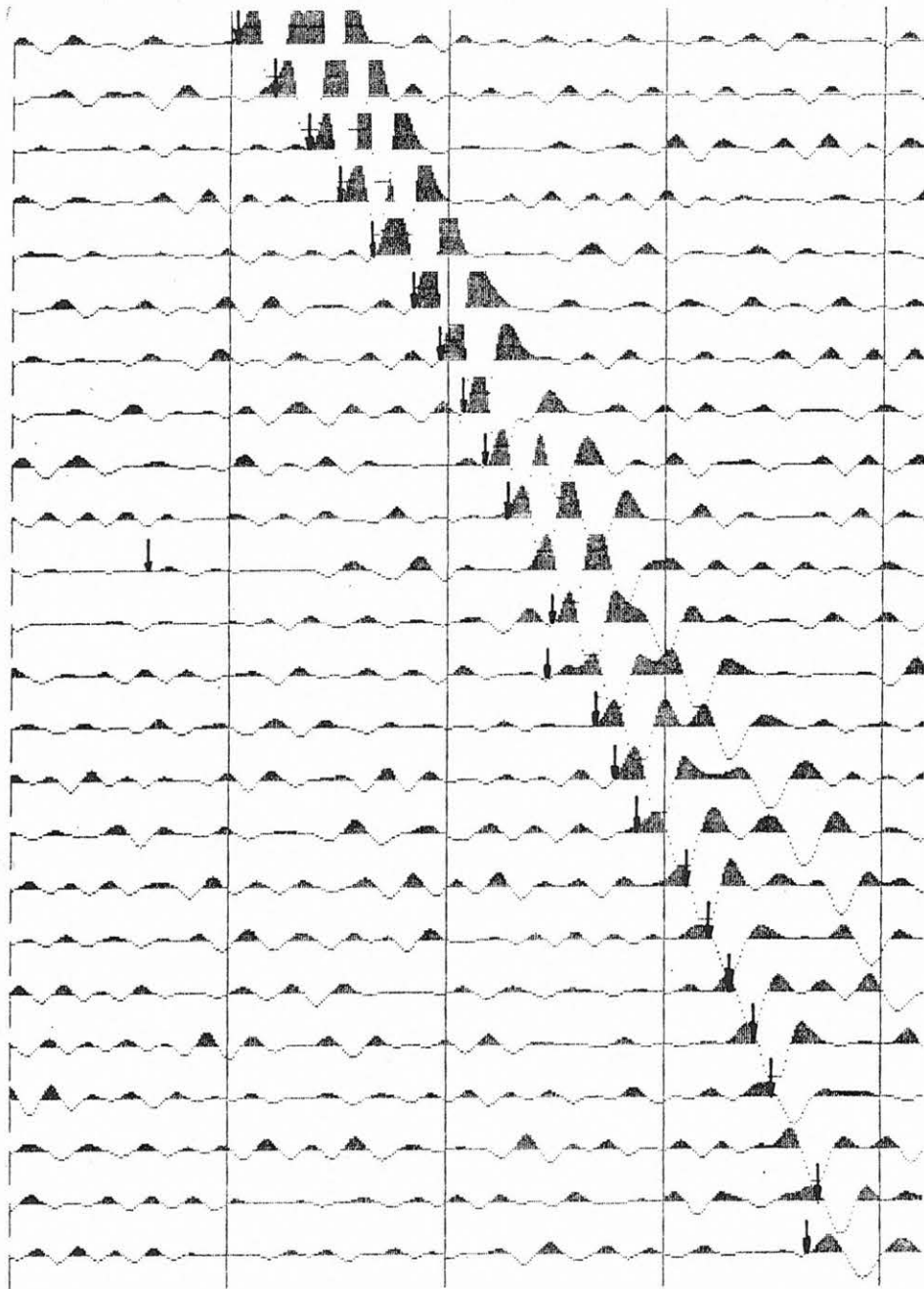
4. Végül megvizsgáltam azt, hogy a kiválasztott pontot követő néhány minta különbségének abszolút értéke meghaladja-e a korábbiak szórását. Így lehetett elkerülni, hogy valamilyen kisebb waveletszerű zavar végét fogjuk meg, ahol szintén megnő a jóslási hiba értéke.

5. Ha így már talált a gép egy olyan hullám-alakot, mely kielégítette a kívánalmakat, megpróbáltam megkeresni a jel elejét, hisz az eddigiek alapján meghatározott nagy jóslási hibájú minta már sokadik pontja lehet a jelnek. Ezt szintén a jóslási hibák alapján végeztem, visszafelé haladva megkeresve azt a pontot, ahol a hiba abszolút értéke először csökken a korábbi hibák egyszeres szórása alá.

Tömören értékelve az eljárást, azt mondhatjuk, hogy jó jel/zaj arány esetén általában megfelelő. Az 5. és a 6. ábra, illetve a hozzájuk tartozó 1. és 2. táblázat egy gyenge, és egy erős zajjal terhelt műszeizmogramon mutatja be a kijelölt első beérkezéseket. Mint látható, egyrészt az algoritmus pontossága valamivel kisebb Gelchinsky később ismertető módszerénél (ez a „csúszkálás” figyelhető meg az 5. ábrán és az ugyanazon műszeizmogram kijelölt és tényleges első beérkezéseit tartalmazó 1. táblázaton), másrészt viszonylag gyakran előfordul a gyengébb jelek detektálásánál ciklusugrás, sőt egyes alkalmakkor teljesen hamis jelet fog. Ez utóbbi általában akkor következik be, ha a vizsgált csatorna eleje igen csendes — így kicsi a jóslási hibák szórása —, és ha e szakasz után egy wavelet-szerű, kis amplitúdójú szeizmikus zaj jelentkezik, amit a 2—4. lépésben leírt vizsgálatokkal sajnos nem lehet kiszűrni, mert

domináns periódusa hasonló a jeléhez. Különösen bonyolult a probléma megoldása, ha egyazon szeizmogram feldolgozásakor egyes csatornákon a korai zajt detektálja jelként a módszer — azaz a jel kritériumainak szigorítása lenne célszerű —,

míg más csatornákon ciklusugrás fordul elő — aminek kiküszöbölésére a jel kritériumainak enyhítésére lenne szükség. Ilyen példát mutat be a 6. ábra: az erős zajjal terhelt műszeizmogram 11. és 13. csatornáján a jel előtti nem túl nagy ampli-



GEO 90/2-6

6. ábra. Hatherly módszerével bejelölt első beérkezések erős zajjal terhelt műszeizmogramon. Megfigyelhető a bejelölések „elcsúszása” a jel/zaj arány csökkenésével, és a jel elejére települt zaj erősen zavaró hatása

Рис. 6. Первые вступления, выявленные по методу Hatherly, на синтетической сейсмограмме, нагруженной сильным шумом. Видна дислокация маркировки при снижении отношения сигнал/шум и отрицательное влияние шума, появляющегося в начале сигнала

Fig. 6. First arrivals picked by using the method proposed by Hatherly on synthetic seismogram obtained by adding high-amplitude noise. The method is slipping with the decrease of the signal-to-noise ratio, and the disturbing effect of the noise located at the beginning of the signal can be observed

2. táblázat (a 6. ábrához)

Az adatok a mintavételi pontszámokat adják meg. Mintavételi távolság: 0,5 ms

Table 2. (to Fig. 6.)

