

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Kísérleti Fizika Tanszék

Pulzáló SRd csillagok vizsgálata

Diplomamunka

Kötél László
V. éves csillagász

Témavezető:
Dr. Szatmáry Károly
egyetemi docens

2007

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	2
2. Az AAVSO	5
3. Használt programok	6
3.1. Period04	6
3.2. WinWWZ	6
3.3. Origin	7
4. A vizsgálat	7
4.1. A vizsgálat kezdete	7
4.2. A vizsgálat folyamata	7
4.2.1. Fourier-transzformációs vizsgálatok	7
4.2.2. Wavelet vizsgálatok	13
4.3. A vizsgálat befejezése	16
5. Eredmények	16
5.1. AB Leonis	16
5.2. AG Aurigae	18
5.3. AV Cygni	18
5.4. BM Scorpii	21
5.5. DE Herculis	21
5.6. GT Orionis	26
5.7. LR Scorpii	26
5.8. ρ Cassiopeiae	33
5.9. RS Lacertae	35
5.10. RU Cephei	37
5.11. RW Cephei	37
5.12. RX Reticuli	42
5.13. SV Ursa Majoris	42
5.14. SX Herculis	42
5.15. TV Persei	45
5.16. TZ Cephei	51
5.17. UU Herculis	51
5.18. UY Canis Majoris	53
5.19. V441 Herculis	53
5.20. V509 Cassiopeiae	56
5.21. V564 Ophiuchi	56
5.22. V Pyxidis	59
5.23. W Leo Minoris	59
5.24. WY Andromedae	64
5.25. Z Aurigae	64
5.26. Konklúzió	67
6. Hivatkozások	77

1. Bevezető

A csillagászat egyik legrégebbi ága a változócsillagászat. Tény, hogy már az ókorban is figyeltek meg ún. nóvákat és szupernóvákat, valamint a középkorban, főleg az arabok, figyeltek bizonyos csillagok fényének változására. Európában az első "hivatalos" változócsillag felfedezése 1596 környékén történt, amikor a német teológus és csillagász Fabricius felfigyelt a Mira nevű csillag fénybeli változásaira. Innentől kezdve sorra fedezték fel a különböző változócsillagokat.

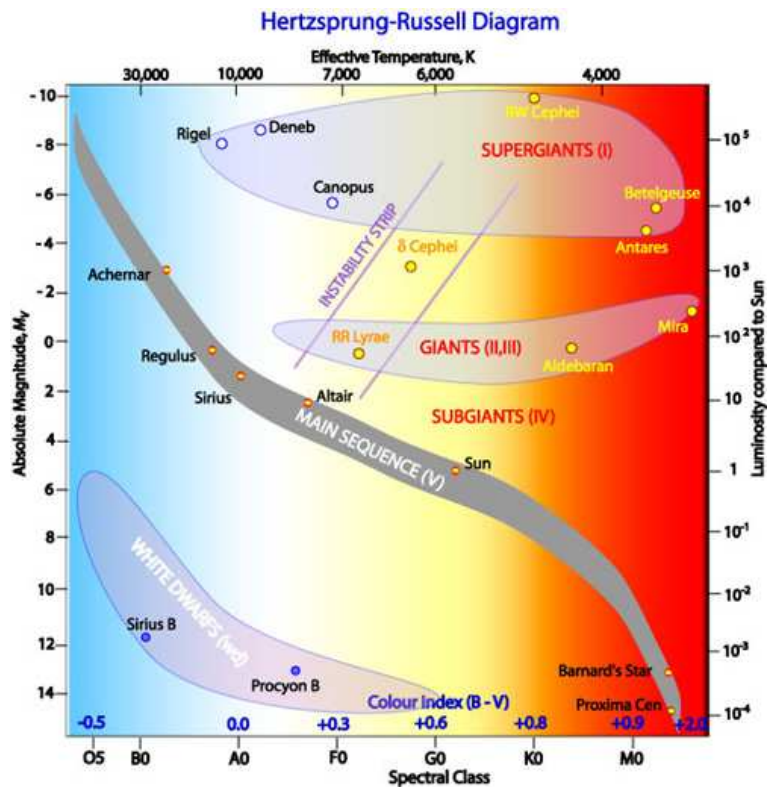
A csillagászok néhány évtized alatt rájöttek, hogy ezek a változó fényű csillagok különböző csoportokba sorolhatóak. Azonban a besorolás pontos fizikai hátterének megismerése csak a 20. században következett be. A változást létrehozó mechanizmus alapján a változócsillagokat 5 nagyobb típusba sorolják manapság (astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/valtozok.html):

1. Fedési változók: A fényváltozást az okozza, hogy a csillag egy kettős rendszerben kering, és időnként eltakarják egymást.
2. Pulzáló változók: Ezeknél a csillagoknál a csillag fizikai mérete is megváltozik, aminek okát később tárgyalom.
3. Rotáló változók: A rotáló változóknál a felszín egyes részei eltérő hőmérsékletűek a felszín többi részétől, vagyis foltok találhatóak a csillagon. A fényváltozás oka pedig a csillag forgása.
4. Kataklizmikus változók: Nóvak és szupernóvak tartoznak ehhez a típushoz. Nóvak esetében a csillag felszínén vagy az akkréciós korongban történik robbanás, míg a szupernóvak esetén maga a csillag robban fel.
5. Eruptív változók: Az eruptív változók kromoszférájában hasonló folyamatok zajlanak le, mint a napflerek esetén, csak sokkal nagyobb energia szabadul fel.

Természetesen a fentebb írt magyarázatok csak vázlatosak, hiszen a konkrét folyamatok ennél bonyolultabban történnek, és mélyebb fizikai ismereteket igényelnek. Bizonyos csillagoknál az is megfigyelhető, hogy az egyes típusok között létezik átfedés. Rögtön itt van példának a Nap, amely rotáló, eruptív és pulzáló változó is egyben. Ez a dolgot most a pulzáló változók egyik csoportjával foglalkozik.

A pulzáló változóknak két nagyobb csoportja létezik: a radiálisan, illetve nemradiálisan pulzálók. A radiálisan pulzáló változók esetében a csillagok valóban változtatják méretüket, periodikusan nő illetve csökken a felületük. Ennek következtében változik a fényességük is. A nemradiális pulzálóknál valamilyen perturbáció hatására a csillag felszíne bonyolult mozgásba kezd. Az pulzáló változók jelentős része a Hertzsprung-Russell diagram bizonyos részén helyezkedik el, amit instabilitási sávnak nevezünk (1. ábra). A 1. ábrán ez a sáv a két lila színezésű vonal között található.

Az instabilitási sávban tartózkodó pulzáló változóknál a méretváltozás oka az "átlátszatlanság", szakszóval az opacitás változása a csillag ionizációs zónájában. Az ionizációs zóna az a terület, ahol egy bizonyos elem, mondjuk hidrogén ionizálttá válik. Ennek a zónának van valamilyen opacitása. Az opacitás legjobban a részecskék számától függ. Ha a hőmérséklet elég magas az ionizációhoz, vagyis szabad elektronok keletkeznek, akkor ezek megnövelik a részecskék számát, ami



1. ábra. A Hertzsprung-Russell diagram

által az opacitás is megnő. Így egy akadály képződik a sugárzás számára, ezért a hőmérséklet folyamatosan növekedni kezd. A hőmérséklet növekedésének következménye pedig a tágulás. Ennek a folyamatnak a feltétele, hogy az ionizációs zóna kevéssel a felszín alatt legyen. Ez az oka az instabilitási sáv létezésének is, hiszen az itt található csillagok felszíni hőmérséklete alig kisebb az ionizációhoz szükséges hőmérsékletnél. Ha a zóna túl mélyen van, akkor a csillag konvekciója megakadályozza ezt a folyamatot. Maga a tágulás addig tart, amíg a hőmérséklet annyira lecsökken, hogy az ionok újra atomokká alakuljanak. Ekkor az opacitás lecsökken, és a sugárzás újra "zavartalanul" haladhat tovább. A csillag ekkor összehúzódásba kezd, addig a pontig, amikor a hőmérséklet újra meg nem növeli az opacitást. Itt a folyamat újra kezdődik előlről. Tehát a csillag egy periodikus pulzációt fog végezni. Mivel az opacitás jele az asztrofizikában κ , ezért ezt a folyamatot κ -mechanizmusnak nevezik (Cooper, Walker 1994).

A pulzáló változócsillagok egyik népes családja a félszabályos változók, amiket az angol semiregular (félig szabályos) szó alapján röviden SR csillagoknak is neveznek. Az SR csillagok periódusa néhány naptól körülbelül 2000 napig terjed, fénygörbéjük menete lehet viszonylag szabályos, de legtöbbször meglehetősen szabálytalanul változik a fényességük. Amplitúdójuk jellemzően néhány századtól néhány magnitúdóig terjed. A GCVS (General Catalogue of Variable Stars) alapján négy osztályba lehet sorolni ezen csillagokat, az ábécé első négy betűjével megkülönböztetve őket:

1. SRa
2. SRb

3. SRc

4. SRd

Az egyes típusok az Amatőrcsillagászok Kézikönyve (Mizser, 1999) alapján :

Az SRa osztály, az SRb és SRc osztályhoz hasonlóan késői színeképtípusú csillagokból áll. Tartós periodicitást mutatnak, amplitúdójuk 1-2 magnitúdó körül alakul. Az amplitúdó és a fénygörbe alakja ciklusról ciklusra változik, ami hasonlít a mira típusú csillagok tulajdonságára. Periódusuk 35 és 1200 nap között alakul.

Az SRb osztályt vagy egy határozott periódus jellemzi, vagy felváltva mutatnak periodicitást és lassú, szabálytalan fényváltozást. Egyes csillagok esetén előfordult már fényállandósulás is. Jellemző periódusuk 20 és 2300 nap között alakul, amplitúdójuk szintén 1-2 magnitúdó.

Az SRc osztály késői színeképtípusú szuperóriásokból áll. Ennek az osztálynak a fő jellemzője, hogy több periódus együttes jelenléte is kimutatható. Amplitúdójuk 1 magnitúdó körüli, fényváltozásuk periódusa 30 naptól néhány ezer napig terjedhet.

Az SRd osztály F, G vagy K színeképtípusú óriások, illetve szuperóriások. Érdekes, hogy néha emissziós vonalakat is mutatnak. Amplitúdójuk 0.1 és 2 magnitúdó közötti, periódusuk 30 és 1100 nap között alakul. Joy (1952), Stothers (1964) és Dawson (1979) alapján az SRd csillagok nagy radiális sebességekkel $v > 70$ km/s rendelkeznek, és nagy a sebességszperziójuk is a Tejútrendszer korongjára merőleges irányba. Mindezen tulajdonságok halo populációra utalnak.

Ezidáig az SRd csillagokról nem készült átfogó analízis, aminek egyik lehetséges oka, hogy csak mostanában kezdenek nyilvánosan elérhetővé válni a több évtized hosszú adatsorok. Ennek ellenére egyes csillagokat, pl. Z Aurigae, már vizsgáltak különböző csoportok. Az SRd osztály könnyen összekeverhető az ún. RV Tauri változók csoportjával, mivel a fényváltozásuk eléggé hasonló az SRd csillagokéhoz. Az RV Tauri szuperóriás csillagok, melyek fényváltozásuk során nemcsak fényességüket, hanem színeképtípusukat is változtatják. Maximumban F vagy G spektráltípusúnak mutatkoznak, minimum környékén K és M típusúnak. Periódusuk tipikusan 30 és 150 nap között változik, és a fényváltozás amplitúdója a 4 magnitúdót is elérheti. Az RV Taurikat fotometriailag két alcsoportra lehet osztani:

1. RVa

2. RVb

Az RVa alcsoport egy körülbelüli állandó átlagfényességgel rendelkezik, míg az RVb-knél az átlagfényességnek is megfigyelhető egy változása, ami körülbelül 1000 nap körüli érték szokott lenni (astro.u-szeged.hu/ismeret/valtozok/pulzalog.html).

Évekig, sőt azt lehet mondani, hogy évtizedekig próbálkoztak azzal különböző kutatók, hogy hogyan lehetne könnyen megkülönböztetni az SRd és RV Tauri típusú változókat. Erre a problémára mindmáig nem sikerült egzakt megoldást találni, bár a hosszabb adatsorok immáron sokkal könnyebbé teszik a két típus különválasztását. Ennek oka az lehet, hogy az RV Tauri és SRd csillagok gyakorlatilag ugyanott helyezkednek le a HRD-n, vagyis hasonló az evolúciós állapotuk. Erről a problémáról már számtalan cikk született, pl. Wahlgren (1993).

2. Az AAVSO

Amatőr csillagászok észlelései nélkül nem létezne változócsillagászat. Maguk az észlelések nem elegek, kellene emberek, illetve szervezetek, amelyek összegyűjtik ezen észlelők adatait. Ezért jöttek létre szerte a világon különböző egyesületek, mint például az AAVSO, az AFOEV, stb. Az AAVSO (American Association of Variable Star Observers), vagyis a változócsillagokat észlelők amerikai egyesülete a legnagyobb ilyen jellegű szervezet a világon. Az egyesület 1911-ben alakult, de vannak csillagok, amelyek fényességéről korábbi időpontokban is rendelkeznek. Manapság már 12.5 millió észleléssel rendelkezik az AAVSO, több mint 45 országból.

Az általam vizsgált csillagok adatsorai is AAVSO észlelésekből állt össze. A 1. táblázatban összefoglaltam a vizsgált csillagokat, összesen 25-öt. A leghosszabb adatsorral a Z Aurigae rendelkezik, amelynek első adatpontja 1908 áprilisából származik, és szinte folyamatos az adatsora. Ezzel szemben néhány csillag adatsorában, pl. AG Aurigae, mutatkoznak észlelési üregek, amelyek kissé megnehezítik a vizsgálatot, főleg a wavelet analízis során.

Csillag	Spektráltípus [GCVS]	Észlelések száma
AB Leo	F6e - G6ep	4282
AG Aur	G0eIb - K0ep	1936
AV Cyg	G0e - G6	6327
BM Sco	K2.5Ib	989
DE Her	K0 - M3e	1394
GT Ori	F0	1700
LR Sco	Fp	143
ρ Cas	F8pIa - K0pIa	37153
RS Lac	K0	4604
RU Cep	G6- M3.5III	6242
RW Cep	K0Ia	6250
RX Ret	G8 - K0II-IIIep	389
SV UMa	G1Ibe - K3Iap	199
SX Her	G3ep - K0 (M3)	19119
TV Per	K0	500
TZ Cep	G6 - K2e (M2)	672
UU Her	F2Ib - G0	4124
UY CMa	G0	1570
V441 Her	F2Ibe	348
V509 Cas	F8e - KIa	644
V564 Oph	G8 - K2 (M2)	116
V Pyx	G8IIp	362
W LMi	G2e - K2e (M3)	830
WY And	G2e - K2 (M3)	475
Z Aur	G0e - G6e	11141

1. táblázat. A vizsgált csillagok

A 1.táblázatból az is leolvasható, hogy ezen csillagok némelyikénél a spektráltípus se ismert pontosan, ami ugyancsak azt jelzi, hogy az SRd osztályról eddig nem készült átfogó vizsgálat.

3. Használt programok

3.1. Period04

A Fourier-analízishez a Bécsi Egyetemen dolgozó Michel Breger és munkatársai által kifejlesztett Period04 programcsomagot használtam, ami egy korábban általuk készített program, a Period98 továbbfejlesztett változata (www.univie.ac.at/tops). Innen szabadon letölthető a program. A futtatásához Java környezet szükséges, ami, ha nincsen számítógépünkön, a Period04-el együtt letölthető a már említett webcímről.

A Period04 program idősorok kifinomult vizsgálatához készült. A program különösen alkalmas ürökkel tarkított hosszú csillagászati adatsorok statisztikai vizsgálatához. Eszközeinek segítségével kiválaszthatóak az esetleges több periodusú adatsorból az egyes frekvenciák, amelyekkel utána megvalósítható a többfrekvenciás illesztés az adatsoron. A Period04 alapvetően három modulból áll:

1. Idősor modul: Itt olvassuk be az analizálandó adatsorokat, és itt lehet alakítani őket, például kivenni a rossz pontokat, felosztani kisebb idősorokra, stb.
2. Illesztés modul: Adott számú frekvencia legkisebb négyzetes illesztését lehet itt elvégezni, valamint számolni és illeszteni is lehet amplitúdó és fázis változásokat.
3. Fourier modul: Ez a modul végzi a Fourier-analízist az adatsoron. A Period04 Fourier-analízise a diszkrét Fourier- transzformáció algoritmusán alapul.

A Period04 egyik nagy előnye, hogy futtatni lehet mind Windows, mind Linux alatt. A Period04 másik nagy előnye, hogy grafikus kezelői felülete van, és ezért rendkívül könnyű kezelni. A számolás során kapott Fourier-spektrumokat, fázisdiagramokat, illetve illesztéseket elmenthetjük akár jpg, akár eps formátumban. Ha az egész projektet akarjuk elmenteni, akkor a program mindent belerak egy .p04 kiterjesztésű fájlba.

Aki több információt szeretne a Period04-ről megtudni, az a már említett webcímen talál egy teljes körű leírást róla egy pdf fájlban, vagy elolvashatja a Communications in Astroseismology 146. számában (2005). Ezt a folyóiratot Lenz és munkatársai adják ki.

3.2. WinWWZ

A wavelet vizsgálatokhoz az AAVSO munkatársai által létrehozott WinWWZ nevű programot használtam, ami az ún. súlyozott wavelet Z-transzformációval számol. A wavelet transzformáció különösen alkalmas az amplitúdó és a periódus időbeli változásának vizsgálatához. Maga a WinWWZ egy Windows XP alapú program, Linux alatt nem futtatható. A program másik hiányossága, hogy a számolás során kevés paramétert lehet előre beállítani, szemben a Period04-el. Előny azonban, hogy ha az ember nem rendelkezik átlagolt adatsorral, akkor a program képes kiszámolni az átlagolást. A WinWWZ-vel a háromdimenziós idő-frekvencia-amplitúdó contour térképen kívül meg lehet tekinteni a kétdimenziós frekvencia-idő, periódus-idő és amplitúdó-idő ábrákat is. Aki többet szeretne tudni a programról, a www.aavso.org/data/software honlapon talál több információt.

3.3. Origin

A végső szinusz illesztések megjelenítéséhez az Origin nevű programot használtam. Az Origin egy Windows alapú program, amivel diagramokat lehet ábrázolni. Az Origin különösen alkalmas hosszú fénygörbék ábrázolására, mert az adatsort szétszedhetjük különböző nagyságú szeletekre, amiket aztán egymás alá rakhatunk. Ezáltal a fényváltozás jobban láthatóvá válik. A kapott diagramokat pedig elmenthetjük bmp, Windows Metadata vagy eps formátumban, és lehetőség van arra, hogy a létrehozandó képek pixelméretét megadjuk.

4. A vizsgálat

4.1. A vizsgálat kezdete

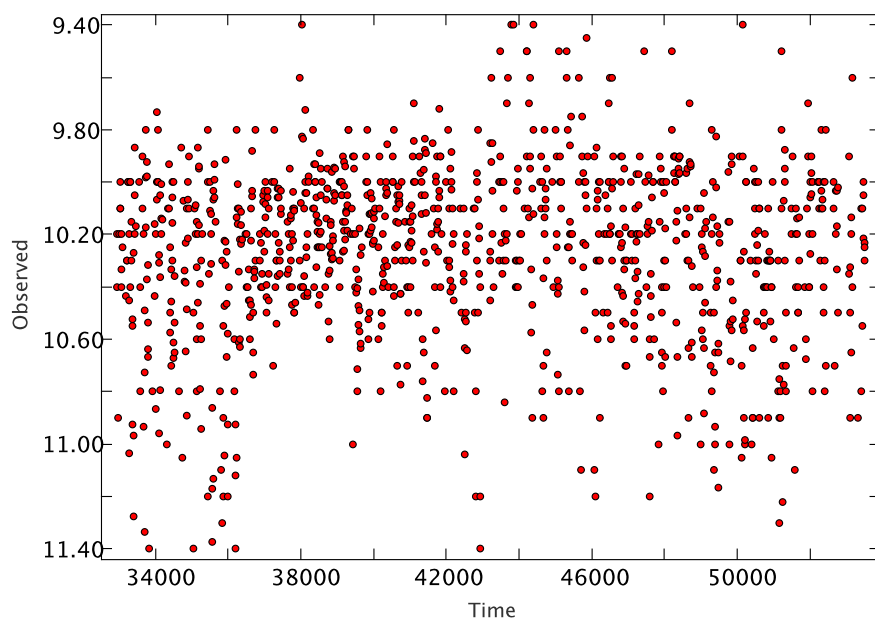
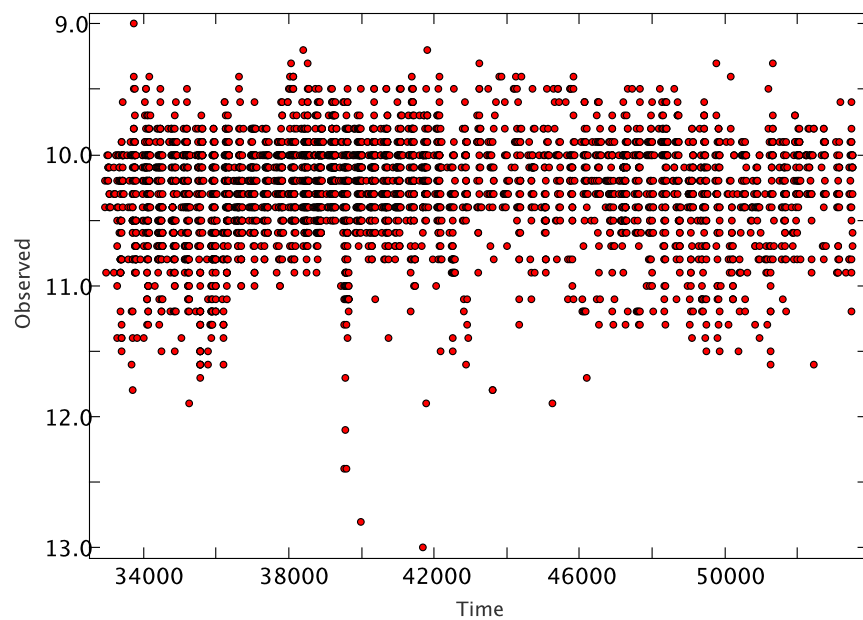
Nagyon hosszú adatsorok esetén a vizsgálat első lépése az adatsorban szereplő időpontok és a hozzájuk tartozó fényességértékek bizonyos naponkénti átlagolása. Ezáltal ugyanis lényegesen csökkenthető az egyedi észlelésekből származó hiba nagysága, vagyis a szórás. A kutatók általában 10 napra átlagolják adatsoraikat, bár előfordul 5 naponkénti átlagolás is, főleg ha 100 napnál rövidebb periódusú csillagról van szó. A vizsgálat során én a pontokat 10 napra átlagoltam. A 2. táblázatból leolvasható az eredeti adatsorban szereplő, és az átlagolás után maradt pontok száma. A 2. ábrán pedig bemutatom az átlagolás hatását az AB Leonis csillag fénygörbéjén.