Numbers are representing sample points. Sampling interval 0,5 ms.

Таблица 2. (Цифровые данные к рис. 6.)

Указаны номера точек дискретизации. Шаг дискретизации: 0,5 мс.

Csatorna	Jel kezdete	Első beérkezés	Különbség
1	102	105,0	3,0
2	117	121,0	4,0
3	133	138,0	5,0
4	149	152,0	3,0
5	165	167,0	2,0
6	181	186,0	5,0
7	194	198,0	4,0
8	205	209,0	4,0
9	214	219,0	5,0
10	225	229,0	4,0
11	235	64,9	-170,1
12	245	250,0	5,0
13	255	248,0	-7,0
14	266	270,0	4,0
15	276	279,0	3,0
16	286	289,0	3,0
17	296	312,0	16,0
18	306	322,0	16,0
19	316	332,0	16,0
20	327	343,0	16,0
21	336	351,0	15,0
22	347	-3,5	350,5
23	357	373,0	16,0
24	367	368,0	1,0

túdójú zajt már jelként fogadta el az algoritmus, míg a 17.—21. és 23. csatornán átugrotta az első fél periódust, a 22. csatornán pedig egyáltalán nem talált általa elfogadhatónak ítélt jelet.

Látható, hogy e módszer is, hasonlóan az előző fejezetben ismertetethez, nem is annyira a zaj nagyságára, mint annak csatornán belüli elhelyezkedésére érzékeny. Hátránya még, hogy ha zaj telepedik a jel elejére, úgy nem tudja a zajon belül meglátni a jel kezdetét; továbbá nem elhanyagolható nagy időigényessége sem: adott mennyiségű csatorna feldolgozásához hozzávetőlegesen ötször annyi idő szükséges mint *Gelchinsky* módszerével.

A terepi felvételek feldolgozása során nyert tapasztalatokat később ismertetem.

Gelchinsky és Shtivelman módszere

Gelchinsky és Shtivelman (1983) egy — az előzőekben ismertetett első beérkezést kijelölő algoritmusoktól eltérő — módszert javasol. Véleményük szerint *Hatherly (1982)*, az előző fejezetben ismertetett eljárásának legnagyobb hátránya az, hogy mindig csak egy csatornát vizsgál, s így nem használja ki a szeizmikus jel egy igen fontos tulajdonságát, a szomszédos csatornákon regisztrált jelalakok korrelációját. Bár *Hatherly* módszere bizonyos esetekben jó eredményt szolgáltat, és szerzője sikeres gyakorlati alkalmazásáról is számot adott, úgy tűnik, hogy algoritmusuk csak viszonylag nagy jel/zaj arány esetén működik megbízhatóan. *Gelchinsky* ezen megállapításait saját eredményeim is alátámasztották.

Léteznek ugyan más módszerek, korábban publikált algoritmusok, melyek koherencia, illetve

keresztkorrelációs vizsgálatokat használnak fel, ⁵ alapjuk az a feltételezés, hogy a szomszédos csatornákon regisztrált jelek alakja nem változik lényegesen. Azonban a terepi felvételek ezt a feltételezést jól láthatóan nem támasztják alá.

A fentiek alapján *Gelchinsky és Shtivelman* olyan módszert javasol megoldásként, mely nem követeli meg a jelalakok változatlanságát, de a jelek korreláltságát kihasználva, bizonyos statisztikai kritériumokat figyelembe véve határozza meg a jel beérkezésének idejét.

Az eljárás három fő lépésből áll:

1. a zajok korrelációjának elrontása,
2. studentogramok számítása,
3. az egy bizonyos értéket meghaladó studentogramok közül a legkisebb időértékhez tartozónak a megkeresése; ez az időérték lesz az adott csatornán meghatározott első beérkezés ideje.

Az első beérkezések meghatározásánál a legnagyobb nehézséget a regisztrált zajok okozzák. Egyrészt akkor, ha kicsi a jel/zaj arány (Különösen a távoli csatornákon fordulhat elő, hogy a zaj amplitúdója akár meg is haladhatja a jel amplitúdóját), másrészt a terepi regisztrátumok elemzése azt mutatta, hogy rövid intervallumokon a szomszédos csatornákon regisztrált zaj igen nagy korreláltságot is mutathat, ami mindegyik eddig használatos algoritmus esetén jelentős hibák forrása is lehet.

Az első lépés feladata a zajok esetleges korrelációjának megzavarása az amplitúdók megváltoztatásával. Ez a következő módon történik: minden csatornán meghatároztunk egy olyan időablakot, melyben biztos, hogy csak zajt regisztráltunk.

Ezután kiszámítjuk az alábbi, a regisztrált zaj mértékét jellemző U értéket:

$$U = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j$$

ahol

n a csatornák száma,

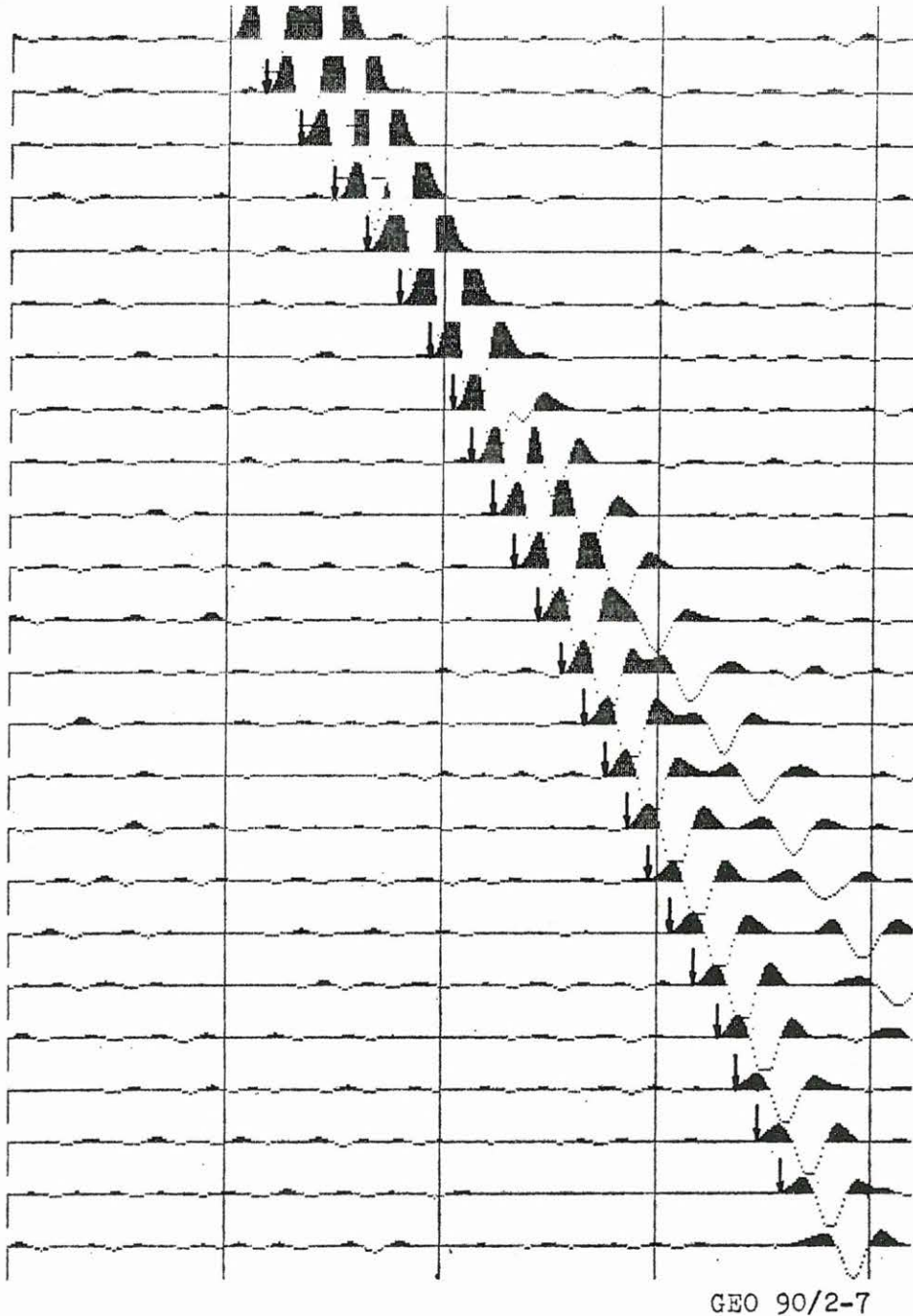
u_j pedig a j csatornán az ablakon belüli leg-