4.2. A vizsgálat folyamata

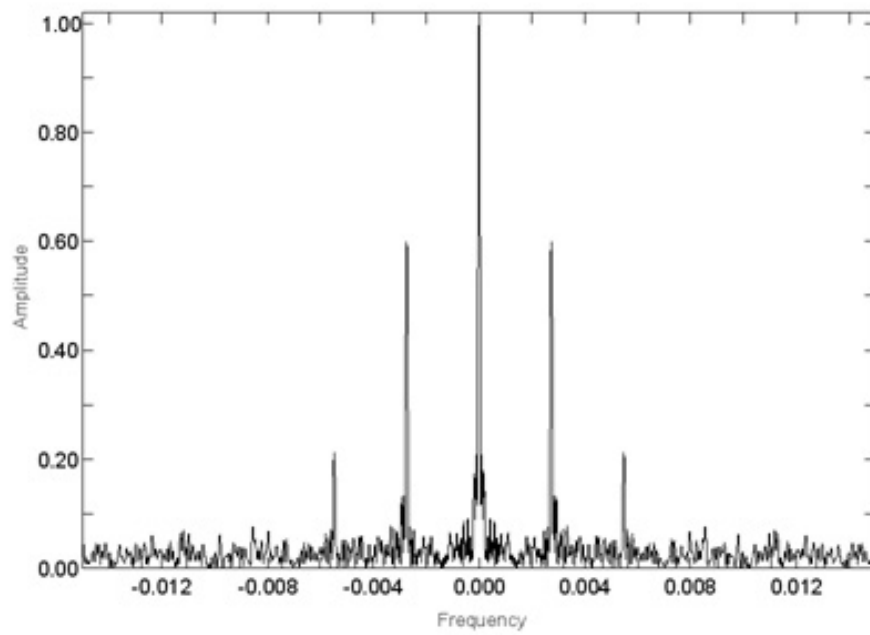
4.2.1. Fourier-transzformációs vizsgálatok

A változócsillagászatban többféle periódus keresési módszer is ismert, de leggyakrabban a Fourier-transzformációt használják. A Fourier-transzformációs számításokat a Period04 programmal végeztem el, a bemutatott spektrumok mind onnan származnak. Egy számolt Fourier-spektrum azonban a valódi spektrum és az ún. spektrálablak függvény konvolúciója. Ha végtelen hosszú és folytonos lenne egy adatsor, akkor a számolt Fourier-spektrumban a talált frekvenciáknál éles csúcsok jelennének meg. A csillagászatban azonban nem léteznek ilyen adatsorok, hiszen nappal a csillagok nem látszanak, éjszaka felhős lehet az ég, ezen kívül pedig a láthatóságuk erősen szezonális jellegű is lehet, stb.. Ezt a hatást lehet csökkenteni nemzetközi kooperációval, de teljesen eltüntetni nem lehet. A spektrálablak függvény ellenben megadja, hogy milyen alakúak lesznek a csúcsok, és milyen erősek lesznek az aliasok, azaz a hamis csúcsok a spektrumban. A spektrálablak függvény spektruma annál "szebb", minél kevesebb úr található az adatsorban. Példaként bemutatok egy gyenge aliasokkal, és egy erős aliasokkal rendelkező spektrálablak függvényt. Az erős aliasokkal bíró spektrálablak függvény a W Leo Minoris csillaghoz tartozik (3. ábra), míg a gyenge aliasokkal a RU Cephei rendelkezik (4. ábra)

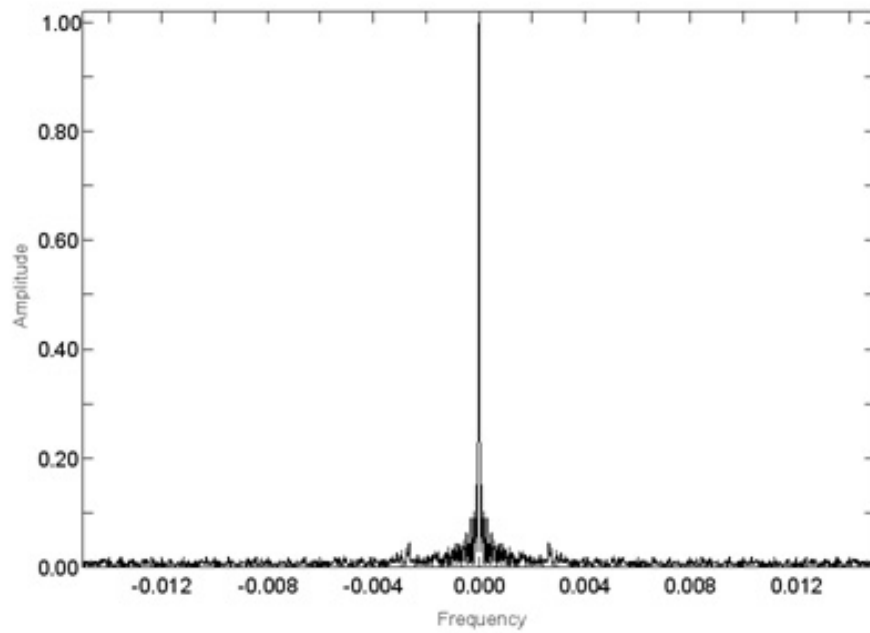
A W Leo Minorisnál megfigyelhetőek az alias csúcsok, amik oka a csillag szezonális láthatósága, míg a RU Cepheinél ezek szinte egyáltalán nem jelentkeznek. A spektrálablak függvény alapján tehát a W Leo Minoris Fourier-spektrumában erős alias csúcsok várhatóak, míg a RU Cepheinél nem. Az alias csúcsok megnehezítik az igazi csúcsok azonosítását. Az ilyen hosszú adatsorok esetén az 1 1/év



2. ábra. Az AB Leonis eredeti és 10 napra átlagolt fénygörbéje



3. ábra. A W Leo Minoris spektrálablak függvénye



4. ábra. A RU Cephei spektrálablak függvénye

Csillag	Átlagolás utáni pontok száma	Eredeti pontok száma
AB Leo	1089	4282
AG Aur	968	1936
AV Cyg	1671	6327
BM Sco	433	989
DE Her	626	1394
GT Ori	629	1700
LR Sco	64	143
ρ Cas	2229	37153
RS Lac	1784	4604
RU Cep	1795	6242
RW Cep	1731	6250
RX Ret	296	389
SV UMa	137	199
SX Her	2765	19119
TV Per	356	500
TZ Cep	213	672
UU Her	1388	4124
UY CMa	657	1570
V441 Her	212	348
V509 Cas	388	644
V564 Oph	91	116
V Pyx	239	362
W LMi	444	830
WY And	322	475
Z Aur	2692	11141

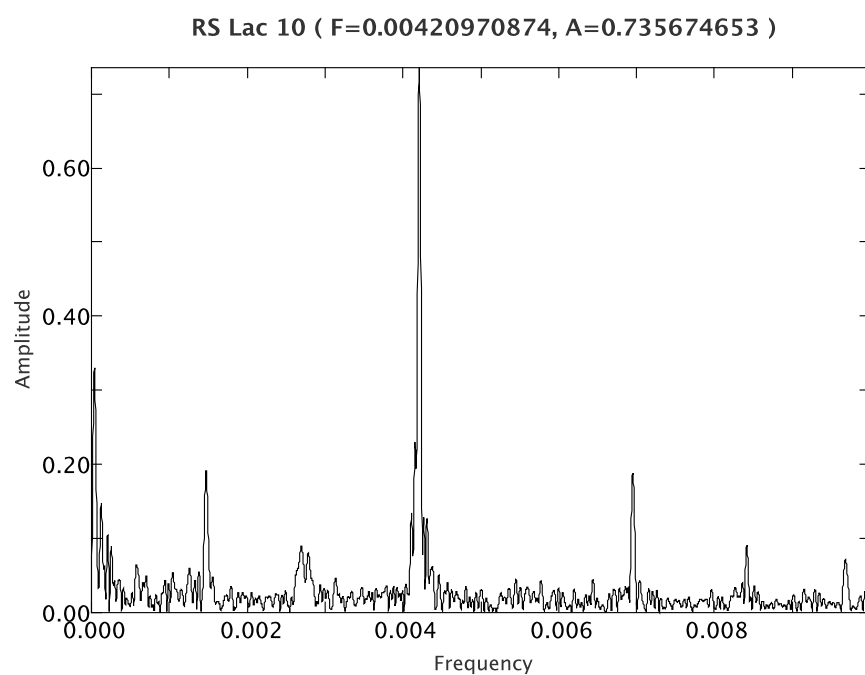
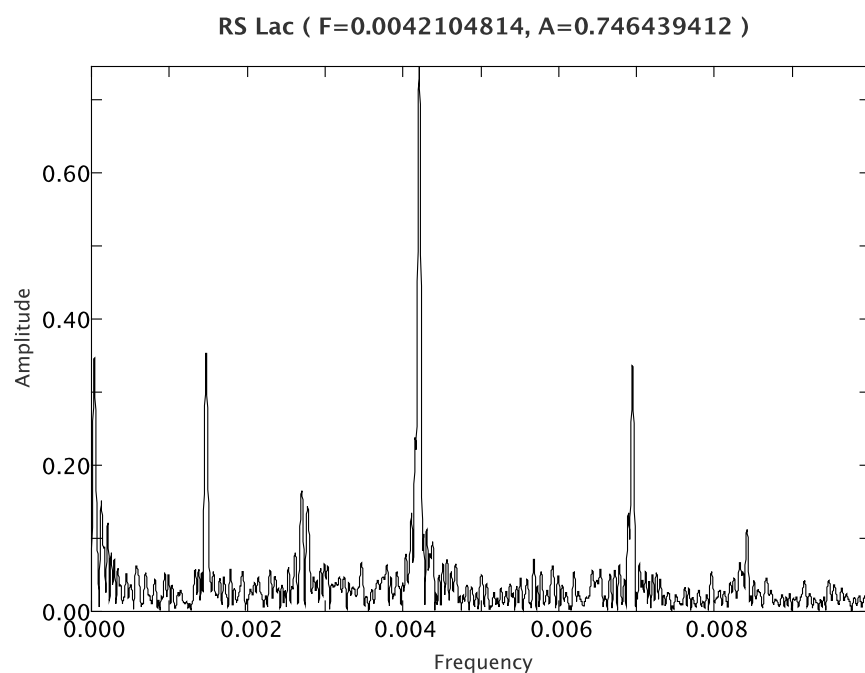
2. táblázat. A csillagok és átlagolt adatpontjaik száma

távolságra lévő aliasok jelennek meg, amik a Fourier-spektrumban 0.00273 c/d (ciklus/nap) egységre találhatók a valódi csúcsoktól. Vagyis elvileg könnyű kiszűrni az alias csúcsokat, ha nem túl rövid és zajos az adatsor. Erről később még lesz szó.

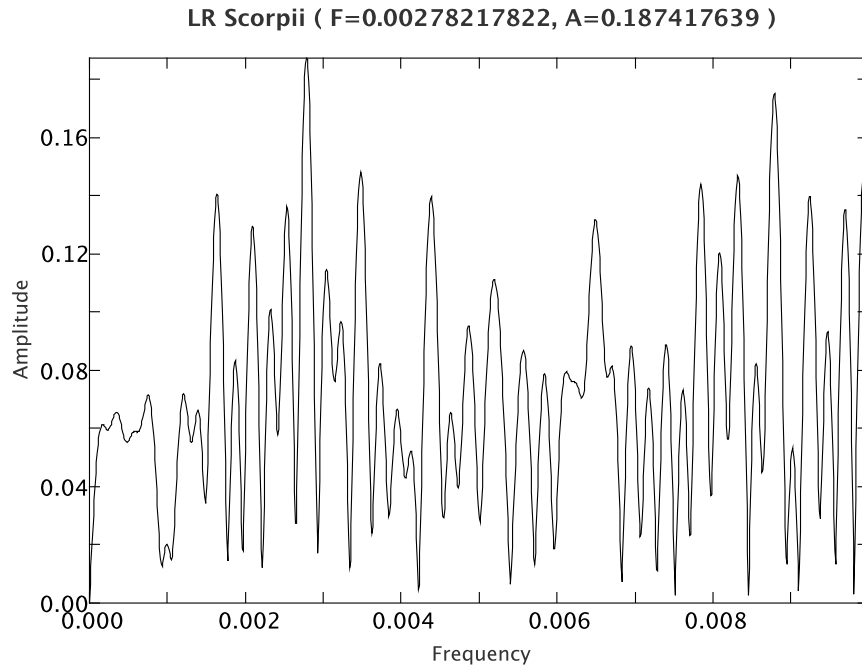
Az első lépés tehát az adatsor Fourier-transzformáltjának kiszámítása. Az átlagolás csökkenti a fényességbecslések hibájából származó szórást, de ha elég sok adatpontunk van, akkor ez nem változtatja meg jelentősen a Fourier-spektrumot. Példaként bemutatom az RS Lacertae eredeti és 10 napra átlagolt Fourier-spektrumát a 5. ábrán.

A 5. ábrán jól látható, hogyan változtak meg az alias csúcsok erőssége, míg a spektrum gyakorlatilag nem változott. Az RS Lacertaenak azonban egy hosszú és egyenletes adatsora van, ami miatt az átlagolásnál jelentősen csökkenthető volt az aliasok nagysága. Néhány csillagnak ellenben rövid és kevésbé egyenletes adatsora van, ami által a Fourier-spektrumuk zajos lesz, és nem lehet egyértelműen megtalálni a valódi periódust. Zajos csillag például az LR Scorpii, melynek Fourier-spektruma a 6. ábrán látható. Az ilyen típusú adatsorok másik jellegzetessége, hogy a frekvenciacsúcsok nem élesek lesznek, hanem kiszélesesednek. Ennek tökéletes ellentettje a hosszú, egyenletes adatsor, ahogy azt láttuk a 5. ábrán.

Van egy harmadik ok is arra, hogy egy Fourier-spektrum csúcsai kiszélesednek. Néhány csillag fényváltozása mindössze század magnitúdókat tesz ki, ami által vi-



5. ábra. Az RS Lacertae eredeti és 10 napra átlagolt adatsorának Fourier-spektruma



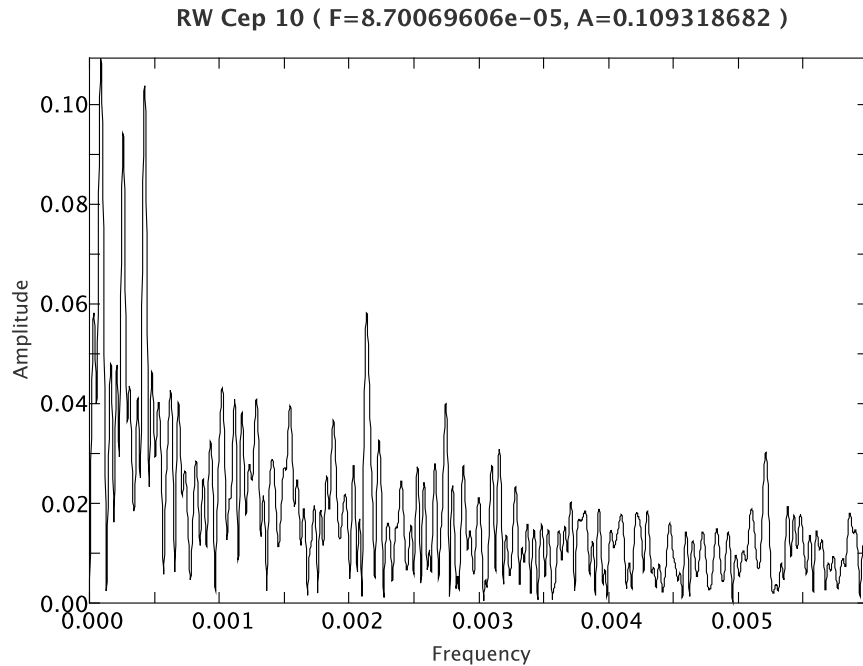
6. ábra. Az LR Scorpii Fourier-spektruma

zuális megfigyelésük hamis eredményeket hozhat. Az emberi szemmel ugyanis csak tized magnitúdókat tudunk becsülni. Ezáltal a fényváltozás amplitúdóját nem lehet megállapítani, és ha az adatsor rövid is emellett, akkor a periódust is nehéz meghatározni. Az ilyen csillagokat, pl. V441 Her, csak pontos fotoelektromos illetve CCD mérésekkel lehet vizsgálni.

Beszélni kell még a Fourier-spektrumban megjelenő ún. tarajosságról, aminek az oka, hogy a fő periódus kicsit "löttyög", vagyis értéke néha kicsivel kevesebb, néha kicsivel több. A tarajosság a főcsúcs közvetlen közelében lévő mellékcsúcsokból származik, amik valódi csúcsok, és nem aliasok. Ez a jelenség különösen a hosszú adatsoroknál feltűnő, és a félszabályos változók egyik sajátossága. A vizsgált 25 csillag közül soknál volt ez a jelenség megfigyelhető.

Egy csillag nemcsak egy frekvenciával oszcillálhat, lehetséges egyszerre több periódusú változás jelenléte is. Ha ezek a változások a fő periódus egész számú többszörösei, akkor felharmonikusokról beszélünk. Léteznek felhangok is, amelyek a fő periódus nem egész számú többszörösei vagy hányadai. Ilyen felhangokat szépen meg lehet figyelni cefeida és RR Lyrae változóknál, de van rá példa félszabályos változóknál is. A vörös óriás változóknak ezen kívül van egy egyedi típusú fényváltozásuk, az ún. LSP (Long Secondary Period), vagyis hosszú másodlagos periódus. Az LSP jelenségét néhány évtizede fedezték fel, amikor a kutatók már rendelkeztek több évtized hosszú adatsorokkal. Az LSP egy nagy amplitúdójú változás, ami sokszor a fő periódus tízszeresével jelentkezik (Wood et al., 2004).

A többi periódus pontos meghatározása az ún. fehérítés módszerével történik. Kétfajta fehérítés létezik, az egyik az időtartományban való fehérítés, a másik a frekvenciatartományban történik. A Period04 az időtartományban való fehérítést alkalmazza. A módszer lényege, hogy a Fourier-spektrumból meghatározott



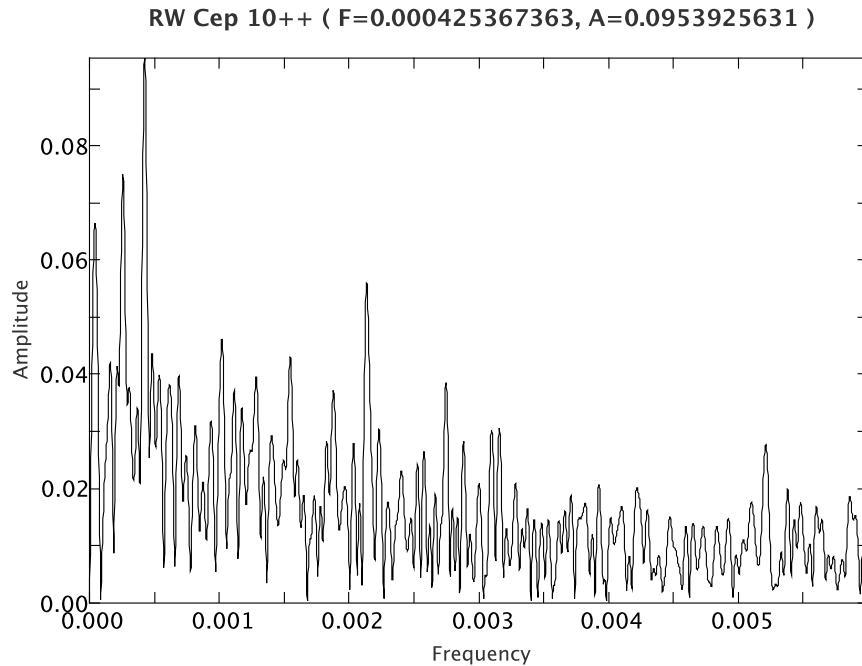
7. ábra. Az RW Cephei eredeti Fourier-spektruma

komponenssel, melynek ismert a periódusa, amplitúdója és fázisa, fehérítjük az eredeti adatsort egy egyszerű levonással. Buktatók azonban léteznek. A komponens, amivel fehérítettünk, általában a legnagyobb amplitúdójú a Fourier-spektrumban. Azonban lehetséges, hogy nem az a csúcspont a valódi fényváltozás periódusa. A korábban már említett okok miatt a hamis csúcsok felerősödhetnek. Ezen kívül ügyelni kell arra is, hogy a fehérítő szinuszfüggvény fázisa elég pontosan meg legyen határozva (Szatmáry, 1994). A Period04 a fázist 6 tizedesjegy pontossáig adja meg, ami már elég a fehérítés végrehajtásához. A fehérítés példaként bemutatom az RW Cephei csillag eredeti (7. ábra) és fehérített (8. ábra) Fourier-spektrumát.

Látható, hogy a 7. és 8. ábrán két különböző frekvenciájú csúcspont a legmagasabb, ezek a legdominánsabb változások az RW Cephei esetén. A fehérítésnél azonban óvatosságnak kell lenni, nem lehet akárhányszor elvégezni, mert a Fourier-spektrum alján található az ún. fű, ami zajból tevődik össze. Vagyis vigyázni kell, hogy a periódusok határozottan kiemelkedjenek a zajból, különben hamis eredményt kapunk. Amint a 6. ábrán látható, a rövid és egyenetlen eloszlású adatsorokkal rendelkező csillagok esetében ez a feladat sokkal nehezebb, és általában nem szolgáltat reális eredményt a Fourier-tanszformációból kapott értékek alapján elvégzett illesztés. Az Eredmények fejezetben mind a 25 csillag vizsgálatának eredményét külön tárgyalom majd.

4.2.2. Wavelet vizsgálatok

A Fourier-tanszformációval lényegében a fénygörbe egészére jellemző változásokat tudunk kimutatni. A periódus és amplitúdó időbeli változásának vizsgálatához a wavelet analízist kell használni, amit a WinWWZ programmal hajtottam végre.



8. ábra. Az RW Cephei fehérített Fourier-spektruma

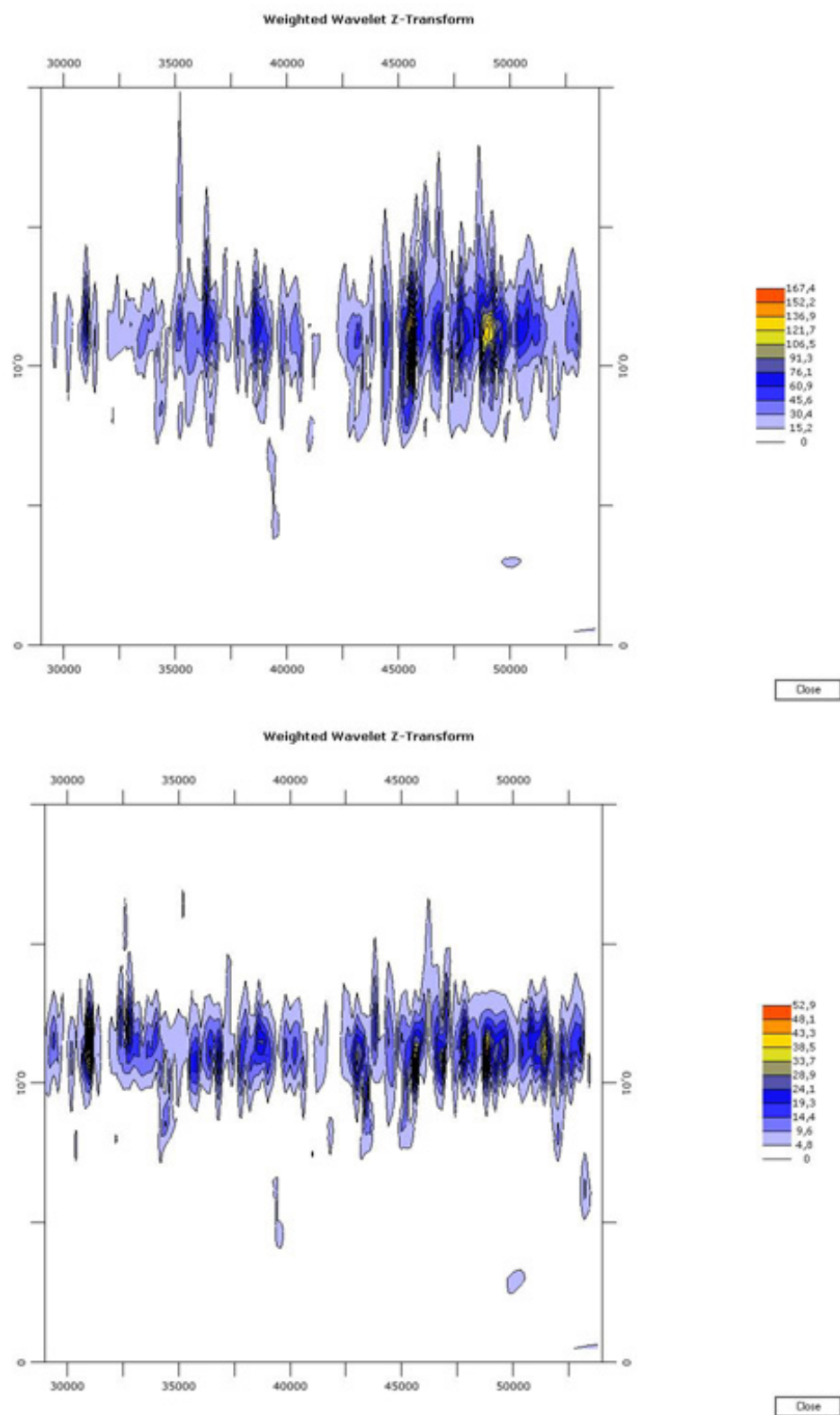
A wavelet transzformáció sokáig csak matematikai vizsgálatok tárgya volt, később azonban sok tudományágban elterjedt (Szatmáry, 1994). A wavelet transzformáció sokszor több információt szolgáltat, mint a Fourier-transzformáció, mégis az utóbbit végezzük el előbb, mivel az ebből kapott eredmények alapján állítható be a használandó wavelet függvény időbeli és frekvenciabeli felbontása (Szatmáry, 1994).