nagyobb abszolút értékű minta abszolút értéke.

Ezután bevezetve az $S(x)$ lépcsőfüggvényt,

$$S(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

Az alábbi hozzárendelési utasítás alapján olyan új szeizmogramot készítünk, melyen jelentős mértékben csökken a zaj energiája, s vele együtt a



7. ábra. Gelchinsky és Shtivelman módszerével bejelölt első beérkezések gyenge zajjal terhelt műszeizmogramon. A bejelölések konzekvensek, egyiket sem lehet érdemben megkérdőjelezni

Рис. 7. Первые вступления выявленные методом Гелчинский—Штивелман на синтетической сейсмограмме, нагруженной слабым шумом. Маркировка уверенная, места маркировки по существу бесспорны.

Fig. 7. First arrivals picked by using the method proposed by Gelchinsky and Shtivelman on synthetic seismogram obtained by adding low-amplitude noise. The picks are practically undeniable

3. táblázat (a 7. ábrához)

Az adatok a mintavételi pontszámokat adják meg. Mintavételi távolság: 0,5 ms

Tablé 3. (to Fig. 7.)

Numbers are representing sample points. Sampling interval 0,5 ms

Таблица 3. (Цифровые данные к рис. 7.)

Указаны номера точек дискретизации. Шаг дискретизации: 0,5 мс.

Csatorna	Jel kezdete	Első beérkezés	Különbség
2	117	118	1
3	133	135	2
4	149	151	2
5	165	166	1
6	181	181	0
7	194	194	0
8	205	205	0
9	214	215	1
10	225	225	0
11	235	235	0
12	245	246	1
13	255	257	2
14	266	268	2
15	276	278	2
16	286	288	2
17	296	299	3
18	306	309	3
19	316	318	2
20	327	329	2
21	336	339	3
22	347	349	2
23	357	360	3

szomszédos csatornákon regisztrált zaj esetleges korrelációja is:

$$Y'_{i,n} = Y_{i,n} S(|Y_{i,n}| - \alpha U)$$

ahol

$y_{i,n}$ a szeizmogram n csatorna i pontjára vett minta értéke,

$y_{i,n}$ az új szeizmogram n csatorna i pontján a minta értéke,

α pedig a zajszintet meghatározó, általunk választott érték (általában 1 és 2 között).

Az algoritmus következő lépéseként az egyes pontokra kiszámítjuk azt a $W(j,k)$ *studentogramnak* nevezett értéket, mely a következő megfontolások alapján a döntés alapjául szolgál.

Az eljárás szempontjából, refrakciós mérések-nél, jó közelítéssel feltételezhetjük, hogy három szomszédos csatornát figyelve az első beérkezések menetidő görbéje egyenessel közelíthető. Tehát amennyivel korábban jelent meg a jel a vizsgált csatornát megelőző csatornán, annyival később jelenik meg a következőn. egy célszerű adott pont értékét a szomszédos két csatornán megfelelő időkülönbséggel regisztrált két pont értékéhez hasonlítani. Legyen $W(j,k)$ az adott csatorna j pontjára (a szomszédos csatornák $j-k$, illetve $j+k$ pontja segítségével) meghatározott érték, a három pontbeli y' átlagának és szórásának hányadosa. A feladat ezen $W(j,k)$ értékek kiszámítása adott csatornára, minden, a mérési elrendezés ismeretében, szóba jöhető pontra és csatornák közötti k időtolásra.

Könnyen belátható, hogy az így kiszámított $W(j,k)$ értéke a jel beérkezését követő pontokban, megfelelő k időtolással számolva, lényegesen nagyobb, mint a beérkezés előtt. Tehát megkeresve a vizsgált csatornán azt a legkisebb j pontot, melyre $W(j,k)$ értéke meghalad egy elvi megfontolások alapján, statisztikailag meghatározott szintet, tekinthetjük azt az adott csatornán a jel első pontjának. Ezen legkisebb j értéknek megkeresése az eljárás harmadik lépése.

Mindhárom módszer közül ez volt az, amellyel a vizsgált műszeizmogramokon a legújabb eredményeket sikerült elérni. Ez nagyon jól látható mind a műszeizmogramokon, mind a terepi felvételek feldolgozásánál. A 7. és 8. ábrán látható két műszeizmogram és a hozzájuk tartozó 3. és 4. táblázatban figyelhető meg az első beérkezések detektálásának — még erős zaj esetén is — nagyfokú pontossága, mely a legalább közepes minőségű felvételek esetén vetekszik egy gyakorlati kiértékelő pontosságával. Ezt általában még a közvetlenül a jel elejére települt waveletszerű zaj sem tudja jelentős mértékben befolyásolni.

Problémát csak a zajküszöböt meghatározó α érték megválasztása okoz, de $\alpha=2$ értékkel még igen zajos felvétel esetén is általában jól működött a módszer.

Egyetlen komolyabb hátrányként az említhető meg, hogy az algoritmusból kifolyólag az első és az utolsó csatornán nem jelöljük ki a beérkezéseket, de ez a feladat más úton, például extrapolációval, megfelelő pontossággal megoldható.

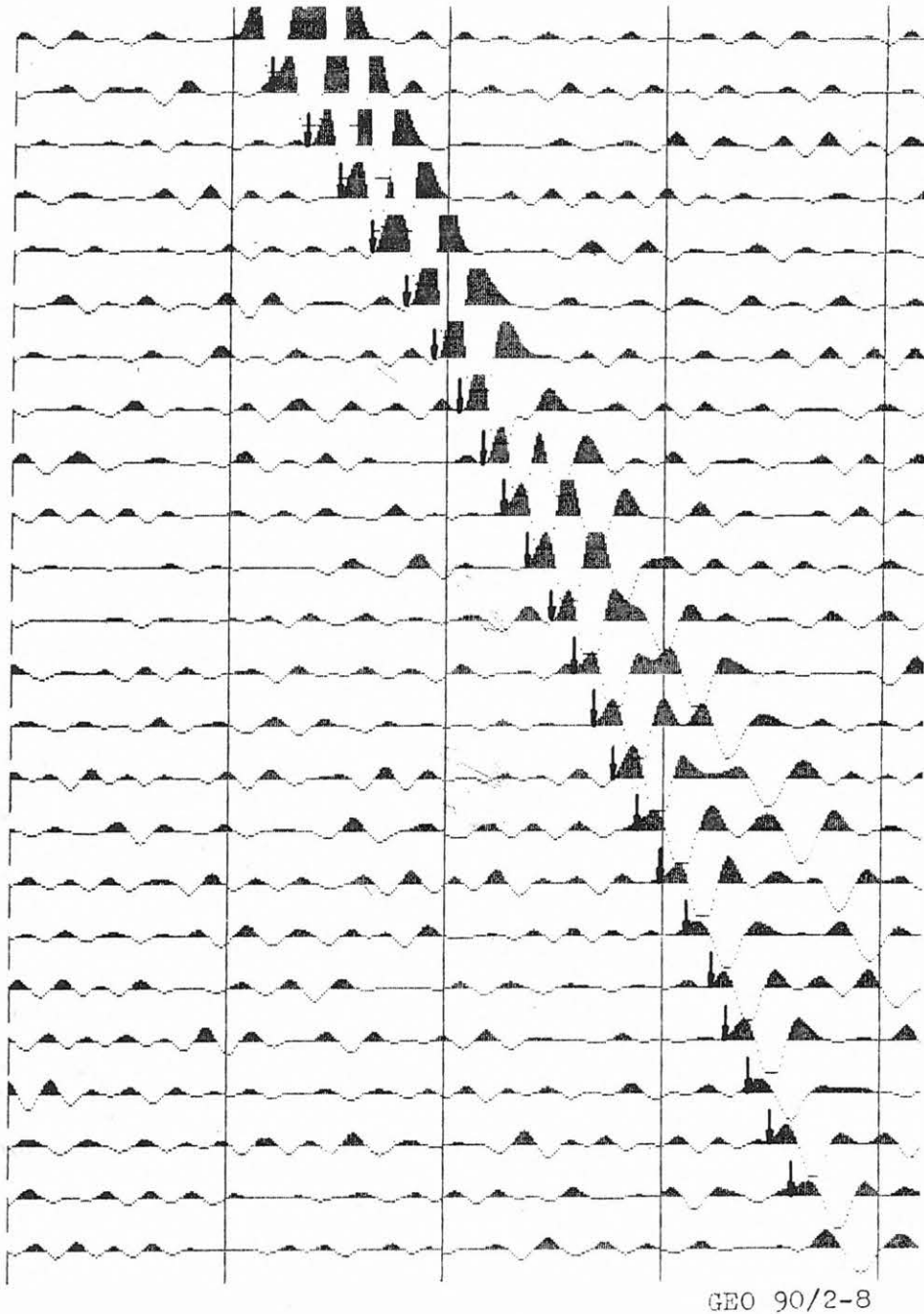
A terepi felvételek feldolgozásáról a következő fejezetben számolok be, ahol rögtön össze tudom

vetni *Gelchinsky* és *Hatherly* módszerének hatékonyságát.

Terepi mérések feldolgozásának tapasztalatai

Az előzőekben bemutatott három elvileg különböző, első beérkezéseket kijelölő módszer közül az

utóbbi kettő *Hatherly* (1982), és *Gelchinsky—Shtivelman* (1983) eredményei bizonyultak megfelelő pontosságúaknak a további vizsgálatokhoz. Ezen fejezetben e két módszer terepi mérések feldolgozásánál kapott eredményeit hasonlítom össze. A kísérleti anyagot kisrefrakciós mérések regisztratúmaival szolgáltatták.



8. ábra. *Gelchinsky* és *Shtivelman* módszerével bejelölt első beérkezések erős zajjal terhelt műszeizmogramon. Jól megfigyelhető, hogy a bejelölések gyakorlatilag nem csúszkálnak, még a közvetlenül a jel elejére rátelepült zajokba is „belelát” e módszer

Рис. 8. Первые вступления, выявленные методом *Gelchinsky—Shtivelman*, на синтетической сейсмограмме, нагруженной сильным шумом. Хорошо видно, что дислокация маркировки практически не наблюдается; более того, этот метод обнаруживает и тот сигнал, на начало которого наложился шум

Fig. 8. First arrivals picked by using the method proposed by *Gelchinsky* and *Shtivelman* on synthetic seismogram obtained by adding high-amplitude noise. No slip can be observed, the method effectively recognizes the signals covered by noise

4. táblázat (a 8. ábrához)

Az adatok a mintavételi pontszámokat adják meg. Mintavételi távolság: 0,5 ms

Table 5. (to Fig. 8.)

Numbers are representing sample points. Sampling interval 0,5 ms.

Таблица 4. (Цифровые данные к рис. 8.)

Указаны номера точек дискретизации. Шаг дискретизации: 0,5 мс.

Csatorna	Jel kezdete	Első beérkezés	Különbség
2	117	119	2
3	133	136	3
4	149	151	2
5	165	166	1
6	181	182	1
7	194	195	1
8	205	207	2
9	214	218	4
10	225	227	2
11	235	238	3
12	245	249	4
13	255	260	5
14	266	269	3
15	276	278	2
16	286	289	3
17	296	300	4
18	306	312	6
19	316	324	8
20	327	331	4
21	336	344	5
22	347	351	4
23	357	361	4

A 9., 10. és 11. ábrákon jól megfigyelhetőek e két különböző algoritmus alkalmazásának előnyei és hátrányai. A *Gelchinsky* és *Shtivelman* módszerével bejelölt idők megfelelő pontosságúaknak tűnnek: a három felvétel egyikén sem található szembeötlő hiba, nem fordul elő ciklusugrás és sehol sem állítható biztonsággal, hogy a kézi kiértékelés pontosabb lenne. Hátránya viszont, hogy a két szélső csatornán nem szolgáltat eredményt. Ezzel szemben *Hatherly* módszerével viszonylag gyakran nem találunk elfogadható jelet (például a 11. ábrán ez három csatornán is megfigyelhető), előfordul ciklusugrás és mint azt a műszeizmogramokon is látni lehetett, igen érzékeny a jel elejére rátelepedő zajra. Ennek következménye a kijelölt idők *csúszkálása*, ami már a műszeizmogramokon is látható volt, itt pedig a 11. ábrán leginkább szembeötlő. Ezzel a gonddal szemben *Gelchinsky* módszere gyakorlatilag teljesen érzékelten.