A wavelet transzformációs vizsgálat eredményeképpen egy három dimenziós ún. contour térképet kapunk, ahol a vízszintes síkon az idő és frekvencia van ábrázolva, míg a függőleges tengelyen az amplitúdó. A contour térképeket általában színezzik, hogy jobban lehessen látni a változás menetét.

A wavelet térképeknek van három lényeges tulajdonságuk, amit figyelembe kell venni az analízis során (Szatmáry, 1994):

1. A wavelet ablak szélessége frekvencia függő, vagyis a frekvencia meghatározásának pontossága függ a frekvencia értékétől.
2. A contour térkép nagyon érzékeny az adatbeli hiányokra, ezért az adatsor elején és végén, valamint az űrökben az amplitúdó jelentősen lecsökken.
3. Hasonló jelenség, hogy az adatsor elején és végén lefutó gerincek jelennek meg.

Az átlagolás jótékony hatásait már megemlítettem a Fourier-transzformációnál. A wavelet során kapott contour térképekben is jobban láthatóvá válnak a változások menetei az átlagolás után. Példaként az AV Cygni eredeti és 10 napra átlagolt adatsorának contour térképét mutatom meg: 9. ábra. Látható, hogy az átlagolás utáni contour térkép sokkal részletgazdagabb, valamint, hogy a főperiódus gerince jobban kirajzolódik.



9. ábra. Az AV Cygni eredeti és 10 napra átlagolt fénygörbéjének contour térképe

Sajnos a wavelet transzformáció egyik nagy hiányossága, hogy nem tudja kezelni az adatsorban megjelenő hosszú üroket, pl. AG Aurigae. A problémát úgy próbáltam megoldani, hogy a fénygörbe különböző részeit egyenként vizsgáltam meg.

Láttuk, hogy a wavelet transzformáció rendkívül érzékeny az adatsor eloszlására, ami miatt a contour térképen a valódi jelenségek és az analízis által generált effektusok összekeverednek. Ezt a problémát kiküszöbölendő, egy stabil szinusz függvényt kell generálni az eredeti időpontokban (Szatmáry, 1994). A szinusz függvény frekvenciáját, amplitúdóját és fázisát a Fourier-spektrumból határozzuk meg. Egy szép példát mutatok be az RS Lacertaen keresztül: 10. ábra. Látható, hogy a generált szinusz gerince eléggé hasonló a 10 napra átlagolt adatsor főperiódusának gerincéhez. Vagyis ebben az esetben a contour térképen az analízis effektusai minimálisak. A vizsgálatok során a nagyon alacsony frekvenciájú gerincek esetében volt nehéz különválasztani az analízis effektusait.

4.3. A vizsgálat befejezése

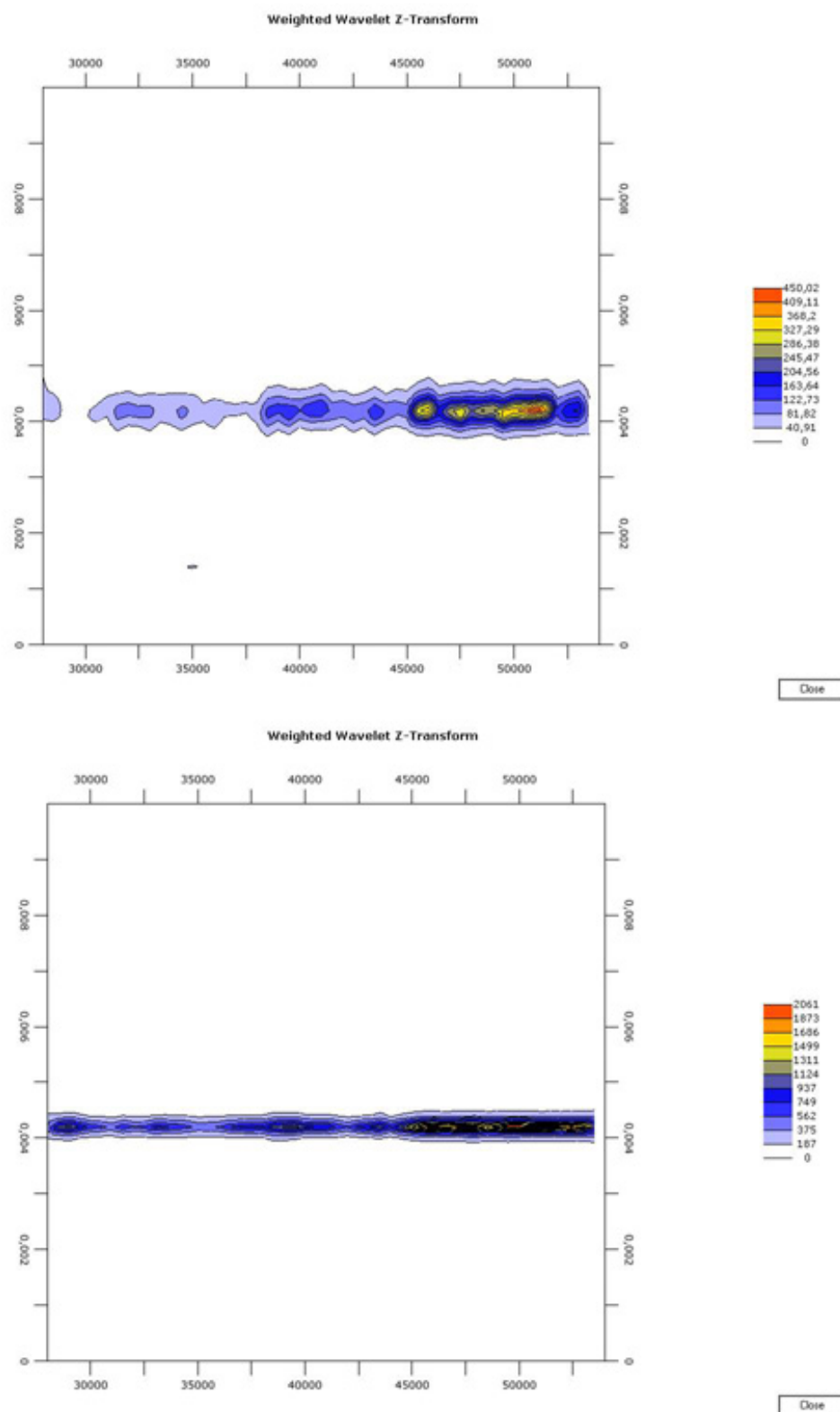
Miután megkaptam a Fourier-spektrumokat, megnéztem a contour térképeket, amiket aztán összehasonlítottam a generált szinuszok contour térképeivel, sor kerülhetett olyan szinuszok "gyártására", amik az üroekben is futnak 10 naponkénti adatpontokkal. Ezeknek a szinuszoknak a periódusa, amplitúdója és fázisa azonos az eredeti adatpontokban generált szinuszok értékeivel, csak az adatsorok hiányos részein is látható a futásuk. Ezzel a módszerrel szépen láthatóvá válik, hogy helyes eredményeket kaptunk-e a periódusokra, amplitúdókra és fázisokra. Ehhez az Origin programot használtam. Általános tapasztalatom volt, hogy az amplitúdók a zajosabb adatsoroknál kisebbnek adódtak a valóságosnál, míg a Fourier-spektrumban határozott csúccsal rendelkező csillagok fénygörbéjének illesztése sokkal szebb lett. A legérdekesebb eseteket tárgyalom az egyes csillagoknál, a legjobban sikerült illesztéseket pedig be is mutatom.

5. Eredmények

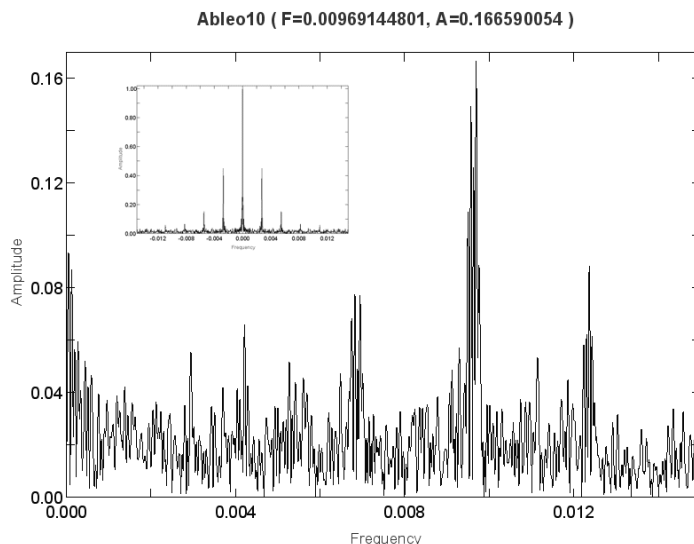
5.1. AB Leonis

Hoffleit (1949) cikke alapján a csillag periódusa 1898. november -1910. november, és 1935. július-1945. május között 103.2 nap volt, míg más időközökben a periódus 75-125 nap között változott. Dawson (1979) végzett fotometriai vizsgálatot a csillagon 1975-ben és 76-ban, fizikai paraméterek meghatározásának céljából. Az általa talált periódus 130.2 nap. A Dawson által meghatározott fontosabb paraméterek: a csillag effektív hőmérséklete körülbelül 4600 K, tömege körülbelül $0.8 M_{\odot}$, fémessége $[Fe/H] = -1.2$. Giridhar et al. (1998) 1995 decemberében végeztek spektroszkópiai méréseket a csillagon. Az általuk meghatározott paraméterek: effektív hőmérséklet körülbelül 4300 K, a fémesség $[Fe/H] = -1.6$. Eredményeik szerint AB Leonis spektrumában a $H\alpha$ vonalnak jelentős emissziója van a kék és a vörös oldalon is, közepén mély abszorpcióval. Ez alapján az AB Leonis halobeli változónak tűnik.

Az AB Leonis Fourier-spektrumában a 0.009691 c/d frekvencia volt a legerősebb, ami 103.2 napnak felel meg. A főcsúcs közelében sok a mellékcsúcs, emiatt a spektrum nagyon tarajos. Ezenkívül erősek az aliasok is (11. ábra). A wavelet térkép



10. ábra. Az RS Lacertae 10 napra átlagolt és generált szinuszának contour térképe



11. ábra. Az AB Leonis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye

a 9. ábrán már látható volt. A 103.2 naphoz tartozó gerinc kisebb szakadásokkal végigfut az egész térképen. A "tarajosságnak" megfelelő jelenség is megfigyelhető: a gerinc néhány helyen kiszélesedik: 12. ábra. A szinusz illeszkedése a fénygörbére jó: 13. ábra és 14. ábra.

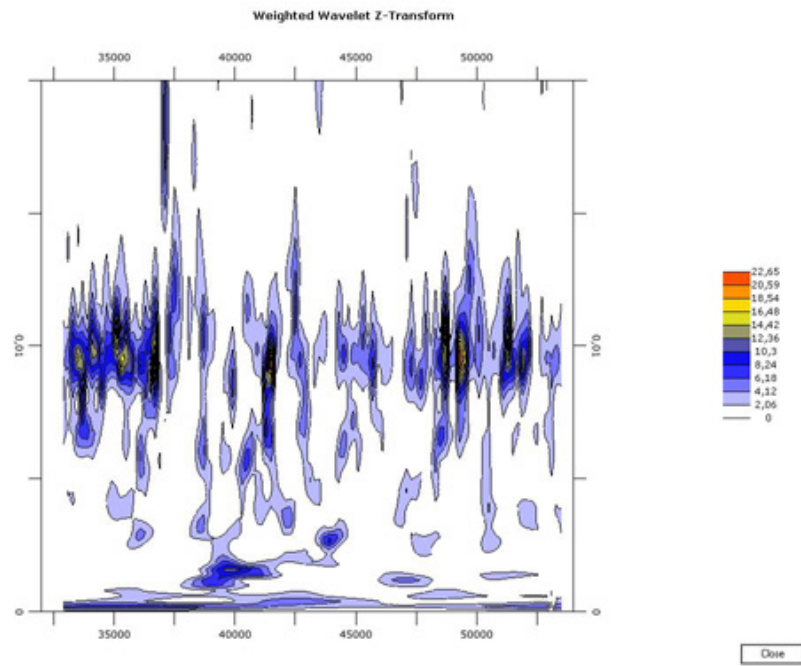
5.2. AG Aurigae

Ezt a csillagot először Joy vizsgálta (1952), és 98 napos periódust talált. Spektroszkópiai vizsgálatai alapján a csillag spektráltípusa G2e-K0, viszont a TiO vonalak alapján M3. Percy et al. (2004) újra megvizsgálta a csillagot AAVSO észlelések alapján, auto-korrelációs módszert használva, és 96.7 napos periódust határozott meg. A csillagot úgy jellemezte, hogy kissé semireguláris, mivel az auto-korrelációs amplitúdó 1000 nap alatt jelentősen lecsökkent. Az AG Aurigae fémessége Giridhar et al. (2000) és munkatársai alapján $[Fe/H] = -1.8$.

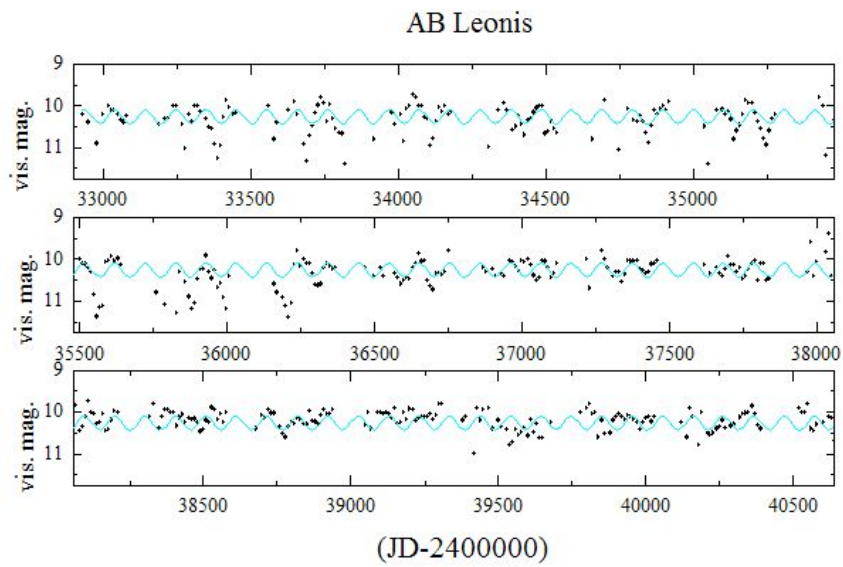
Az általam használt fénygörbében három nagyobb űr mutatkozik, mindegyik körülbelül 3000 nap hosszú. A Fourier- spektrumban a fő periódus 0.010392 c/d-nél jelenik meg, ami 96.2 nap. A főcsúcs körül kisebb tarajosság jelentkezik, az alia-sok elhanyagolhatóak. A fő periódus mellett a spektrumban megfigyelhető volt egy sokkal kisebb frekvenciájú és kisebb amplitúdójú csúcs is (15. ábra). Fehérítés után kapott eredmény szerint ez a periódus 50996.3 nap hosszú. A contour térkép határozottan mutatja a 96 napos változást, a hosszú űrök ellenére is: 16. ábra. A két szinuszos fittelés jól illeszkedik a fénygörbére, bár az amplitúdó kissé kevesebb lett a fénygörbe amplitúdójánál: 17. ábra, 18. ábra 19. ábra.

5.3. AV Cygni

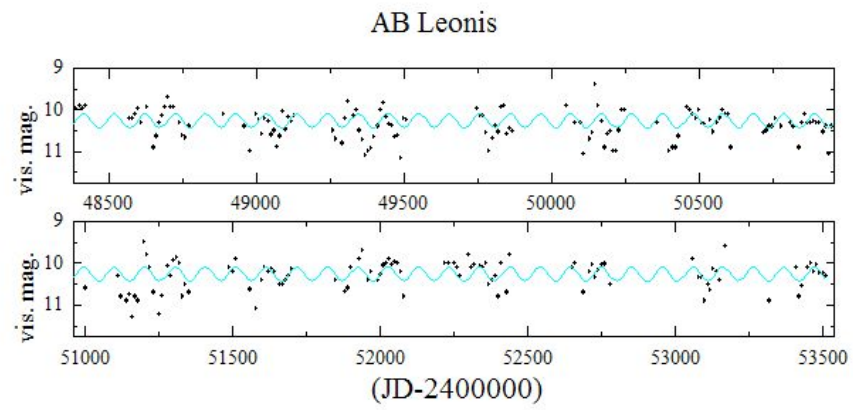
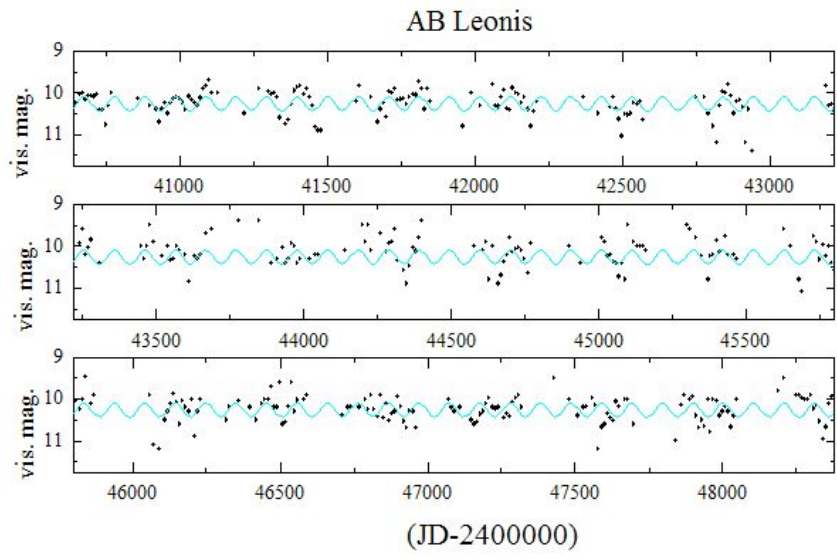
A GCVS alapján a periódus 89.2 nap, ami 1910 áprilisa és 1960 júliusa között kicsit ingadozott 87.4 és 89.7 nap értékekkel (GCVS honlap). Percy et al. (2004) ezt a



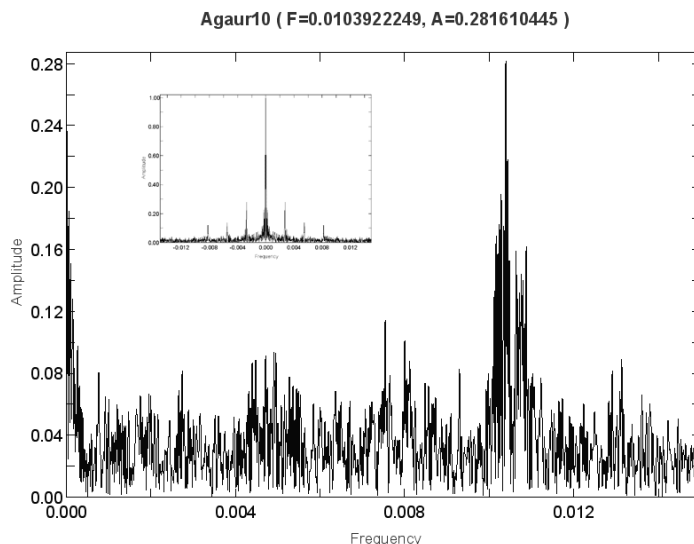
12. ábra. Az AB Leonis contour térképe



13. ábra. Az AB Leonis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 103.2$ nap



14. ábra. Az AB Leonis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 103.2$ nap



15. ábra. Az AG Aurigae Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye

csillagot is analizálta az auto-korrelációs módszerrel, és 89.2 napos periódust talált. Jellemzése szerint az AV Cygni periodikus és szabályos, kisebb irregularitással.

Az általam használt fénygörbe 1938-tól indul, és a változás valóban szép szabályosnak tűnik első látásra is. A Fourier-spektrumban határozott csúcs jelenik meg 0.011313 c/d-nél, ami 88.4 napnak felel meg. A spektrumban kisebb aliasok figyelhetők meg: 20. ábra. A wavelet határozottan kimutatta a 88 napos változást, ami szép egyenletes az egész contour térkép hosszában (9. ábra alsó kép). A szinusz is jól illeszkedik a fénygörbére: 21. és 22. ábra.