A 12. és a 13. ábra két nehéz esetet mutat be: A 12. ábra utolsó csatornáin megfigyelhető, hogy a közvetlenül a beérkezés előtt megjelenő, azzal összemérhető amplitúdójú, a szomszédos csatornákon jó korrelációt mutató zaj esetén *Gelchinsky* módszere is tehetetlen, és mint várható volt, ilyen esetekben *Hatherly* algoritmus is vezet eredményre. A 13. ábrán viszont nem a zaj, hanem a jel okoz problémát. Az igen kis offset miatt a közeli csatornákon túl erős a bejövő jel, ami nagy erősítés esetén *áthallatszik* a többi csatornára is. Ezért az észlelő, éppen az első beérkezések kijelölésének megkönnyítésére, az első öt csatornán a többihez képest kisebb erősítést állított be. Ennek következményeként változott a regisztrált jelalak, s így az első hat csatornán igen nagy az első

beérkezés kijelölésének hibája. Ebben az esetben megoldást jelenthetne például az erősítés értékeinek a regisztrátum fejlécébe történő beírása, vagy esetleg a különböző csatornák energia szerinti normálása.

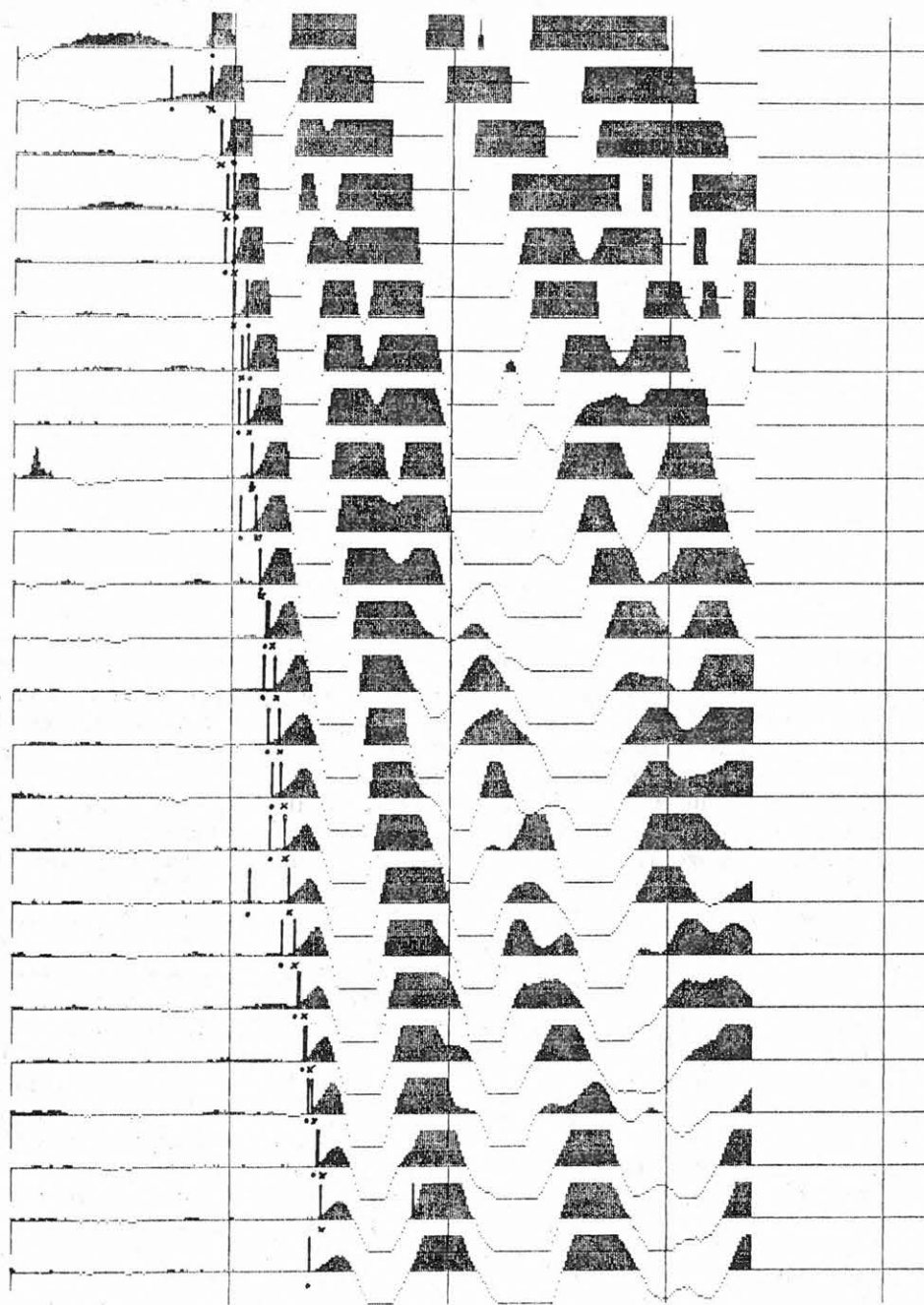
Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy legcélszerűbb *Gelchinsky* és *Shtivelman* (1983) által leírt algoritmus használata, mivel pontossága igen jó, míg *Hatherly* (1982), és különösen *Coppens* (1985) módszerénél a jel/zaj arány csökkenésével jelentős hibák fordulhatnak elő. *Gelchinsky* és *Shtivelman* algoritmusának egyetlen komolyabb hiányossága a másik kettővel szemben az, hogy három csatornát vizsgál egyszerre, így a felvétel első és utolsó csatornáján nem működik. Ez viszont — gyakorlati esetekben megfelelő pontossággal, — extrapolációval áthidalható. Azokban az esetekben viszont, amikor nagymennyiségű, kis csatornaszámú, nagy jel/zaj arányú csatornát tartalmazó felvételt kell feldolgozni, érdemesebb *Hatherly* (1982) módszerét alkalmazni, mely ugyan lassúbb *Gelchinsky*-énél, de egyszerre csak egy csatornát vizsgál.

Ahhoz, hogy rutinszerűen lehessen alkalmazni az első beérkezést meghatározó programot, feltétlenül szükségesnek látszik, hogy a mérés leglényegesebb adatai (terítési rendszer, geofonköz, robbantópont helye, esetleg a szintezési adatok) is megtalálhatók legyenek a regisztrátum fejlécében. Ezeket az információkat felhasználva lényegesen növelhető mind *Gelchinsky* és *Shtivelman*, mind *Hatherly* algoritmusának pontossága. Miután még a szinte minden esetben jól működő *Gelchinsky*-féle algoritmus is bizonyos esetekben hibás eredményt adhat egy-egy csatornán, ezért jelenleg

szükséges, hogy a kiértékelő egy pillantással ellenőrizze az eredményeket.