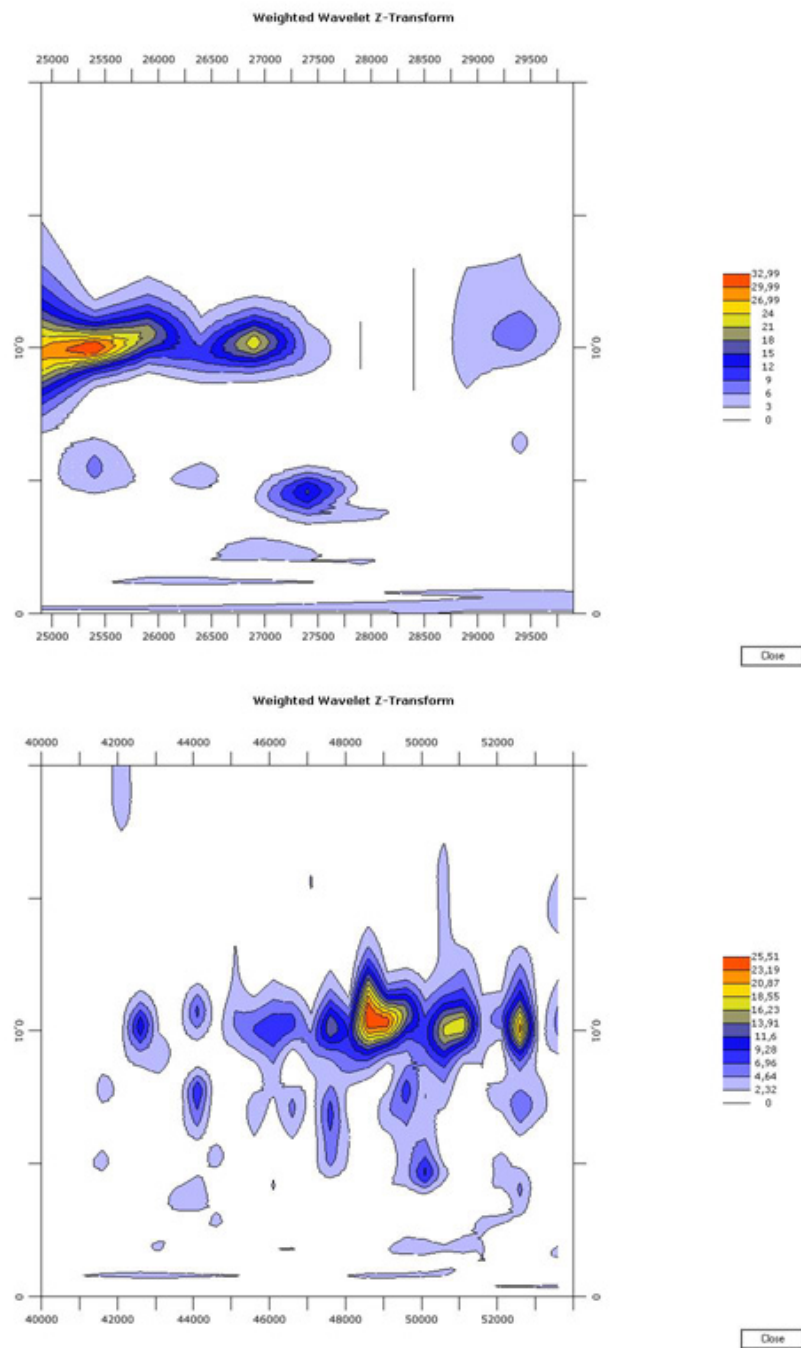
5.4. BM Scorpui

A csillag az M6 nyílthalmaz régiójában helyezkedik el. Gaposchkin 1950-es mérései alapján a csillag periódusa 381.7 nap, maga a cikk azonban nem elérhető (GCVS honlap).

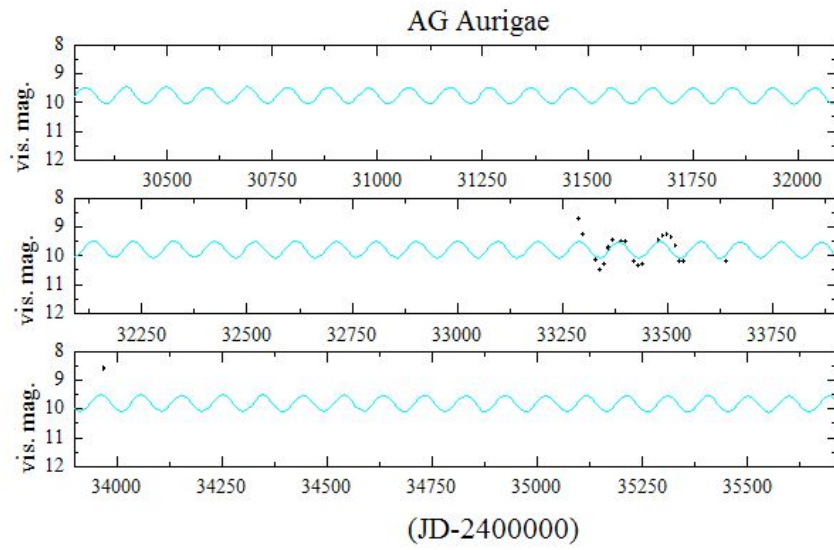
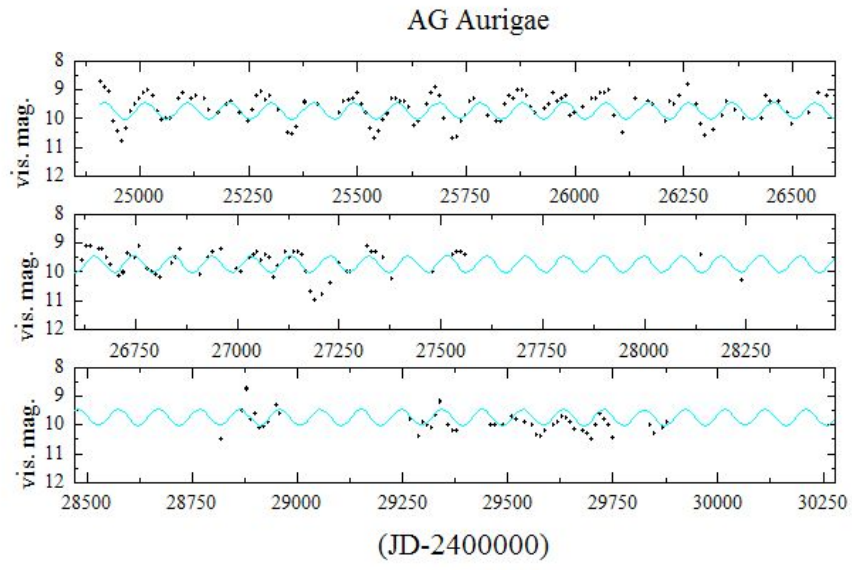
A BM Scorpui Fourier-spektruma nagyon zajos, a legmagasabb csúcs 0.002623 c/d-nél jelentkezik, azaz a periódus 381.2 nap (23. ábra). Innen is látszik, hogy a Fourier-transzformáció kiválóan alkalmas periódus meghatározásra, hiszen a zajos spektrumban is kimutatta a korábban talált periódus értéket. A második periódus a fehérítés után 3690 nap. A wavelet nem találta meg a 381 napos periódust, viszont kimutatta a hosszabb változást: 24. ábra. A két szinuszos illesztés sokkal meggyőzőbb lett, mint az egy szinusszal végrehajtott.

5.5. DE Herculis

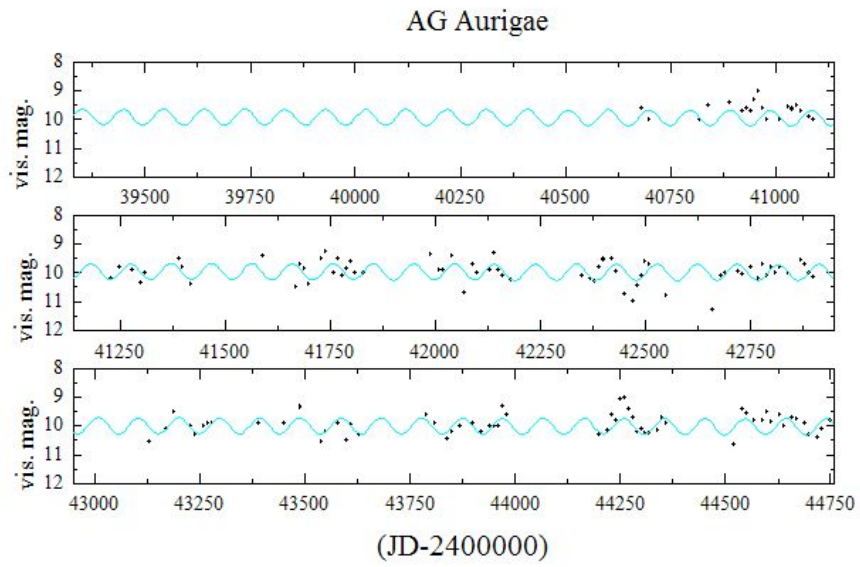
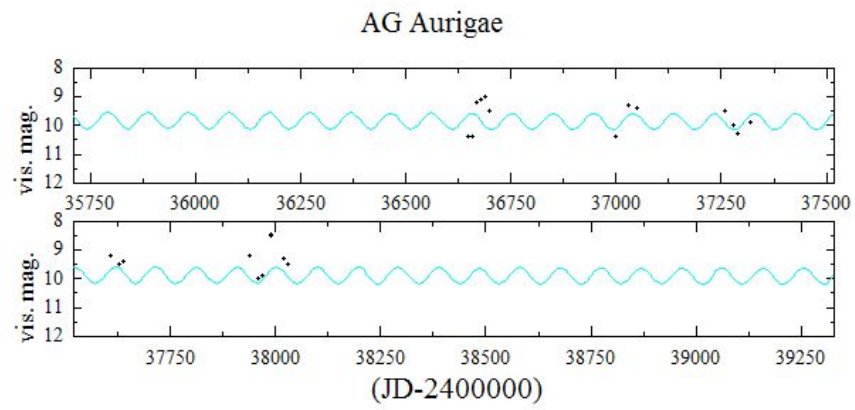
Huth 1963-ban (GCVS honlap) vizsgálta a csillagot, és eredményei alapján a periódus többször is változott kisebb mértékben: 1929. május-1943. június 171.2 nap, 1943. június-1957. november 175.3 nap, 1957. november-1963. április 165.2 nap. Dawson (1979) 170.9 napos periódust állapított meg.



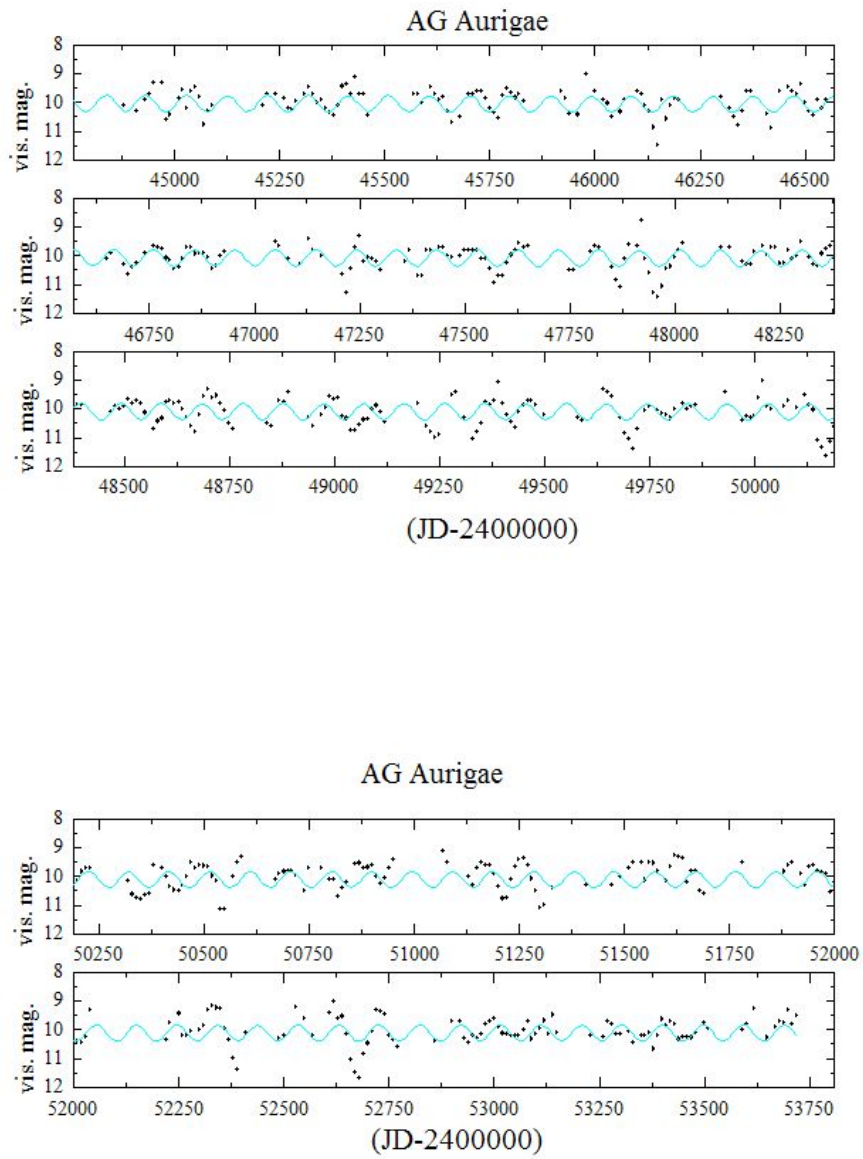
16. ábra. Az AG Aurigae contour térképe



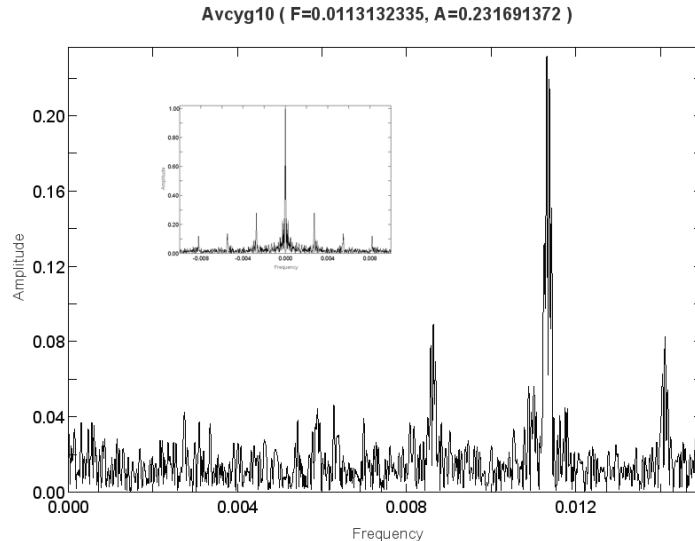
17. ábra. Az AG Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 96.2$ nap és $P_2 = 50996.3$ nap



18. ábra. Az AG Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 96.2$ nap és $P_2 = 50996.3$ nap



19. ábra. Az AG Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 96.2$ nap és $P_2 = 50996.3$ nap



20. ábra. Az AV Cygni Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye

Ezeket az eredményeket a kutatók azért kaphatták, mert nem rendelkeztek olyan hosszú adatsorral, mint én. Tény és való, hogy van egy körülbelül 172 napos változás, de egy még nagyobb amplitúdójú és sokkal kisebb frekvenciájú változás a domináns, aminek a periódusa 7936.5 nap: 25. ábra. Külön érdekesség a 172 nap körüli csúcs kettőssége. Valószínűleg ez a magyarázat a referenciákban szereplő sok periódusra. A wavelet igazolta mindkét periódust, és a 165 napos változásnál megfigyelhető volt a periódus nem teljesen stabil értéke is: a hozzá tartozó gerinc nem volt teljesen egyenes, hanem egy kis "ív" volt benne (26. ábra). A két szinuszos illesztés jól követi a fénygörbét: 27. ábra, 28. ábra.

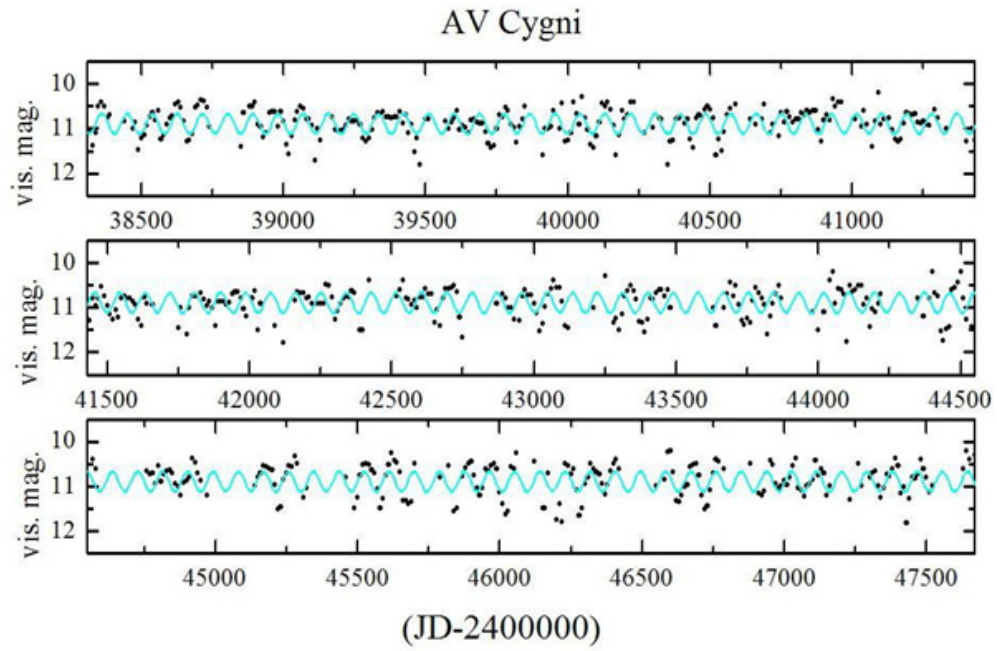
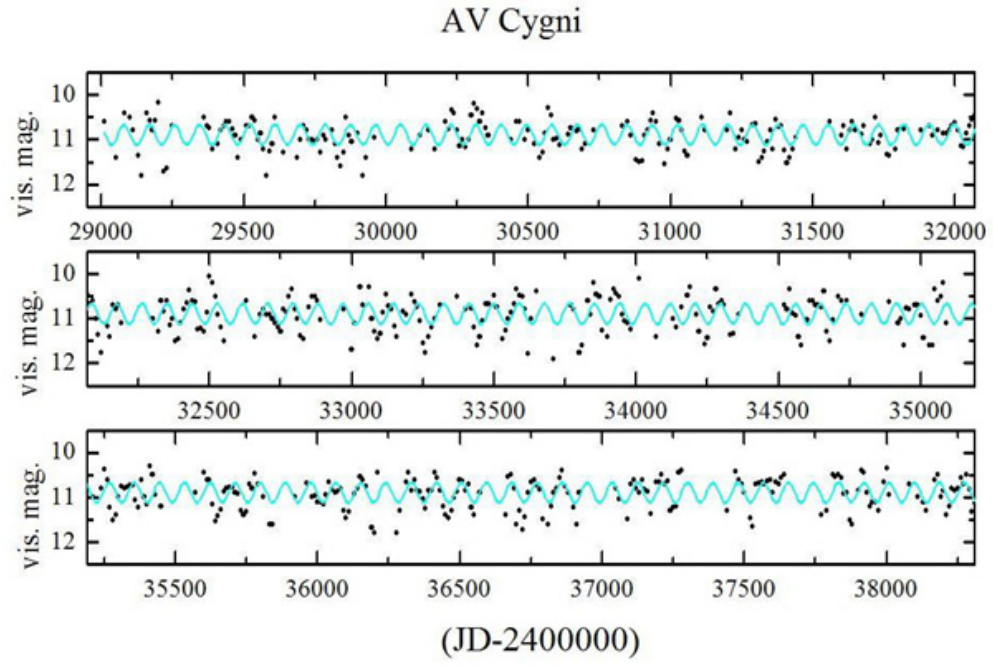
5.6. GT Orionis

Olivier (1958) vizsgálta a csillagot 1934 októbere és 1951 márciusa között végzett mérések alapján, és 86 napos periódust talált.

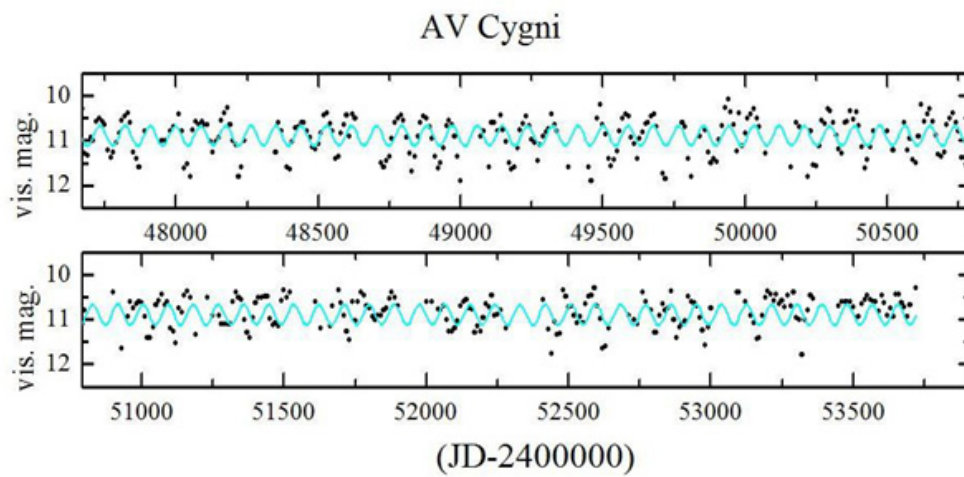
A GT Orionis Fourier-spektruma rendkívül zajos, és nyoma sincs a 86 napos periódusnak, bár az általam használt fénygörbe 1968 januárjában kezdődik. A talált 689.6 napos csúcs éppen hogy csak kiemelkedik: 29. ábra. Fehérítés után a legerősebb csúcsnak egy 8695.6 napos változás maradt. A wavelet teljesen használhatatlan contour térképet szolgáltatott: 30. ábra. Az illesztés két szinusszal jobb lett, de így sem meggyőző az eredmény.

5.7. LR Scorpii

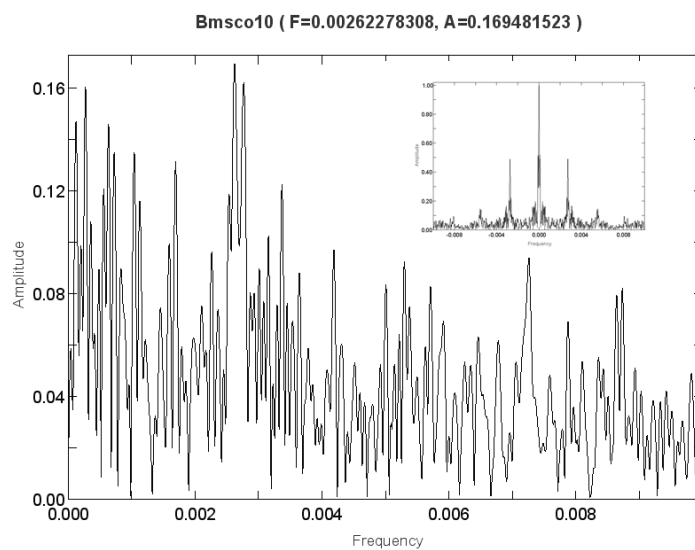
A csillag változását Shapley (1940) fedezte fel 1934-ben, és 104.4 napos periódust állapított meg. Később Stephenson (1978) spektroszkópiával vizsgálta a csillagot, és megállapította, hogy spektruma maximum fényességben hasonlít egy RCrB változóéhoz, azonban minimumban nem mért. Ez alapján Biedelman 1979-ben tévesen az RCrB változók közé sorolta a csillagot. Giridhar (1992) újra megvizsgálta, és megcáfolta az addigi eredményeket. Eredményei alapján az LR Scorpii egy masszív, öreg



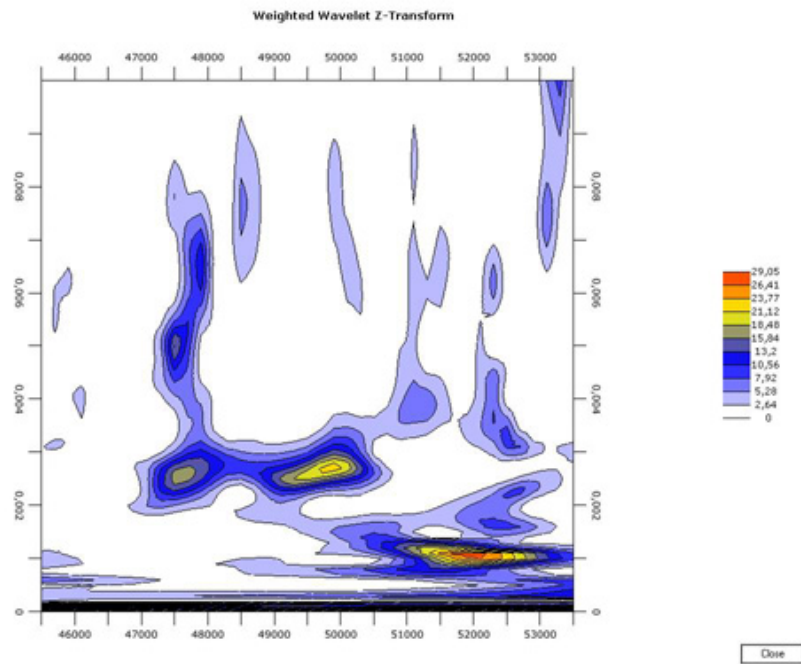
21. ábra. Az AV Cygni 10 napra átlagolt fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 88.4$ nap



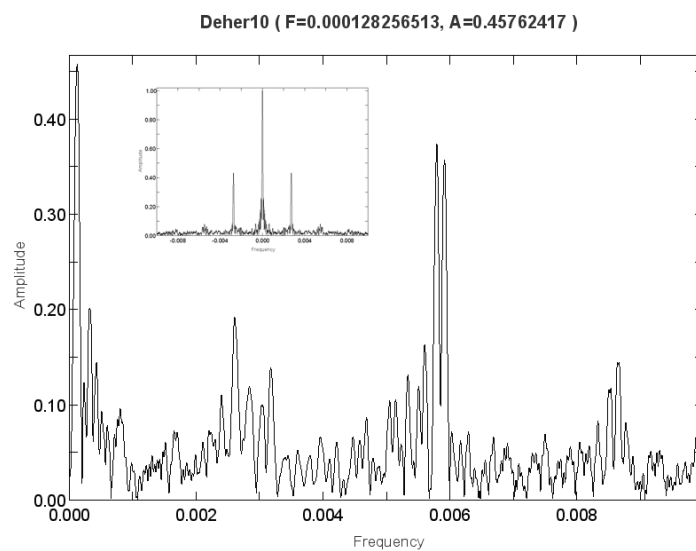
22. ábra. Az AV Cygni 10 napra átlagolt fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 88.4$ nap



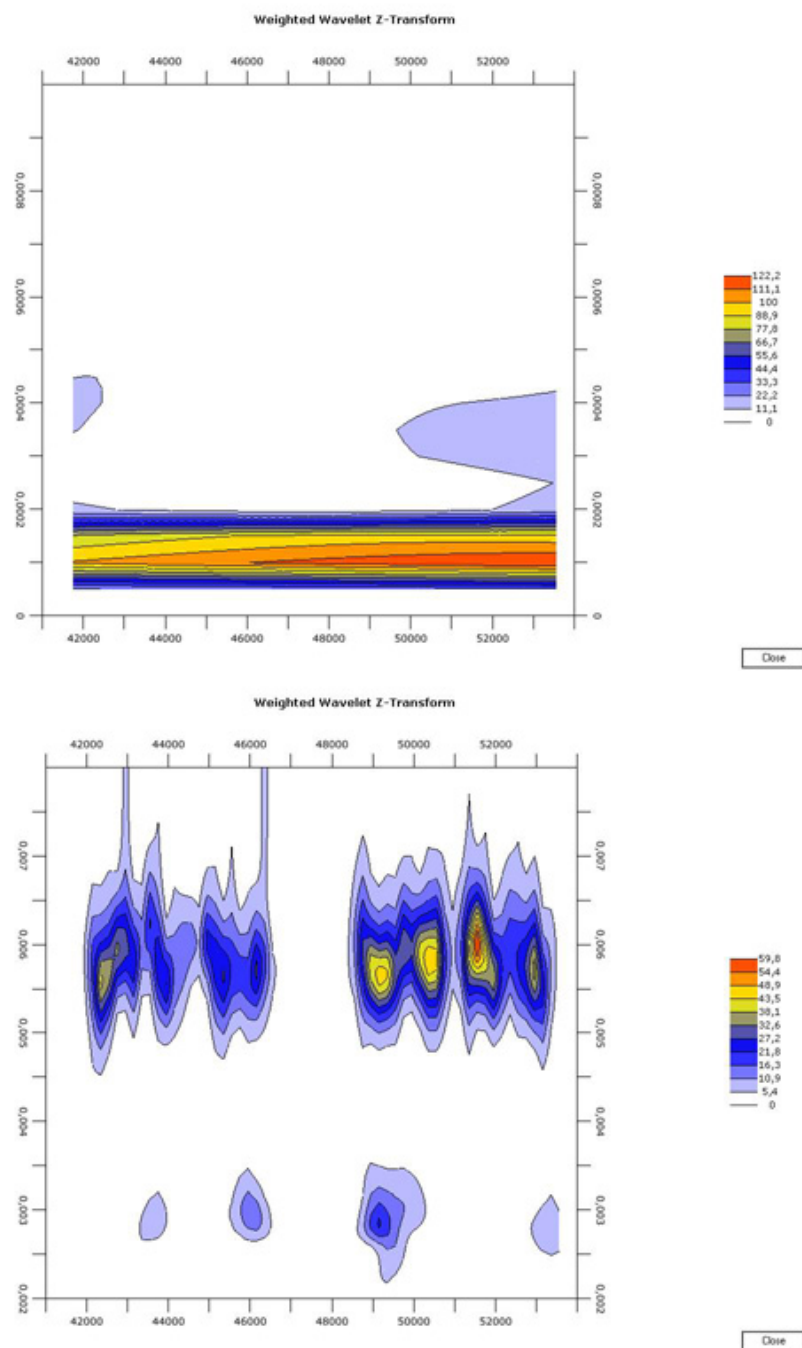
23. ábra. A BM Scorpii Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



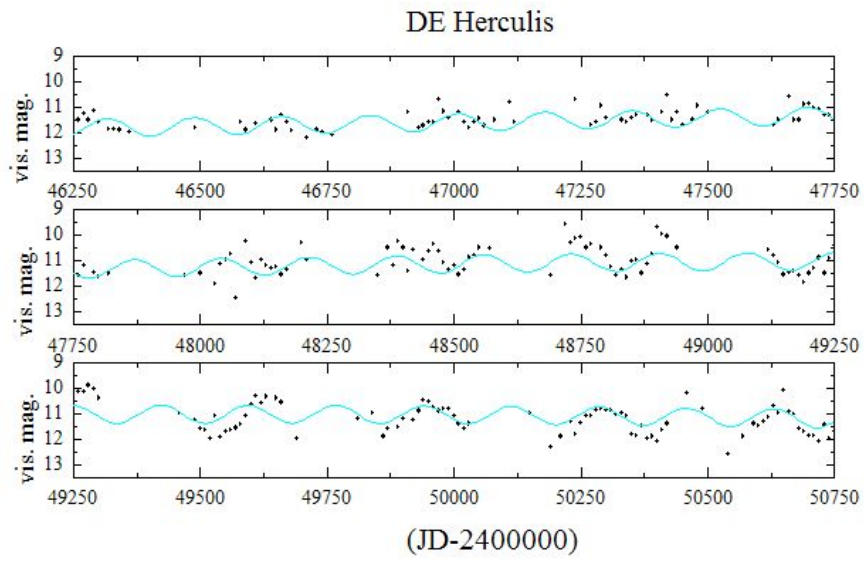
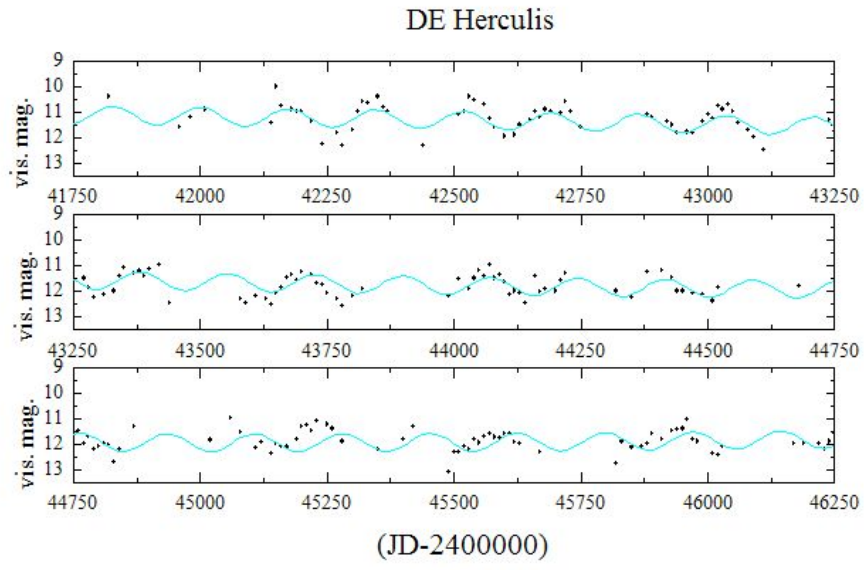
24. ábra. A BM Scorpions contour térképe



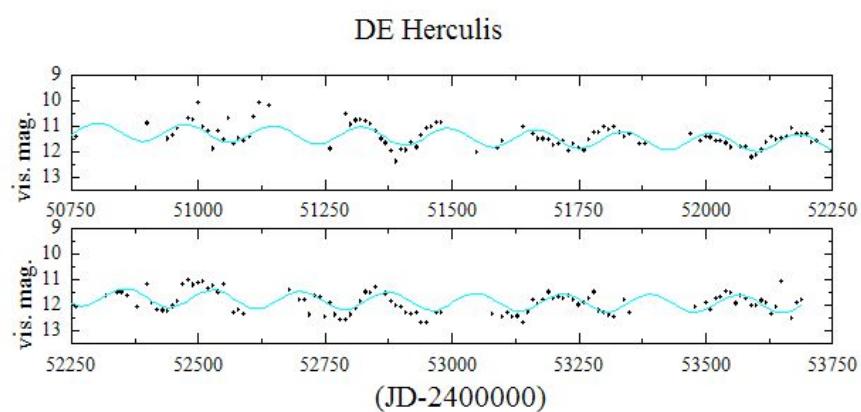
25. ábra. A DE Herculis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



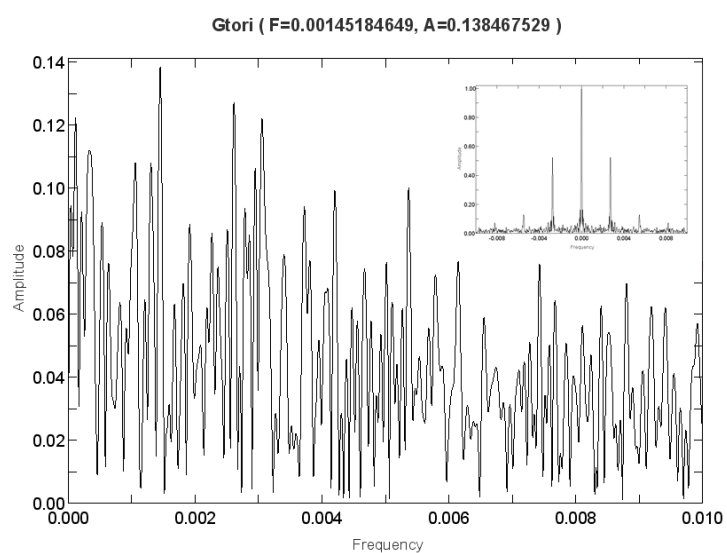
26. ábra. A DE Herculis contour térképe



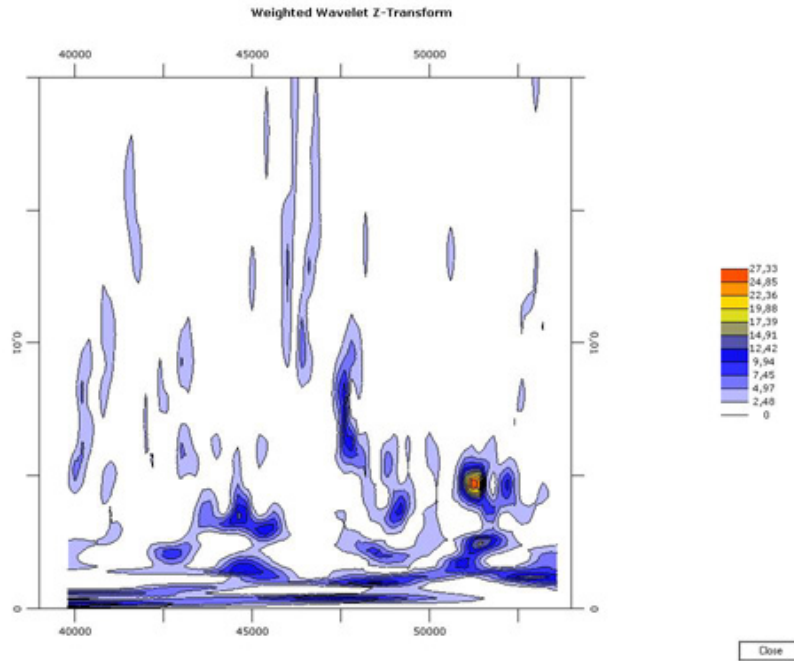
27. ábra. A DE Herculis fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 7936.5$ nap és $P_2 = 172$ nap



28. ábra. A DE Herculis fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 7936.5$ nap és $P_2 = 172$ nap



29. ábra. A GT Orionis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



30. ábra. A GT Orionis contour térképe

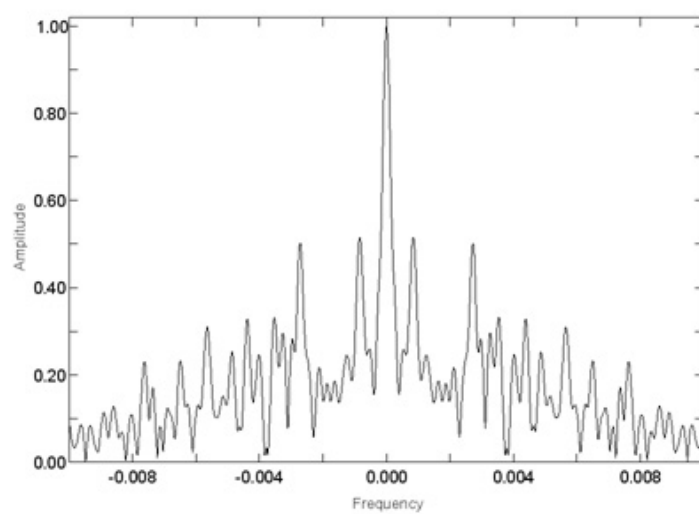
csillag, infravörös többlettel, és egy félszabályos változó. A fémességre $[Fe/H] = -0.3$ -et kapott, a csillag effektív hőmérsékletére 5500 K-t.

Amint a 6.ábrán látható, a csillag Fourier-spektrumának csúcsai eléggé kiszélesedtek. A legmagasabb csúcs 359.7 napnál jelentkezik. A csillagnak nagyon érdekes a spektrálablak függvénye: 31. ábra. Szintén nagyon zajos contour térképet kaptam, ami semmilyen információval se szolgálhatott (32. ábra). A Fourier-transzformációból kapott értékek alapján generált szinusz nem illeszkedett a kevés adatpontra.

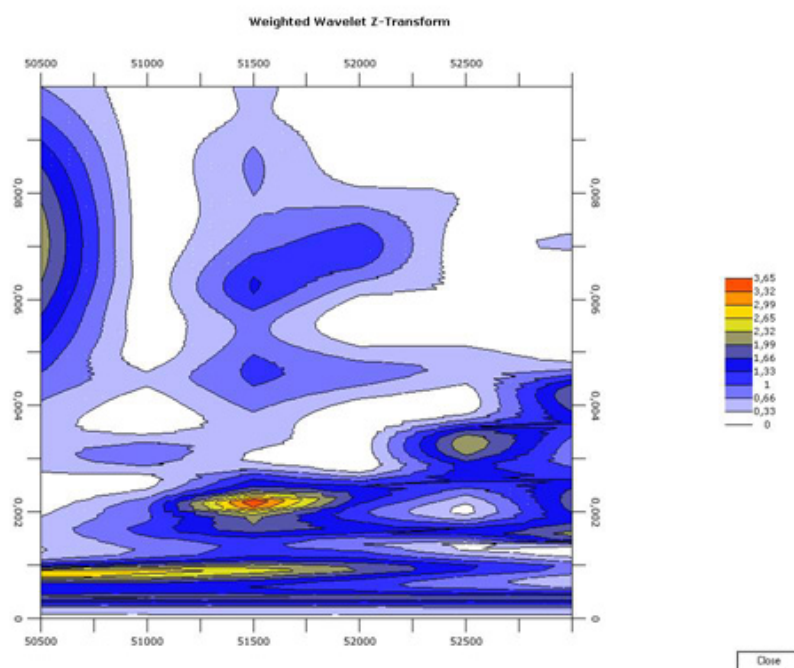
5.8. ρ Cassiopeiae

Sokat vizsgált szuperóriás csillag, valószínűleg a fényessége miatt, és különleges fényváltozása miatt. Gaposchkin 1949-es cikke alapján (GCVS honlap) a csillag fényessége V tartományban 4.4 és 5.2 magnitúdó között változott, majd 1945 novemberétől egy nagyon erős pekuliáris csökkenés következett be a fényességben, ami 165 napig tartott. 1946 szeptemberében érte el a legkisebb fényességet, ami körülbelül 320 napig tartott. Ezután a fényesség a halványodásra szimmetrikusan nőni kezdett, és 1947 júliusára visszatért a "normális" fényességéhez. Fernie et al. (1972) egy körülbelül 320 napos változást talált. Percy et al. (1981) szintén ír az 1945-47-es 1.5 magnitúdós minimumról, ami után a csillagot tévesen RCrB változóként sorolták be. Percy egy körülbelül 400 napos változást talált. A ρ Cassiopae egy szuperóriás csillag, ami Lobel et al.(2003) szerint, aki nagy felbontású spektroszkópiai vizsgálatokat végzett a csillagon, az instabilitás határán van. Ezen kívül Lambert et al. (1981) végzett spektroszkópiai vizsgálatokat a csillagon, és kimutatott egy csillag körüli hűvös héjat.

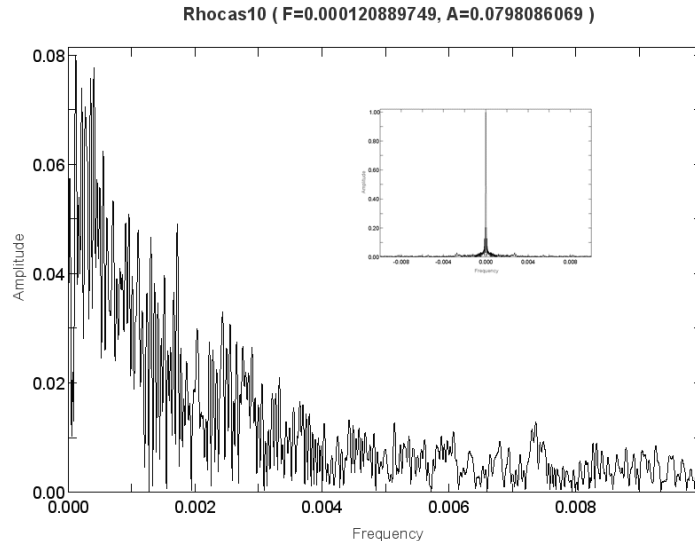
A csillag fénygörbéjében megfigyelhető egy rövid periódusú és kis amplitúdójú



31. ábra. Az LR Scorpii spektrálablak függvénye



32. ábra. Az LR Scorpii contour térképe



33. ábra. A ρ Cassiopeiae Fourier-spektruma és spektárlablak függvénye

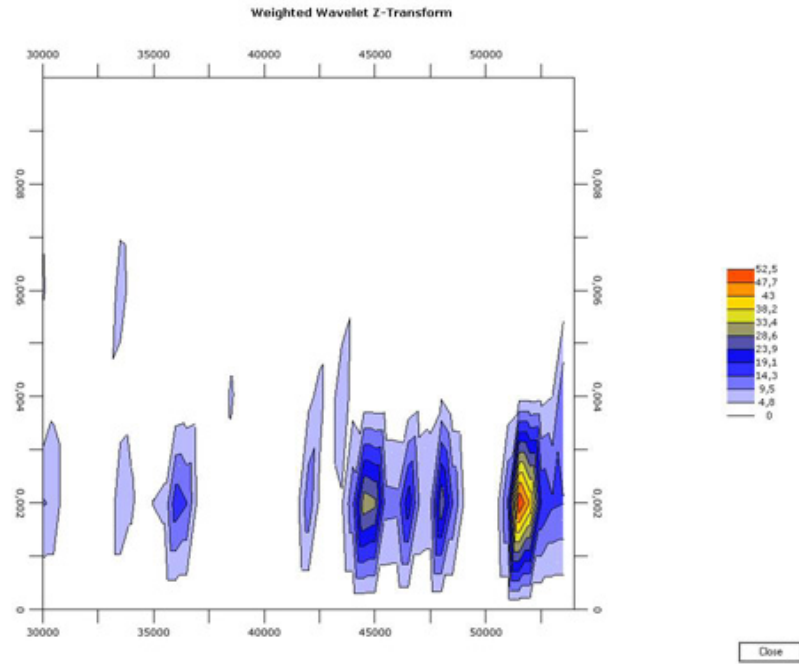
változás, amit se a Fourier, se a wavelet transzformáció nem mutatott ki: 42. ábra. A Rho Cassiopeiae Fourier-spektruma alacsony frekvencián sok éles csúcsot tartalmaz, viszont a magasabb frekvenciák felé a csúcsok kiszélesednek, vagyis egyfajta "lejtő" figyelhető meg a spektrumban: 33. ábra, ami az ún. $1/f$ zajjal áll kapcsolatban.

Fő periódusnak én 8271.3 napot találtam, a 320 napos változásnak nyoma sincsen a spektrumban. Fehérítés után a 2451 napos csúcs maradt legerősebbnek. A wavelet is csak nagyon alacsony frekvenciájú gerinceket talált: 34. ábra. Illesztésnél ezt a két periódust használtam a két szinuszos fitteléshez, de nem kaptam jó eredményt, bár az 1945-ös minimumot például "megtalálta" a generált szinusz is.

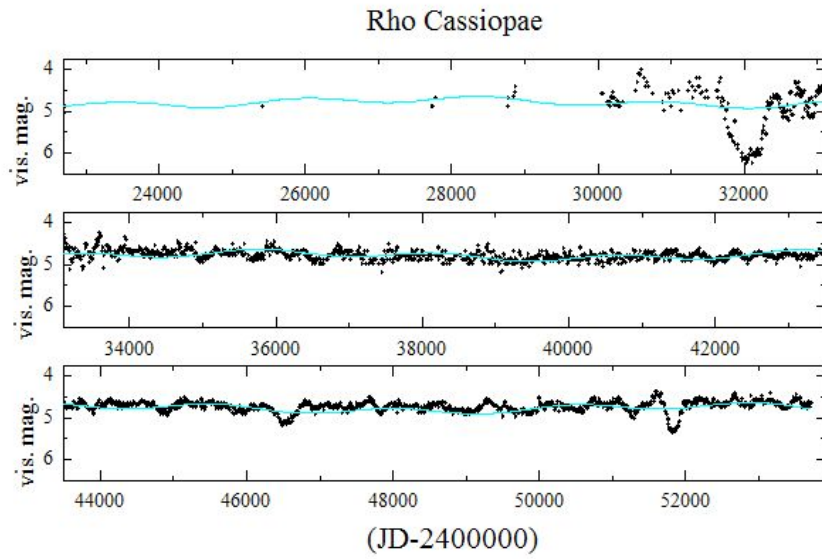
5.9. RS Lacertae

Lacy (1973) vizsgálta először a csillagot, és 237.5 napos periódust talált. Percy et al. (1999) újra analizálta, és a 237.3 napos változás mellett kimutatni vélt egy 7100 napos változást is.