A program továbbfejlesztésének egyik gyümölcsözőnek ígérkező útja a három algoritmus kombi-

nációja: Coppens módszere jól használható a beérkezések idejének durva meghatározására, azaz a keresőablakok kijelölésére; *Gelchinsky* és *Shtivelman* módszere a beérkezések idejének ablakon



GEO 90/2-9

9. ábra. Hatherly (.), illetve Gelchinsky és Shtivelman (x) módszerével bejelölt első beérkezések terepi felvételen. Megfigyelhető Gelchinsky és Shtivelman módszerének kielégítő pontossága, és Hatherly módszerének gyakori bizonytalankodása

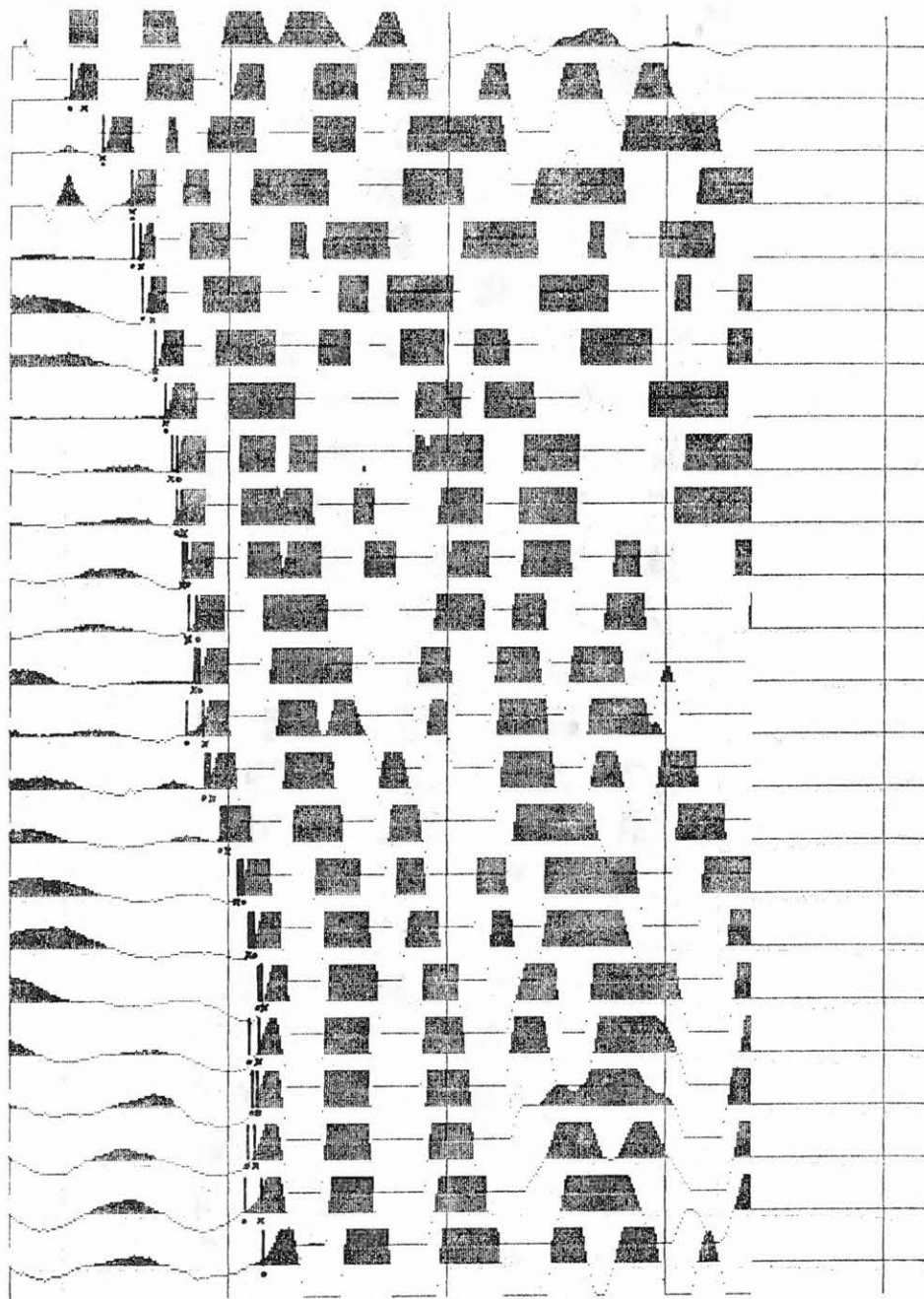
Рис. 9. Первые вступления, выявленные методами Hatherly (.) и Gelchinsky—Shtivelman (x), на полевой сейсмограмме. Отмечается достаточная точность метода Gelchinsky—Shtivelman, а также частая недостоверность метода Hatherly

Fig. 9. First arrivals picked by the methods proposed by Hatherly (.) and by Gelchinsky and Shtivelman (x). The satisfactory accuracy of the latter and the not sufficient reliability of the former can be observed

belüli pontosabb meghatározására; míg *Hatherly* módszeréből az alakellenőrzés használható fel az esetleges eltérések elkerülésére.

Végezetül ezúton is szeretnék köszönetet mon-

dani *Hermann Lászlónak*, aki konzulensként tanácsaival és észrevételeivel nagy segítséget nyújtott az ezen cikk alapjául szolgáló szakdolgozatom elkészítéséhez.