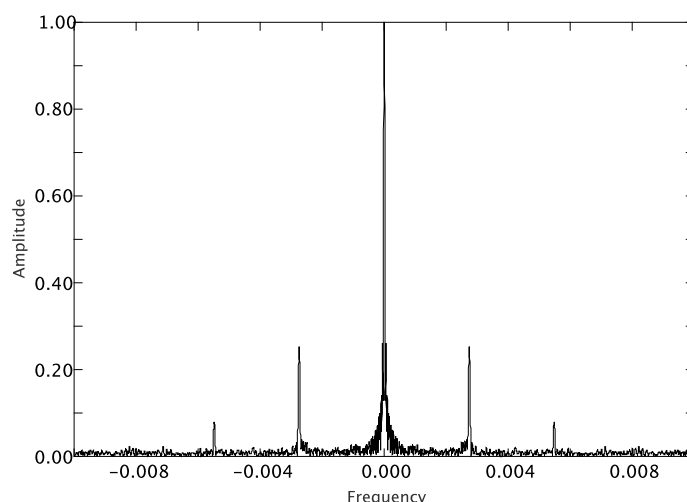
Az RS Lacertae-nek van a vizsgált 25 csillag közül a legszebb, legszabályosabb fénygörbéje, ami miatt a Fourier-spektruma igen szép lett, egy meghatározó csúccsal 0.00421 c/d-nél, ami 237.2 napnak felel meg (5. ábra alsó kép). A spektrumban megfigyelhető egy másik jelentősebb csúcs, ami sokkal gyengébb a 237.2 naposnál. Ennek értéke 33333.3 napnak felel meg. A 7100 napos változásnál nincsen jelentős csúcs. A spektárlablak függvény: 36. ábra. A csillag, illetve az eredeti időpontokban generált szinusz függvény contour térképét már láthattuk: 10. ábra. Megfigyelhető, hogy az RS Lacertae contour térképében alig található az analízisből származó effektus, a 237.2 napos periódus stabil, egyenletes. Illesztésnél egy szinuszt használtam: 37. ábra.



34. ábra. A ρ Cassiopeiae contour térképe



35. ábra. A ρ Cassiopeiae fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 8271.3$ nap és $P_2 = 2451$ nap



36. ábra. Az RS Lacertae spektrálablak függvénye

5.10. RU Cephei

Dawson (1979) vizsgálata alapján a fő periódus 109 nap, Percy et al. (2000) szintén ezt a periódust találta. Dawson fizikai paramétereit is meghatározott: effektív hőmérséklet 3620 K, tömeg $1.21 M_{\odot}$, valamint a fémesség $[Fe/H] = -1.0$.

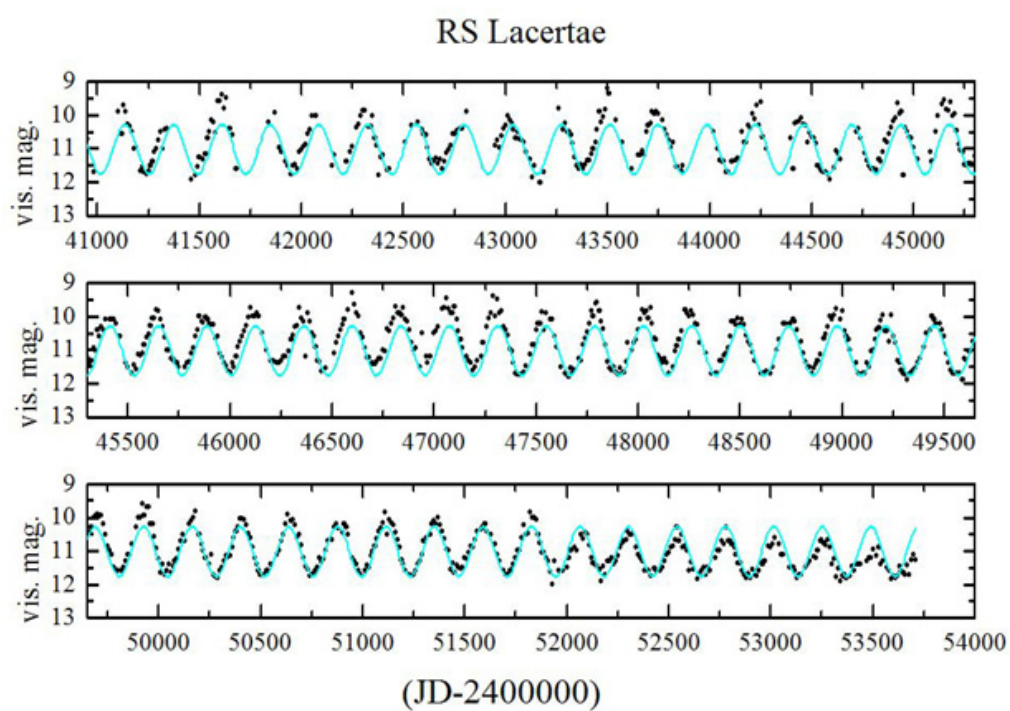
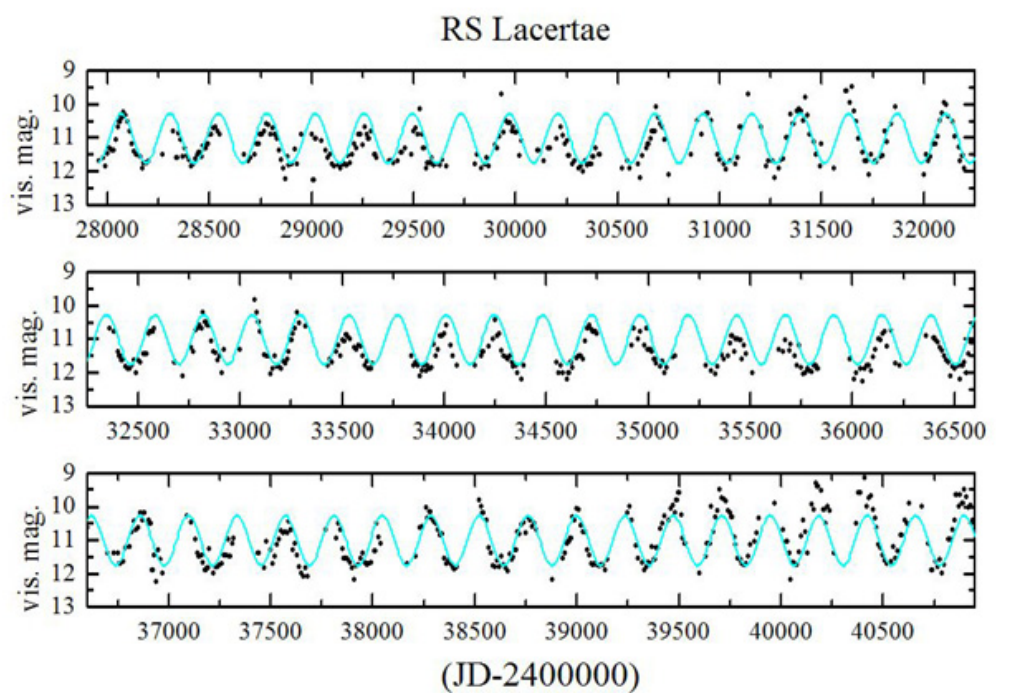
A RU Cepheinek érdekes Fourier-spektruma van, három közel azonos erősségű csúccsal: 38. ábra.

A legerősebb csúcs 108.8 napnál jelentkezik, míg a másik kettő csúcs 518.1 és 25000 napnak felel meg. Fehérítés után a 25000 napos változás frekvencia csúcsa marad a legerősebbnek, ám érdekes módon a két szinuszos illesztésnél az 518.1 napnak megfelelő frekvenciát használva jobban illeszkedett a fénygörbére: 40. ábra, 41. ábra. A wavelet megtalálta mindhárom értékhez tartozó csúcsot, de egyik se domináns: 39. ábra.

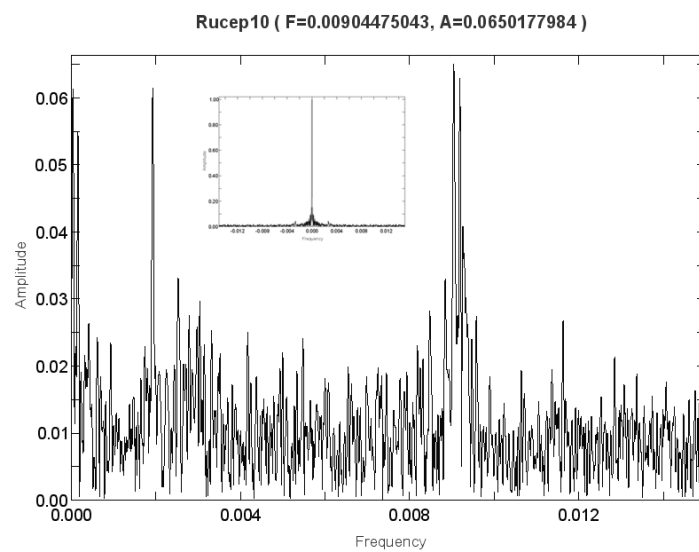
5.11. RW Cephei

A ρ Cassiopeiae-hez hasonló szuperóriás csillag. Payne-Gaposchkin 1952-es cikke alapján (GCVS honlap) a periódus 346 nap.

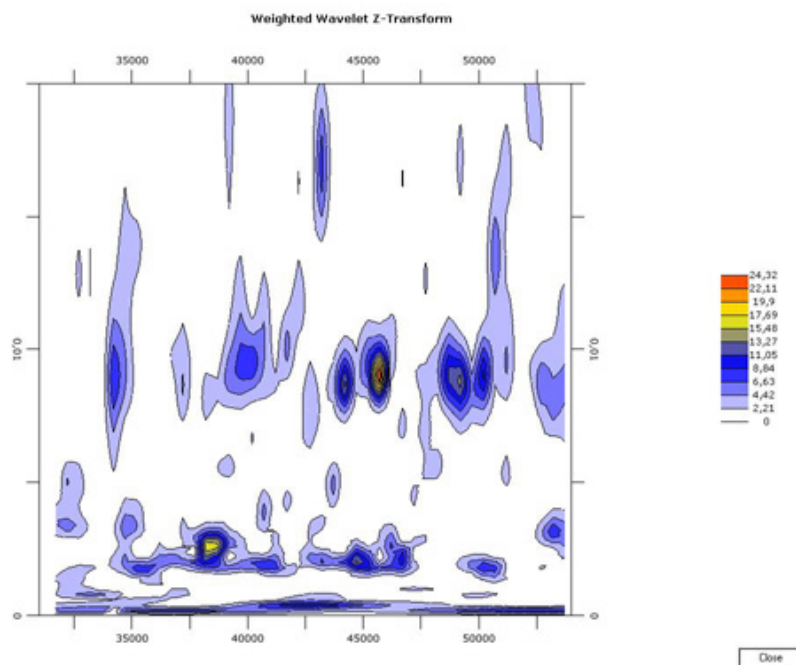
Érdekes módon a Fourier-spektruma szerkezete nagyon hasonló a ρ Cassiopeiae-hez, bár az RW Cephei spektrumában sokkal kevesebb az erős, alacsony frekvenciájú csúcs. Az általam számolt spektrumban a 346 napos csúcsnak nyoma sincsen. Három nagyon erős csúcs jelenik meg alacsony frekvencián, ezek közül a 11494 napos a legerősebb, és egy gyengébb 469.5 napnál: 7. ábra. A spektrálablak függvény hasonló a RU Cepheiéhez: 42. ábra. Fehérítés után (8. ábra) a 2352.9 napnak megfelelő csúcs marad legerősebbnek. A contour térképen is jelentkeztek a kis frekvenciás csúcsok, de közülük egyik se volt domináns (43. ábra). Illesztésnél két szinuszt használtam, és hasonló lett a helyzet, mint a ρ Cassiopeiae-nél, mivel ennél a csillagnál is van egy rövidebb változás, amit nem sikerült illeszteni.



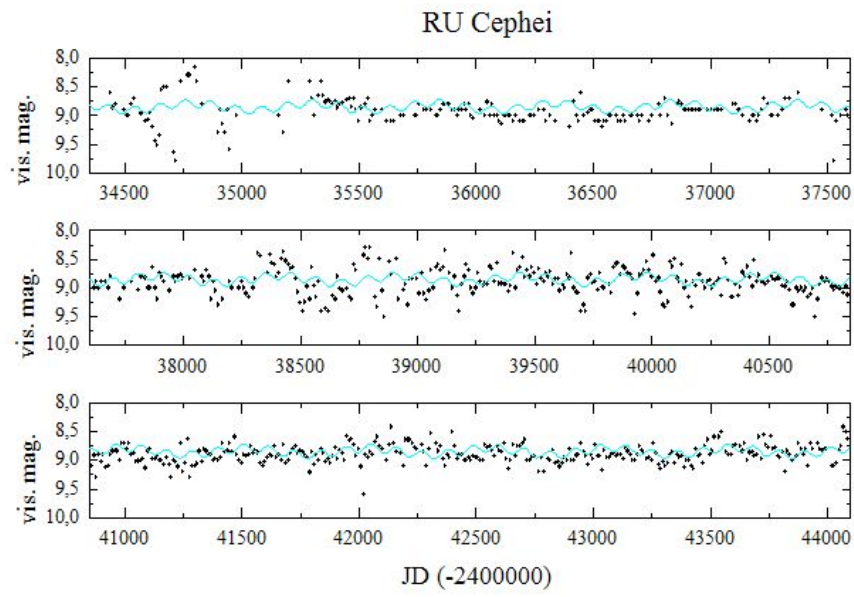
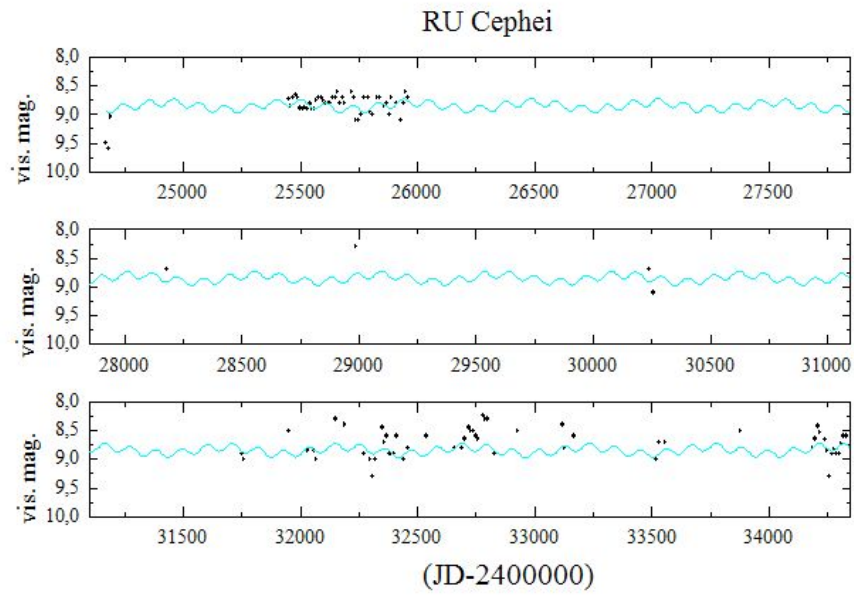
37. ábra. Az RS Lacertae 10 napra átlagolt fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 237.2$ nap



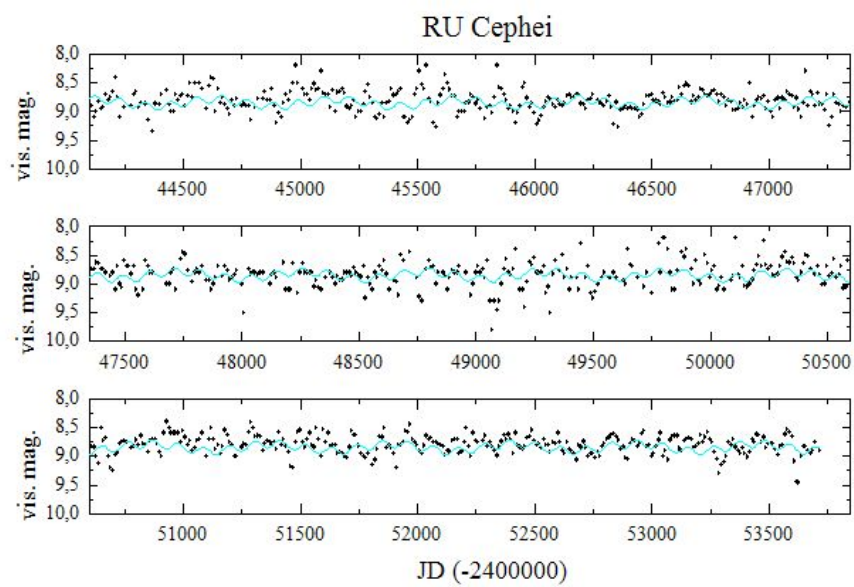
38. ábra. A RU Cephei Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



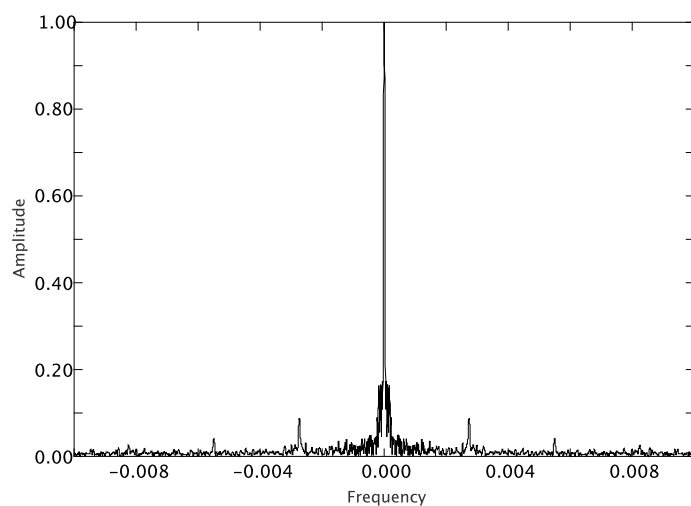
39. ábra. A RU Cephei contour térképe



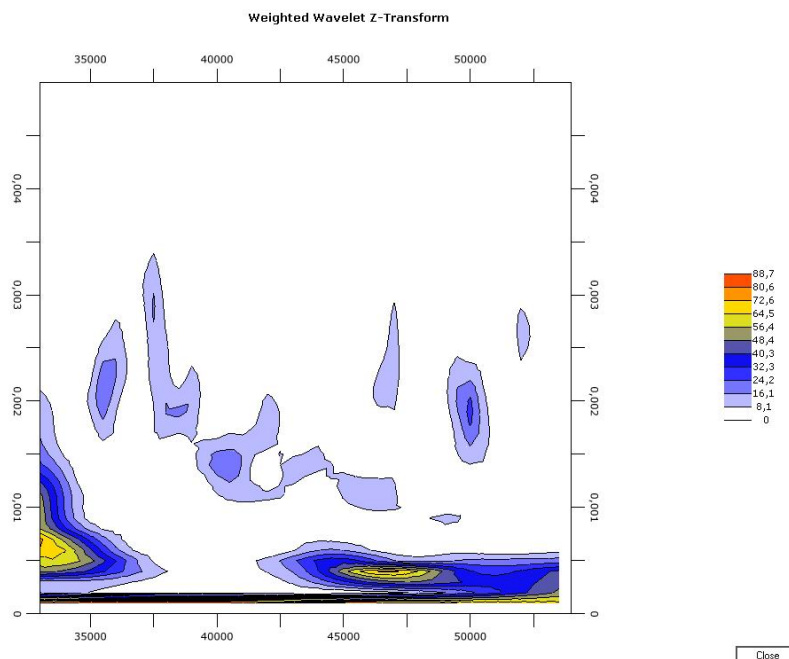
40. ábra. A RU Cephei fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 108.8$ nap és $P_2 = 518.1$ nap



41. ábra. A RU Cephei fénygörbéje és a rá illesztett két szinusz, $P_1 = 108.8$ nap és $P_2 = 518.1$ nap



42. ábra. Az RW Cephei spektrálablak függvénye



43. ábra. Az RW Cephei contour térképe

5.12. RX Reticuli

Nem találtam olyan cikket, ami a csillag fényváltozásával foglalkozott, és a GCVS sem adott meg ismert periódust.

Az RX Reticulinak nagyon rövid adatsora volt, emiatt a Fourier-spektrum is rendkívül zajos lett. Az 547 napos csúcs csak kicsit emelkedik ki a többi közül: 44. ábra. A wavelet térkép se használható: 45. ábra. Illesztés nem szolgáltatott olyan szinuszt, amelyik követné a fénygörbét.

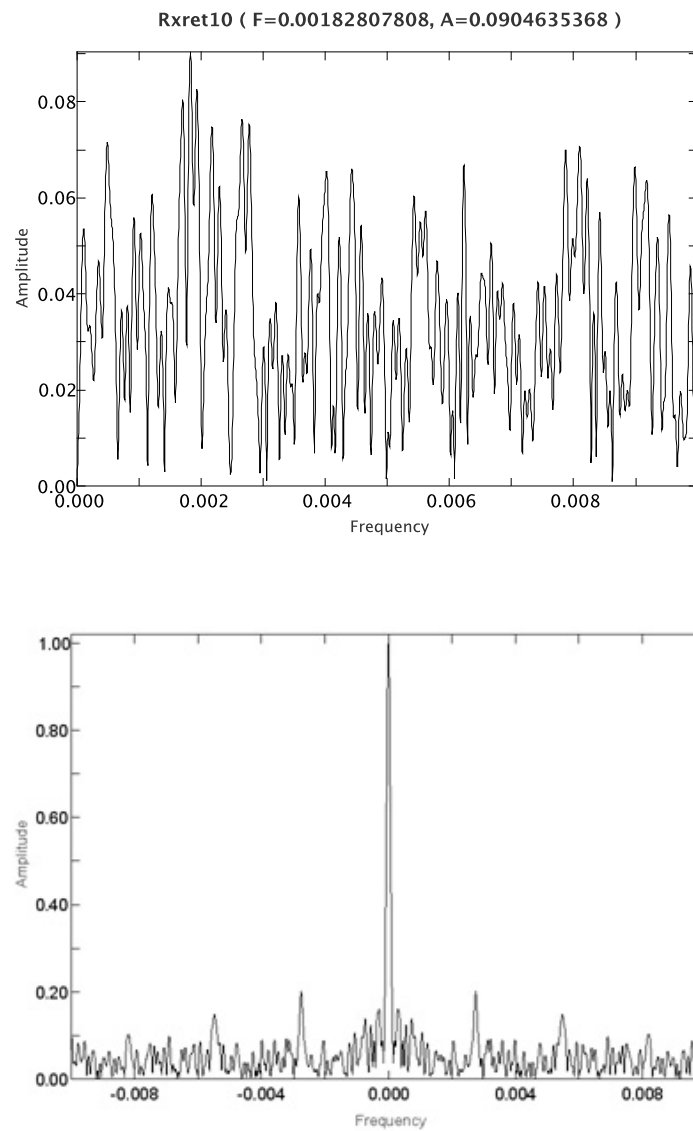
5.13. SV Ursa Majoris

A csillagot először Joy vizsgálta (1952), és 76 napos periódust állapított meg, bár úgy jellemezte a csillagot, hogy a fényváltozása kissé irreguláris, a periódus pedig változó. Giridhar et al. (1998) spektroszkópiai vizsgálatokat végzett, és meghatározta a fémességet $[Fe/H] = -1.4$.