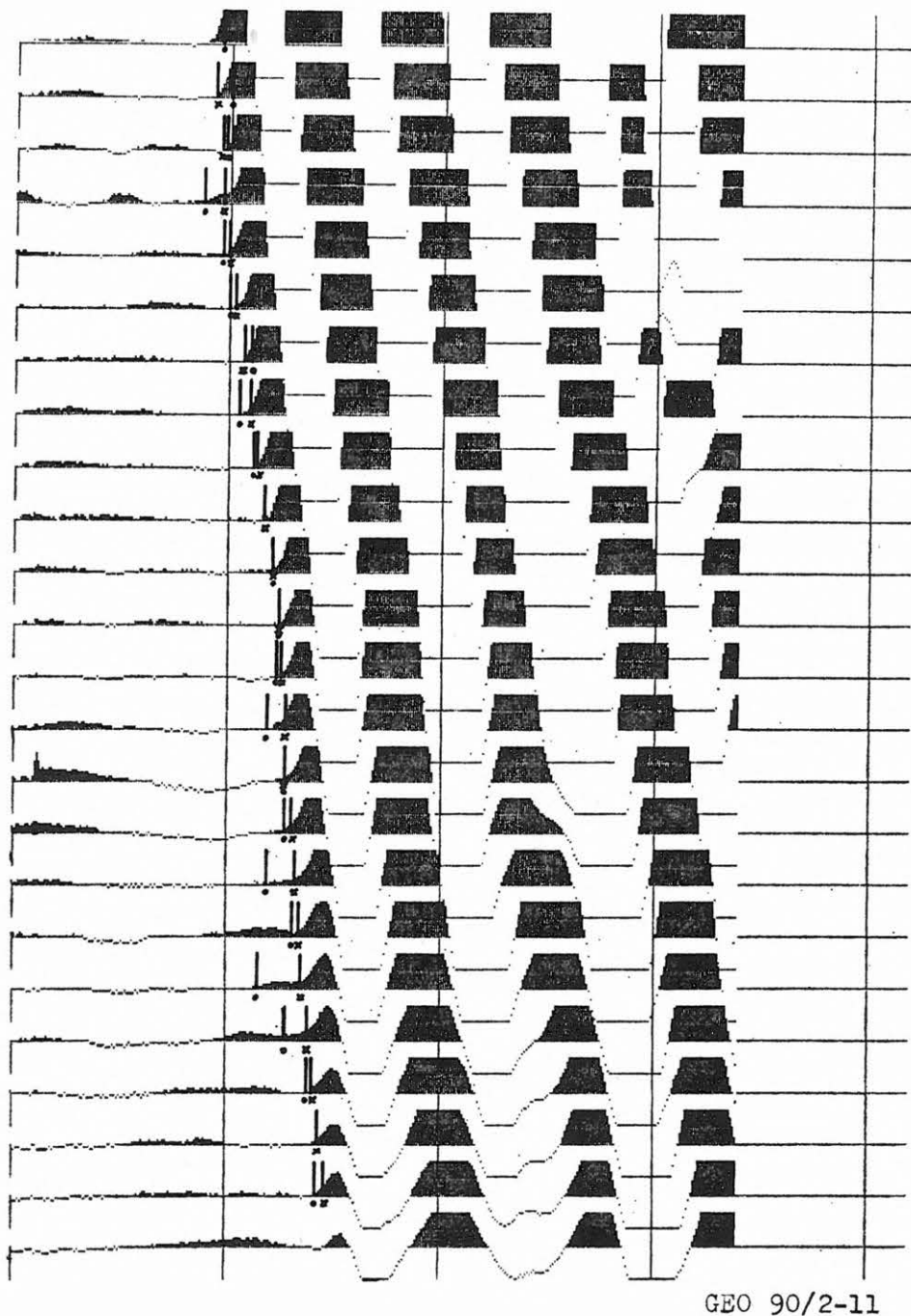
GEO 90/2-10

10. ábra. Hatherly (.), illetve Gelchinsky és Shtivelman (x) módszerével bejelölt első beérkezések terepi felvételen. Látható, hogy a „szabálytalan” menetidőgörbe egyik módszer működését sem befolyásolja

Рис. 10. Первые вступления, выявленные методами Hatherly (.) и Gelchinsky—Shtivelman (x), на полевой сейсмограмме. Видно, что „нерегулярный” годограф не влияет на результаты, полученные этими методами

Fig. 10. First arrivals picked by the methods proposed by Hatherly (.) and by Gelchinsky and Shtivelman (x). Apparently, irregular traveltime curves are not affecting these methods

Coppens, F. 1985: First arrival picking on common-offset trace collection for automatic estimation of static corrections, *Geophysical Prospecting* 33, 1212—1231.



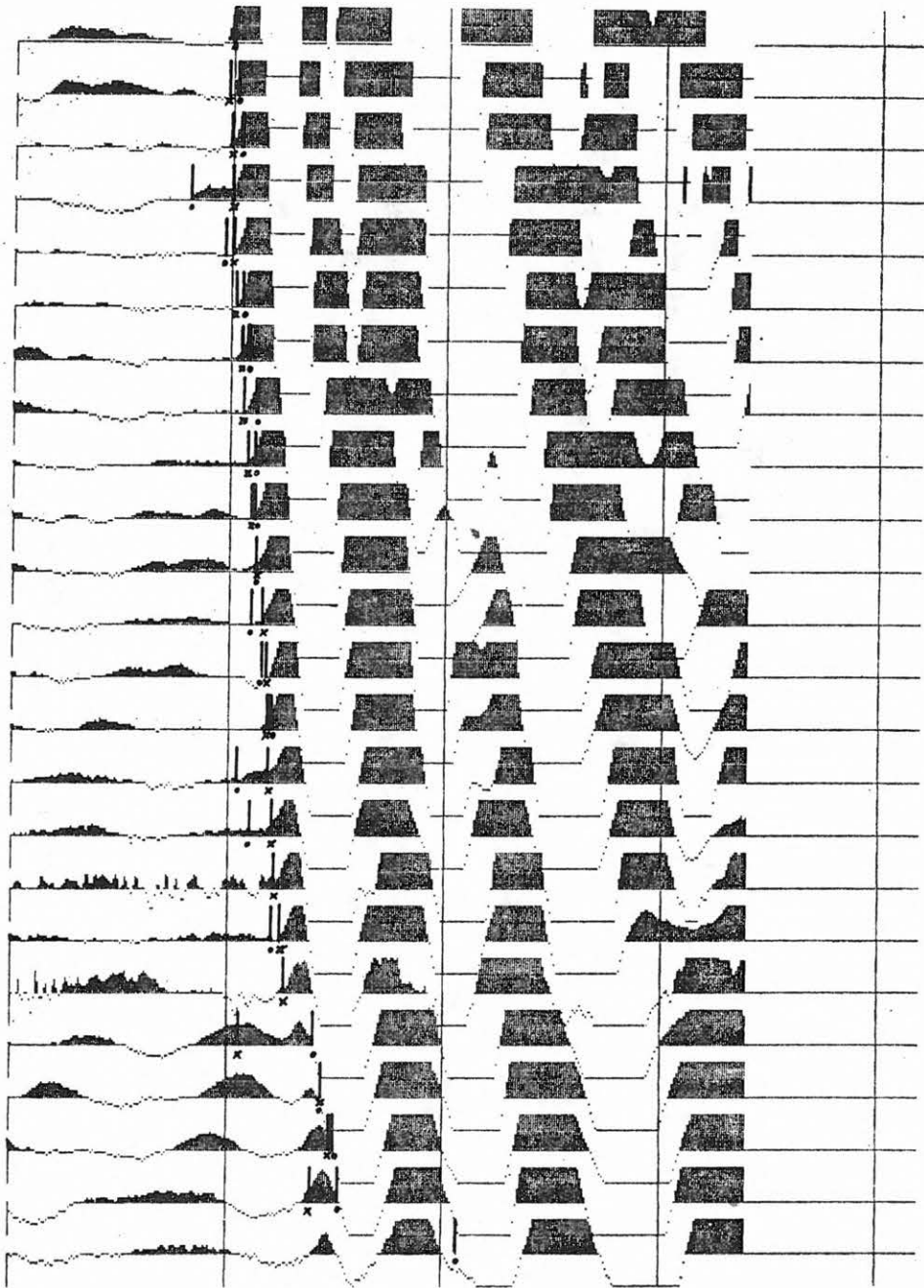
11. ábra. Hatherly (.), illetve Gelchinsky és Shtivelman (x) módszerével bejelölt első beérkezések terepi felvételen. A 14—20. csatornákon megfigyelhető, hogy a jel elejére „ráülő” zaj Hatherly módszerét erősen megzavarhatja, míg Gelchinskyét és Shtivelmanét érdemben nem befolyásolja

Рис. 11. Первые вступления, выявленные методами Hatherly (.) и Gelchinsky—Shtivelman (x), на полевой сейсмограмме. На каналах 14—20 видно, что шум наложившийся на начало сигнала, сильно мешает методу Hatherly, и практически не влияет на результаты, полученные методом Gelchinsky—Shtivelman

Fig. 11. First arrivals picked by the methods proposed by Hatherly (.) and by Gelchinsky and Shtivelman (x). The noise located at the beginning of the signal can seriously affect the accuracy of the former, while it has practically no influence on the results of the latter, as it can be observed on channels 14 to 20.