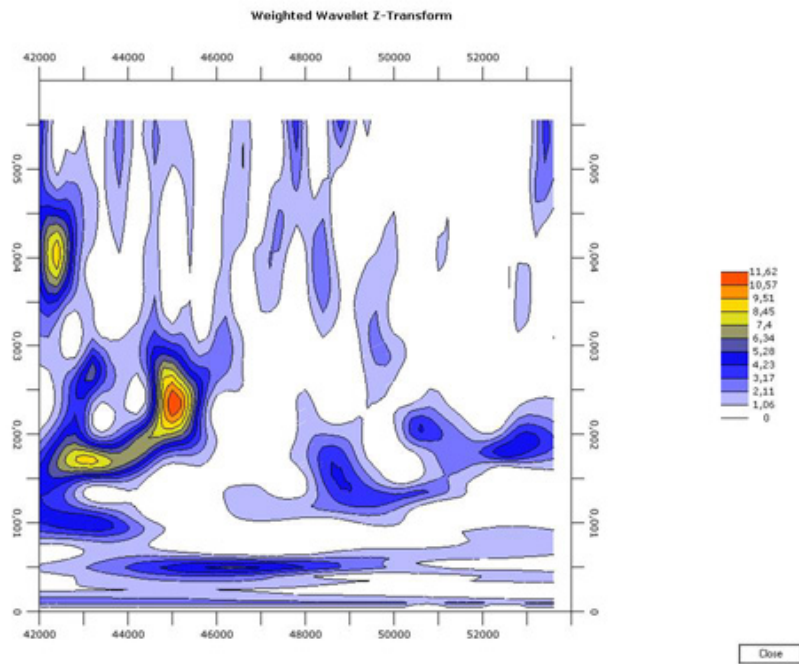
Rövid adatsorral rendelkeztem, ezáltal a Fourier-spektrum megint csak nagyon zajos lett. Az 1709.4 napos csúcs kicsit emelkedik ki a jelentős fűből: 46. ábra. A wavelet sem találta meg a rövid periódust: 47. ábra. Az illesztett szinusz nem követte a fénygörbét.

5.14. SX Herculis

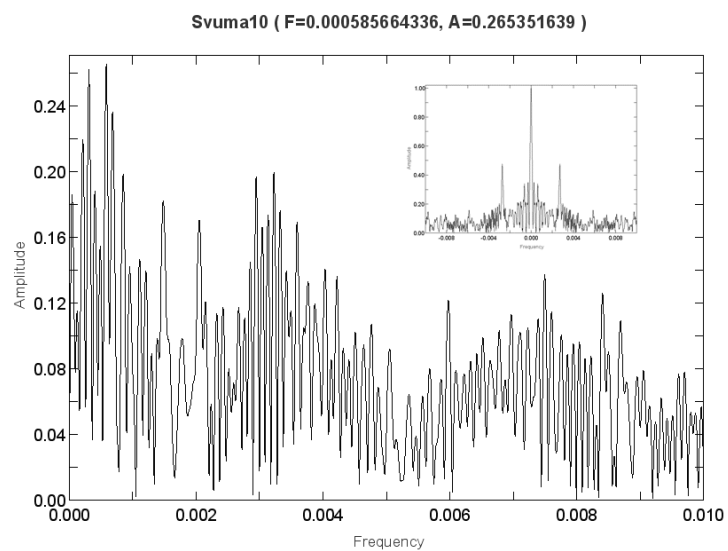
Szintén Joy vizsgálta a csillagot először (1952), 103 napos periódust találva. Dawson (1979) 106.89 naposnak találta a fő változást, ezen kívül pedig meghatározta a fémességet $[Fe/H] = -1.4$, az effektív hőmérsékletet $= 3975$ K, valamint a tömeget $= 1.08 M_{\odot}$. A GCVS alapján a periódus 102.9 nap, amit Percy et al. (2004) auto-korrelációs



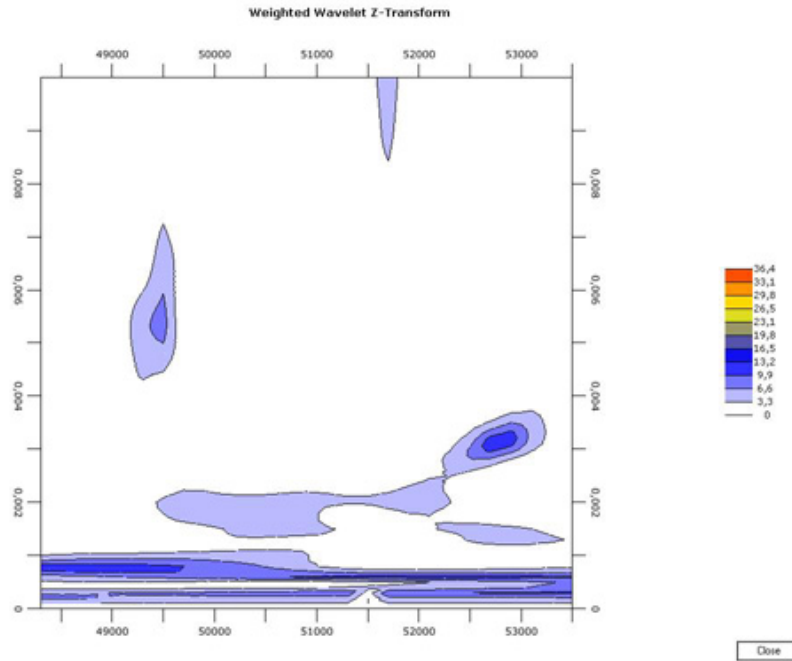
44. ábra. Az RX Reticuli Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



45. ábra. Az RX Reticuli 10 napra átlagolt adatsorának contour térképe



46. ábra. Az SV Ursa Majoris Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



47. ábra. Az SV Ursa Majoris contour térképe

módszerrel szintén megkapott. Ő a csillagot magas fokú regularitással jellemezte, és fényváltozásának menetét az AV Cygni fényváltozásához hasonlította.

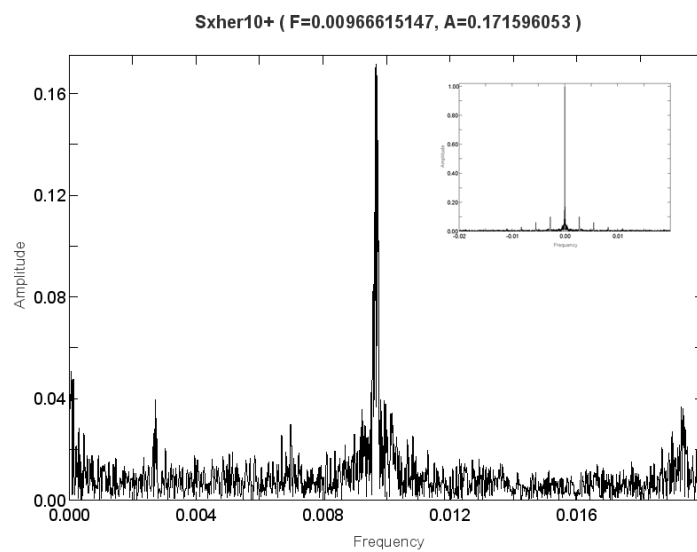
Valóban, az SX Herculis ebben a tulajdonságában hasonlít az AV Cygnire. A Fourier-spektruma a következőképpen néz ki: 48. ábra. Határozott csúcs 103.1 nap maximummal, kisebb mellékcúcsokkal. Aliasok nincsenek.

A contour térképen a körülbelül 103 napos változásnak szép, szabályos a gerince: 49. ábra. Az illesztett szinusz szépen követi a fényváltozást, mindössze néhány helyen csúszik el egy kicsit a fénygörbéhez képest: 50., 51., 52. ábra.

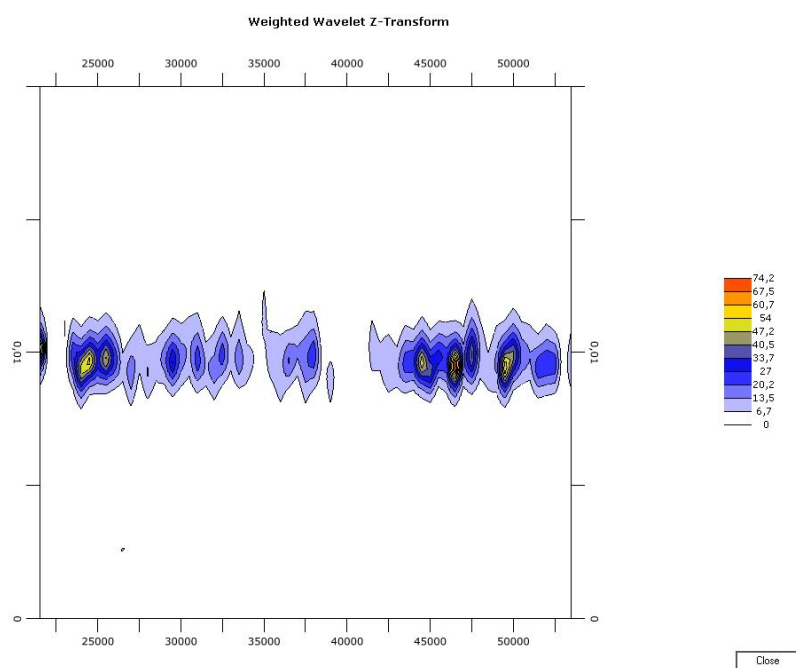
5.15. TV Persei

Egyetlen referencia (GCVS), ahol csak annyit írnak a csillagról, hogy 1080 napos periódust találtak.

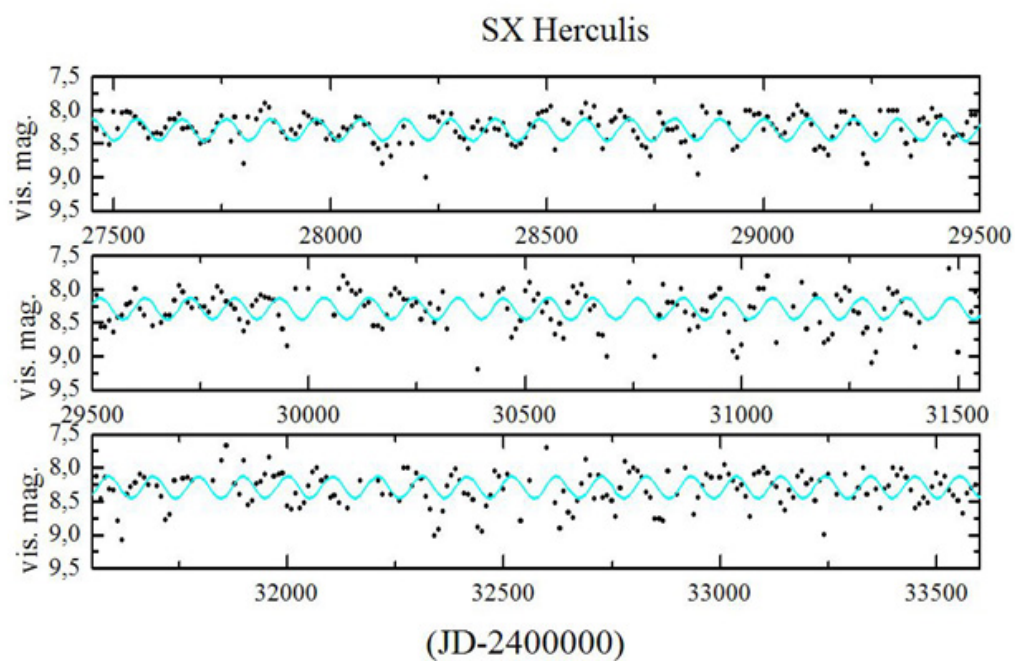
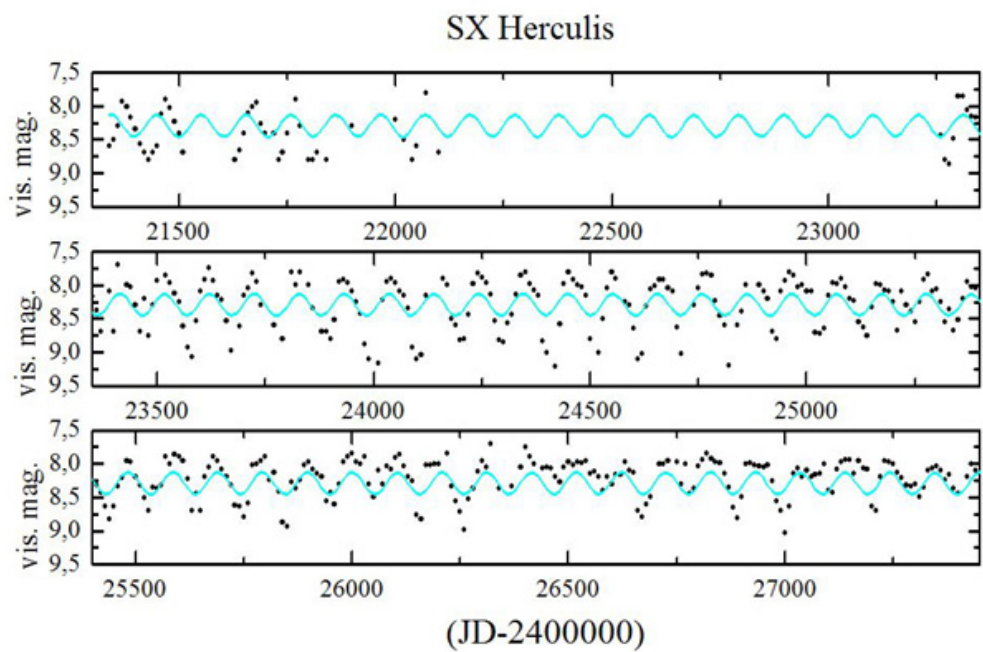
A Fourier-analízis során nem találtam az 1080 napnak megfelelő jelentős csúcsot. Ellenben egy nagyon hosszú periodusú változás 23255 nap környékén adja a legerősebb csúcsot. Ez a változás, nem biztos hogy reális, ugyanis a TV Perseinek eléggé egyedi a fénygörbéje: 53. ábra. Látható egy magányos pont 35100-nál, ami eléggé kilóg. Megvizsgáltam, hogy ha kivesszük, akkor is változatlan marad-e a Fourier-spektrum. A pont kivétele nem változtatta meg a Fourier-spektrumot (54. ábra). Amikor az illesztéshez akartam kiszámolni ennek a változásnak a periódusát, az amplitúdóját, és fázisát, akkor nem kaptam olyan eredményt, ami jól követte a fénygörbét. A wavelet se használható: 55. ábra.



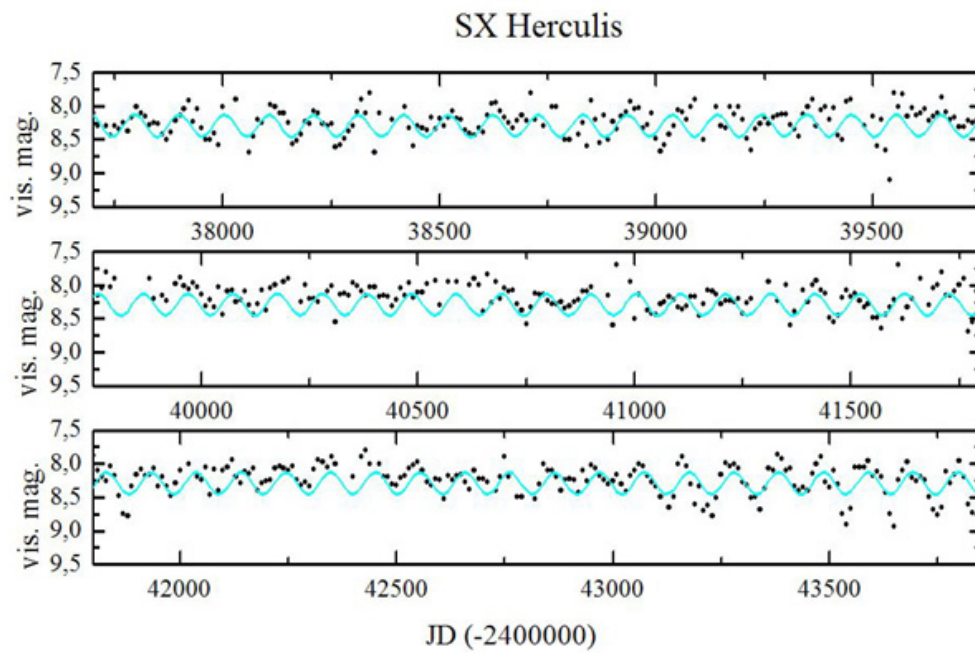
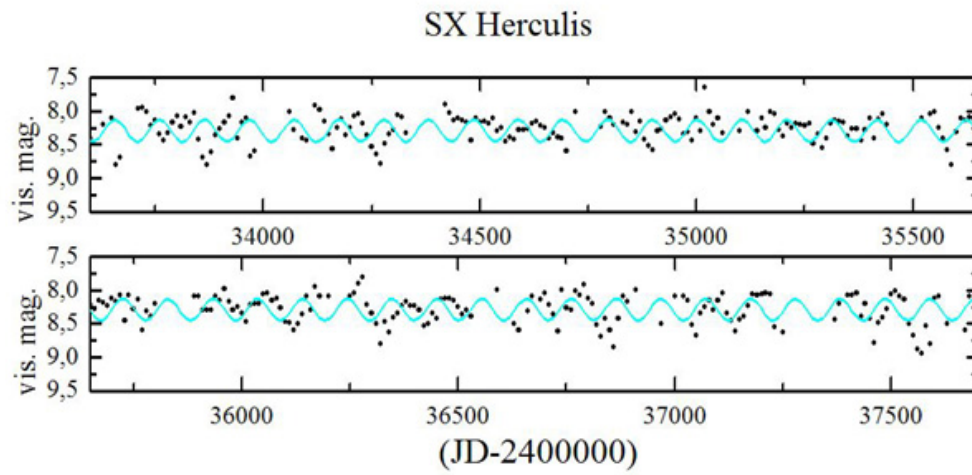
48. ábra. Az SX Herculis Fourier-spektruma és spektrál ablak függvénye



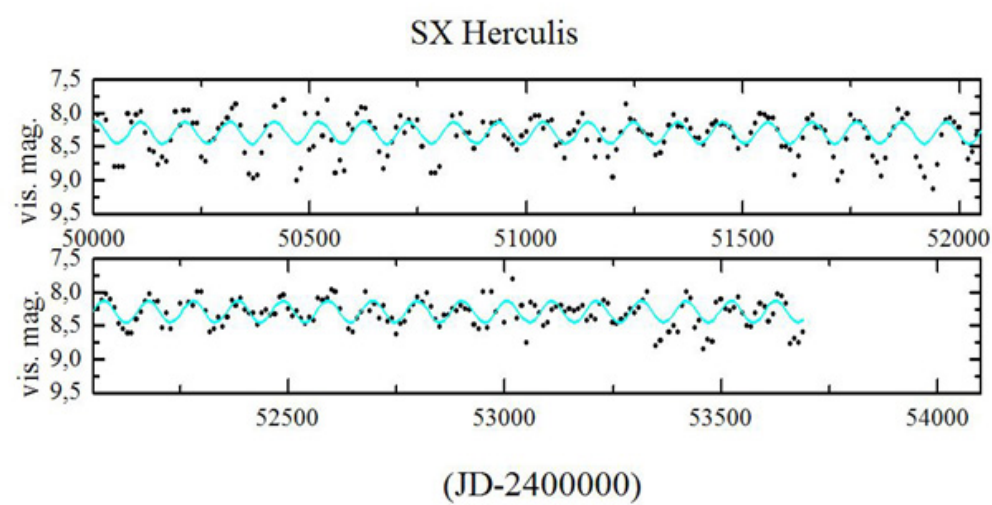
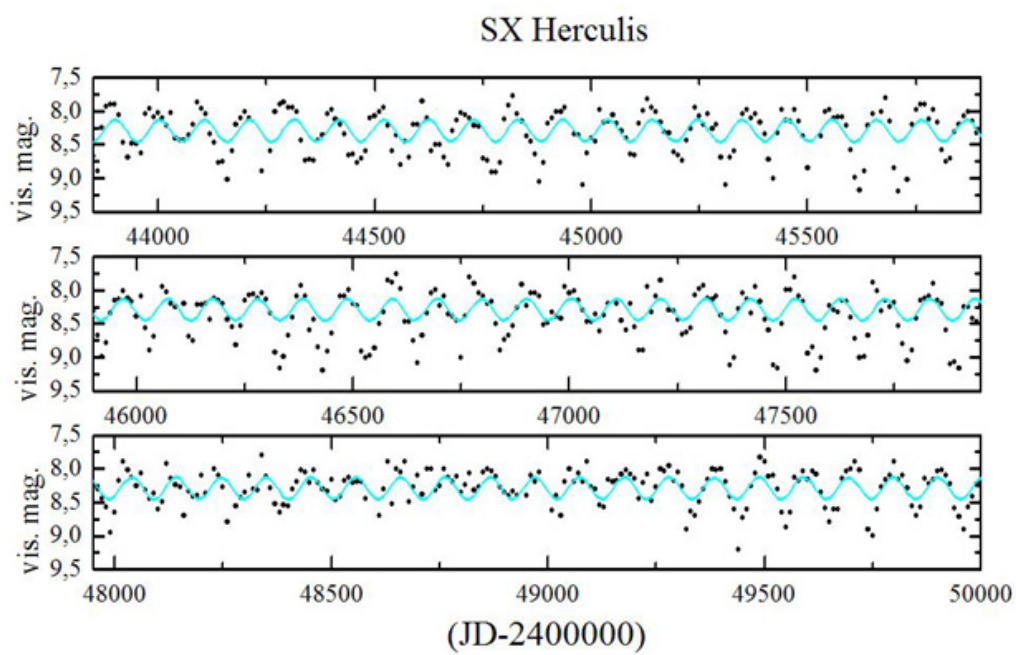
49. ábra. Az SX Herculis contour térképe



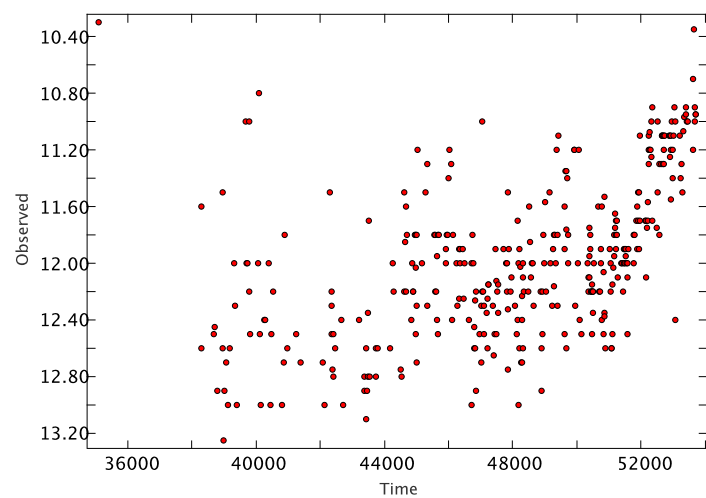
50. ábra. Az SX Herculis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 103.1$ nap



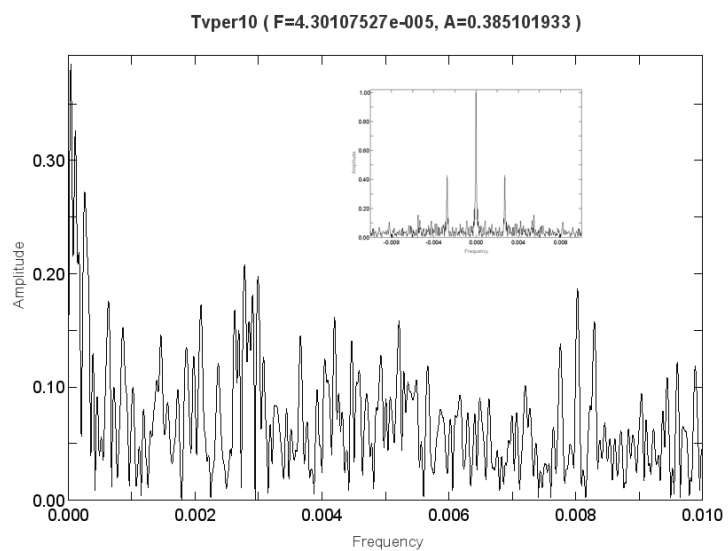
51. ábra. Az SX Herculis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 103.1$ nap



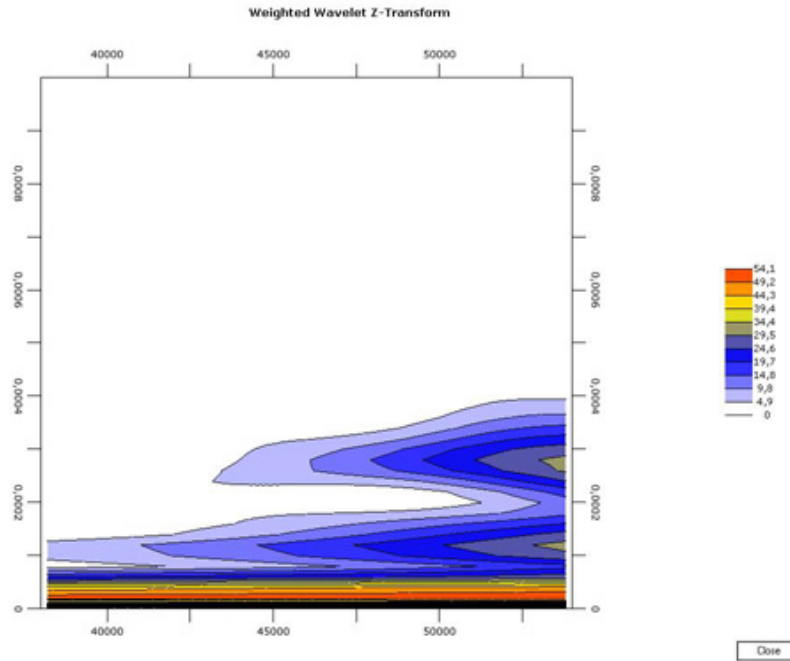
52. ábra. Az SX Herculis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 103.1$ nap



53. ábra. A TV Persei 10 napra átlagolt fénygörbéje



54. ábra. A TV Persei Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



55. ábra. A TV Persei contour térképe

5.16. TZ Cephei

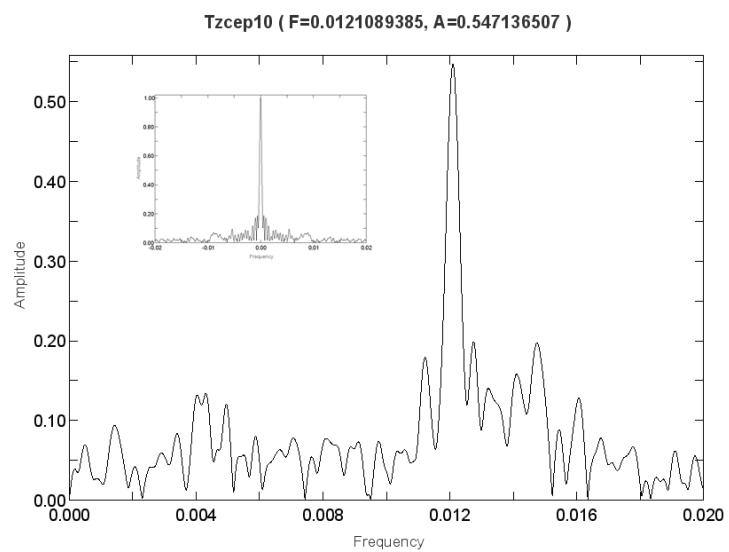
A csillagot először Beyer (1937) említi meg, mint Mira típusú változót rövid periódussal: 83.3 nap. Szintén 83 napos periódust mutat ki Joy (1952).