Hatherly, P. J. 1982: A Computer method for determining seismic first arrival times, *Geophysics* 47, 1431—1436.
 cker, N. 1953: The form and laws of propagation of Riseismic wavelets, *Geophysics* 18, 10—40.

Robinson, E. A. 1967: Multichannel time series analysis with digital computer programs, San Fransisco, Holden-Day

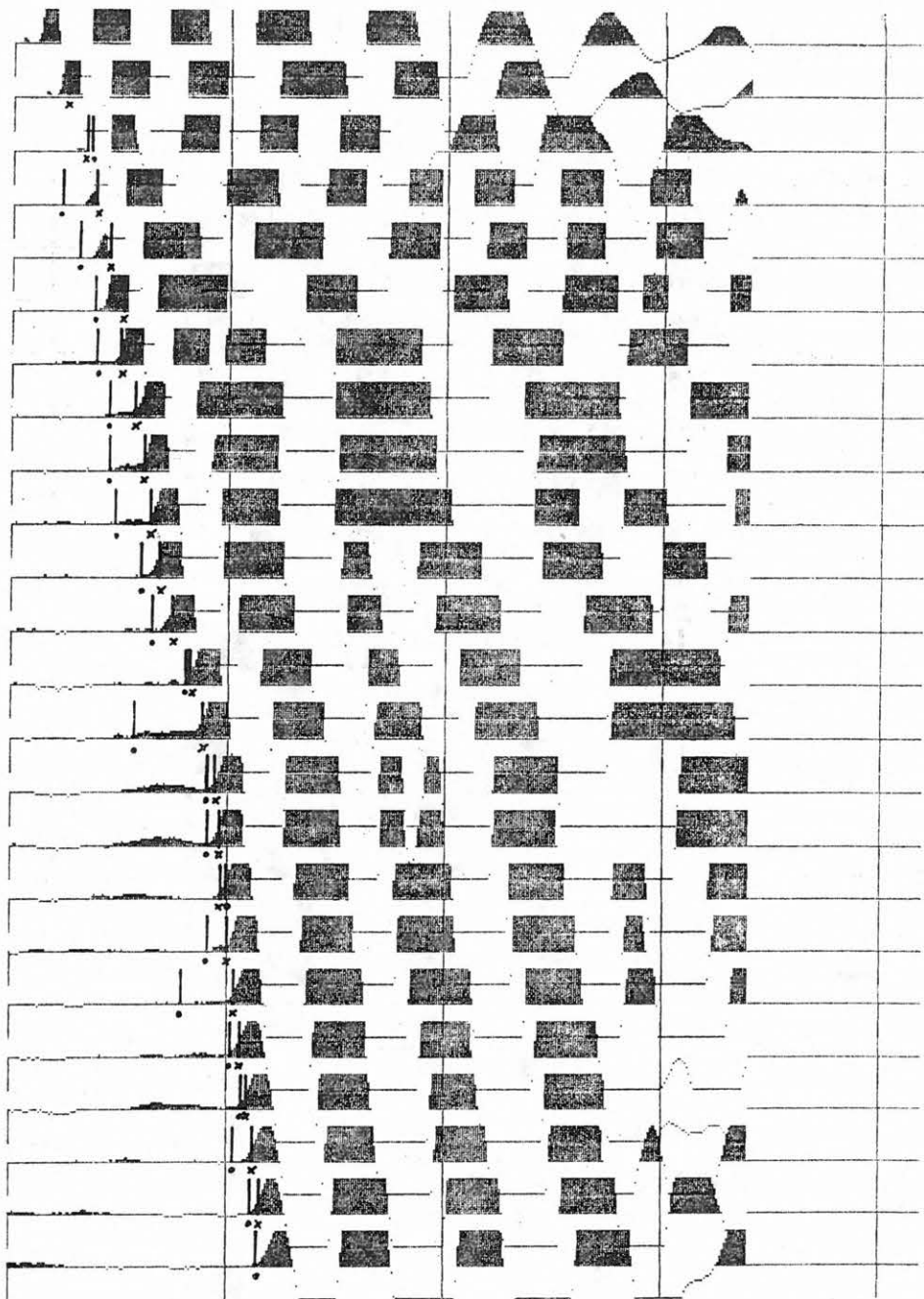


GEO 90/2-12

12. ábra. Hatherly (.), illetve Gelchinsky és Shtivelman (x) módszerével bejelölt első beérkezések terepi felvételen. A 20—22. csatornákon látható, hogy az alacsony frekvenciás, nagy amplitúdójú zajok Gelchinsky és Shtivelman módszerét is megzavarják

Рис. 12. Первые вступления, выявленные методами Hatherly (.) и Gelchinsky—Shtivelman (x), на полевой сейсмограмме. На каналах 20—22 видно, что шумы с низкой частотой и большой амплитудой мешают применению также и метода Gelchinsky—Shtivelman.

Fig. 12. First arrivals picked by the methods proposed by Hatherly (.) and by Gelchinsky and Shtivelman (x). Low-frequency and high-amplitude noise can affect also the latter and results in mispicks, as it can be observed on channels 20 to 22.



GEO 90/2-13

13. ábra. Hatherly (.), illetve Gelchinsky és Shtivelman (x) módszerével bejelölt első beérkezések terepi felvételen. Látható a robbantópont felőli csatornák különböző erősítésének zavaró hatása Gelchinsky és Shtivelman módszerére illetve a Hatherly módszerében alkalmazott jósló szűrő eltérése a „csendes” csatornákon megjelenő kis amplitúdójú zaj hatására

Рис. 13. Первые вступления, выявленные методами Hatherly (.) и Gelchinsky—Shtivelman (x), на полевой сейсмограмме. Видно, что различное усиление каналов на стороне точки взрыва отрицательно влияет на результативность метода Gelchinsky—Shtivelman; применение предсказывающего фильтра в методе Hatherly может дать ошибочные результаты на „спокойных” каналах даже под влиянием шума с малой амплитудой.

Fig. 13. First arrivals picked by the methods proposed by Hatherly (.) and by Gelchinsky and Shtivelman (x). Different gains used on shot-point-side channels affect the results of the latter; while the predictive filter used in the former can result in misspicks at low-amplitude noise on „quiet” channels