Az általam használt adatsor kevés pontból állt, így a Fourier-spektrum csúcsai eléggé szélesek voltak. Ennek ellenére egy rendkívül határozott csúcs jelent meg 0.012109 c/d frekvenciánál, ami 82.6 napnak felel meg (56. ábra). A TZ Cephei fényváltozása eléggé szabályosnak mondható, stabil periódussal. A contour térkép szépen mutatja a körülbelül 83 napnak megfelelő gerincet, ami azonban nem egyenes, hanem ív: 57. ábra. Ennek az ívnek a következménye, hogy a csúcs a Fourier-spektrumban ki volt szélesedve. A generált szinusz illeszkedik a fénygörbére, de az amplitúdó itt is elmarad a valóságtól: 58. ábra.

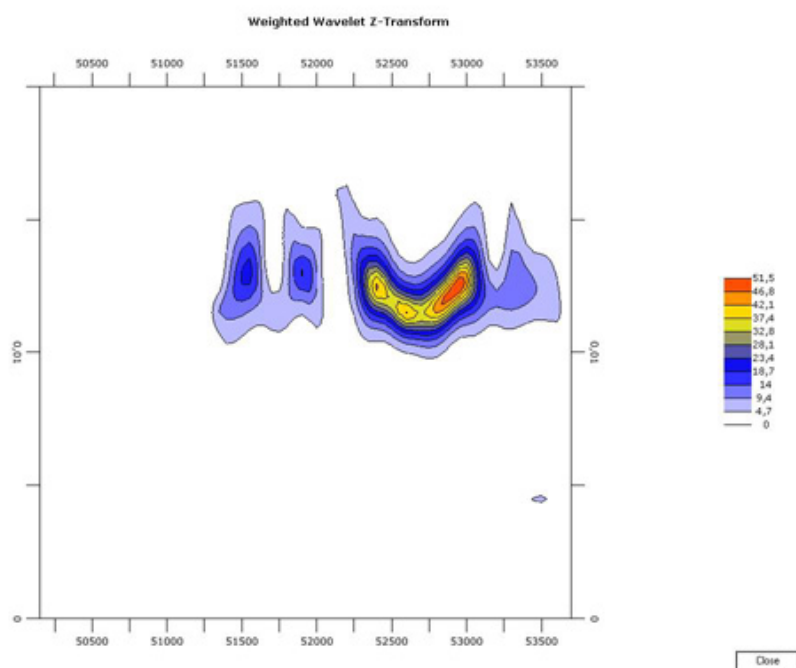
5.17. UU Herculis

Az UU Herculis egy prototípusa az SRd változók egy alcsoportjának, ahol kétmódusú pulzáció lép fel. Joy (1952) még csak egy periódust talált 71 nap hosszúsággal, Dawson (1979) ellenben már egymást váltó periódusokról ír. Zsoldos et al. (pl. 1993) több cikket is írt a csillagról. Ő határozta meg a két periódus értékét: 45 és 72 nap, ahol a hosszabb periódus az alapmódus, míg a rövidebb az első felhang. Szerinte a 72 napos változás tűnik stabilabbnak. A csillag fémessége GCVS alapján $[Fe/H] = -1.27$.

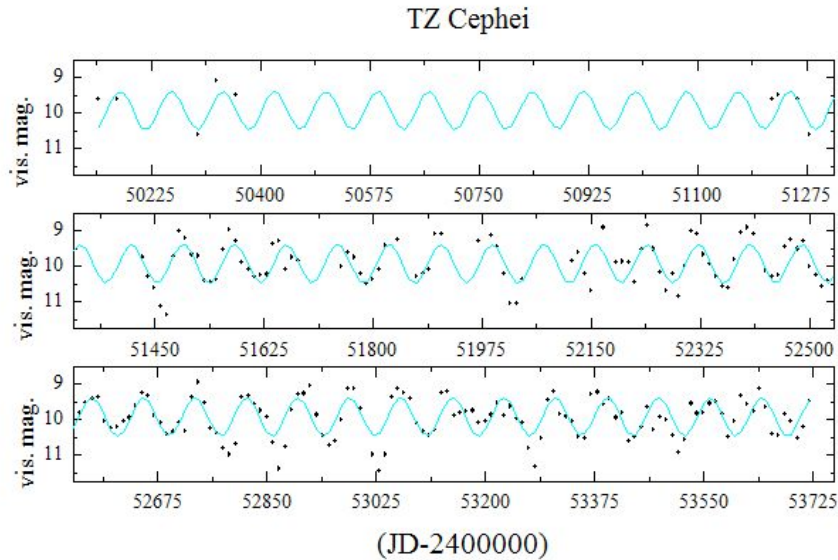
A számolt Fourier-spektrumban a 45 napos periódus volt valóban a legerősebb, ám a második legerősebb csúcs 1063.8 napnál jelentkezett. Sőt a Period04 kimutatott még egy csúcsot 1851.8 napnál is. A körülbelül 73 napos változás csúcsai csak a negyedik legerősebbek voltak a spektrumban (59. ábra). Fehérítés után az 1063 napos csúcs marad legerősebbnek. A wavelet eredménye egy zajos contour térkép,



56. ábra. A TZ Cephei Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



57. ábra. A TZ Cephei contour térképe



58. ábra. A TZ Cephei fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 82.6$ nap

ahol egyik periódusnak sincs határozott, folytonos gerince (60. ábra). Az illesztésnél két szinuszt használtam, a 45 és az 1063 napos periódusokkal. Ezt a két periódust használva a fittelés jobban követte a fénygörbét, mint az egy szinuszos.

5.18. UY Canis Majoris

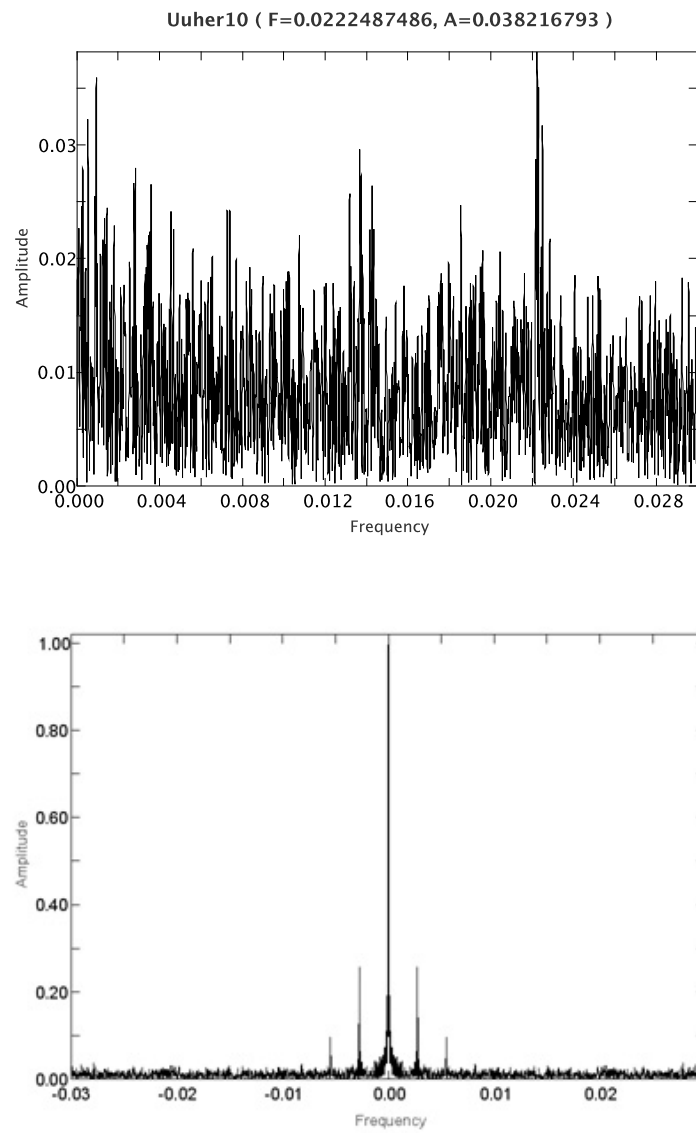
Erleksova 1971-ben (GCVS honlap) a csillag fényváltozására 114.6 napos periódust talált.

A Fourier-transzformáció 5263 napos változást talál a legerősebbnek, két közel azonos magasságú csúccsal: 61. ábra. Fehérítés után a két csúcs eltűnik, és a 548.8 napos csúcs válik a legerősebbé. A contour térkép hasonló az UU Herculiséhez, itt sincs határozott gerinc (62. ábra). A két szinuszos illesztés során nem kaptam meggyőző eredményt, főleg az amplitúdó tekintetében, ami messze elmaradt a fénygörbe amplitúdójától.

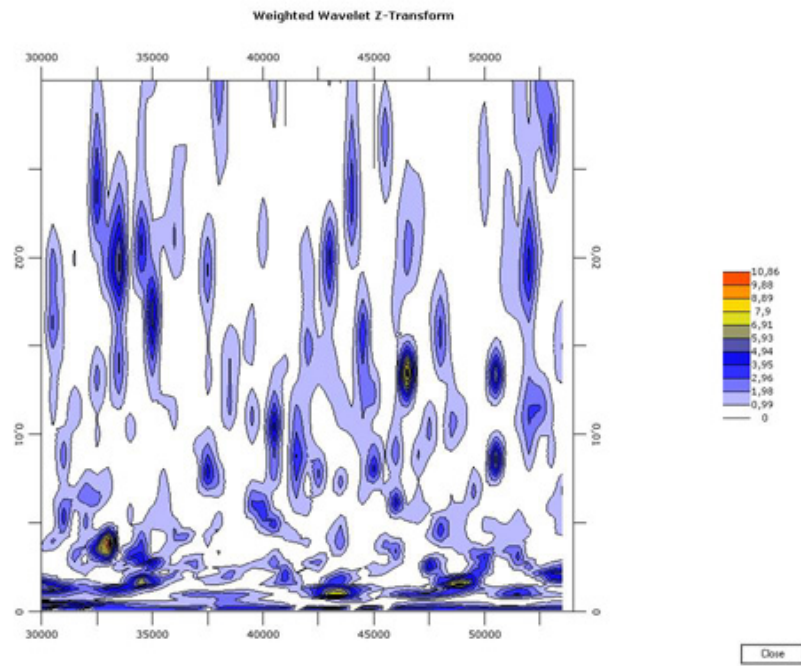
5.19. V441 Herculis

Az UU Herculis alcsoport egyik képviselője (Zsoldos et al., 1993), másnéven 89 Herculis. Fernie et al. (1981) fotometriai vizsgálatai alapján a fő periódus 68 nap. A csillagot valószínűleg nemradiális pulzáció jellemzi. Ezen kívül kimutatható egy cirkumsztelláris környezet.

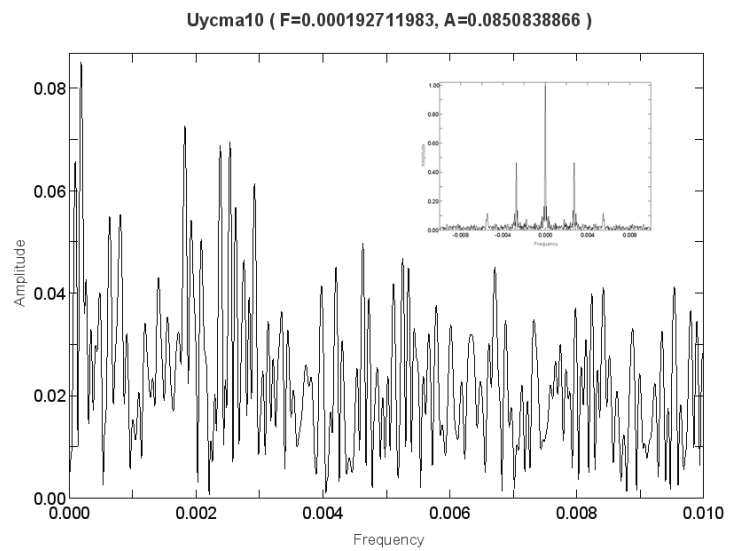
A V441 Herculis tipikusan olyan csillag, amit csak pontos fotometriával lehet mérni, mivel fényváltozásának amplitúdója mindössze néhány század magnitúdó.



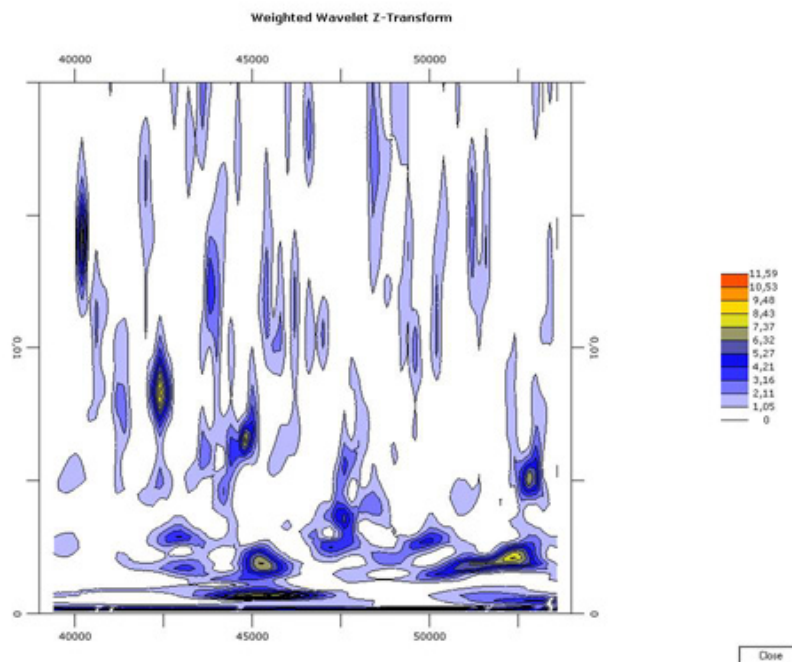
59. ábra. Az UU Herculis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



60. ábra. Az UU Herculis contour térképe



61. ábra. Az UY Canis Majoris Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



62. ábra. Az UY Canis Majoris contour térképe

Így az amatőrök vizuális észleléseit óvatosan kell kezelni, különösképpen az amplitúdó tekintetében: 63. ábra. A Fourier-transzformáció alapján egy 363 napos változás a legerősebb, míg a második legmagasabb csúcs 71 nap környékén jelenik meg, bár a 363 napos csúcs sokkal erősebb (64. ábra). Érdekesség, hogy a 363 nap pontosan a 68 napnak az ötszöröse. A wavelet megtalálta a 363 napos változást, bár ennek sincs szép, folytonos gerince (65. ábra). A 71 nap körüli változásnak alig látható valami nyoma. Illesztés nem teljesen meggyőző, se egy, se két szinusz esetén.

5.20. V509 Cassiopeiae

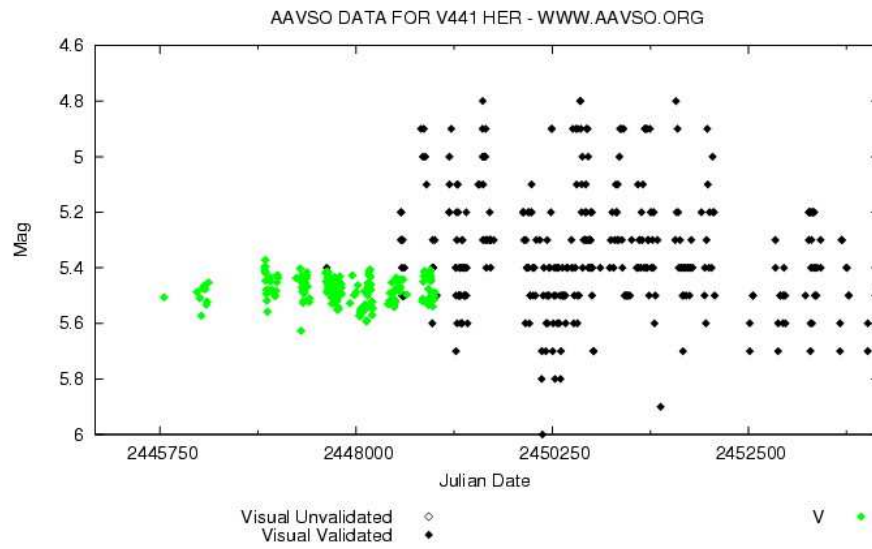
A ρ Cassiopeiae-hez és az RW Cephei-hez hasonló szuperóriás csillag. Szintén circumstelláris környezet veszi körül, ami egy ritka héjat alkot. Ezt a héjat 1975 környékén dobta ki a csillag (Lambert et al., 1981).

A csillag Fourier-spektruma hasonlít a két ugyanilyen típusú csillagéhoz, azonban csak egy jelentős csúcs található alacsony frekvenciákon: 66. ábra. Ennek a csúcsnak az értéke napokban kifejezve 10638.3. Fehérítés után egy 1669 napos csúcs marad legerősebbnek. A wavelet nem volt használható: 67. ábra. Az illesztés a két szinusz ellenére se követte a fénygörbét.

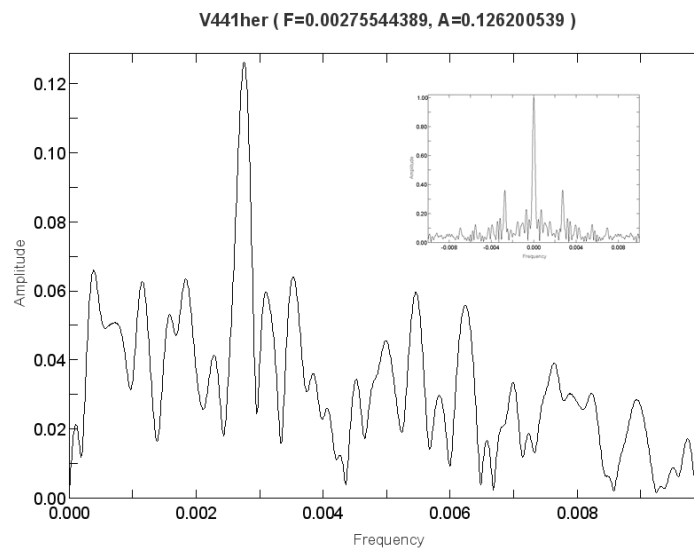
5.21. V564 Ophiuchi

Erleksova 1975-ös cikke alapján (GCVS honlap) a csillag fémessége $[Fe/H] = -1.37$, a fényváltozás periódusa 73 nap. Dawson (1979) szintén vizsgálta a csillagot, és 70.6 napos periódust talált.

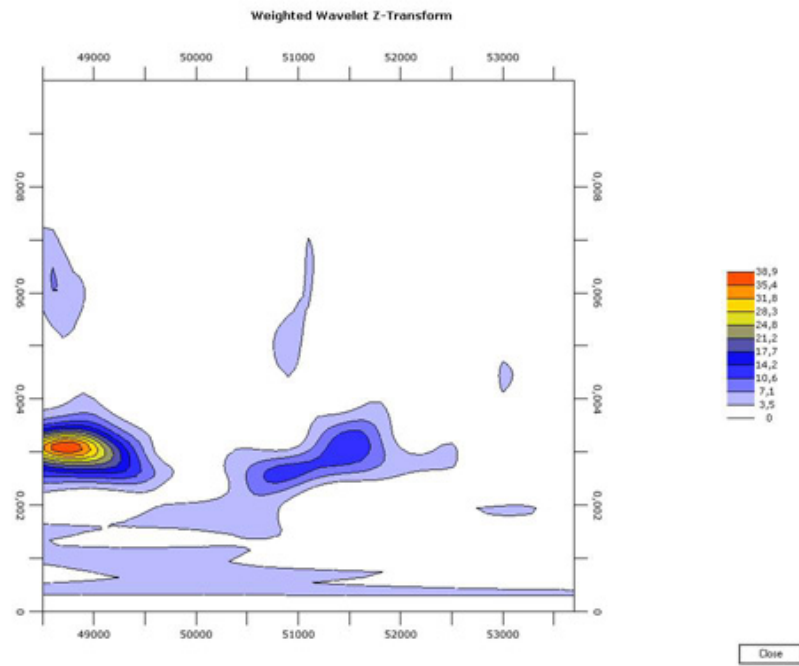
Erről a csillagról rendkívül kevés adatpontom volt, ezáltal a Fourier-spektrum szintén zajos lett, ráadásul nagyon erősek voltak az $1 \frac{1}{\text{év}}$ értékű aliasok: 68. ábra.



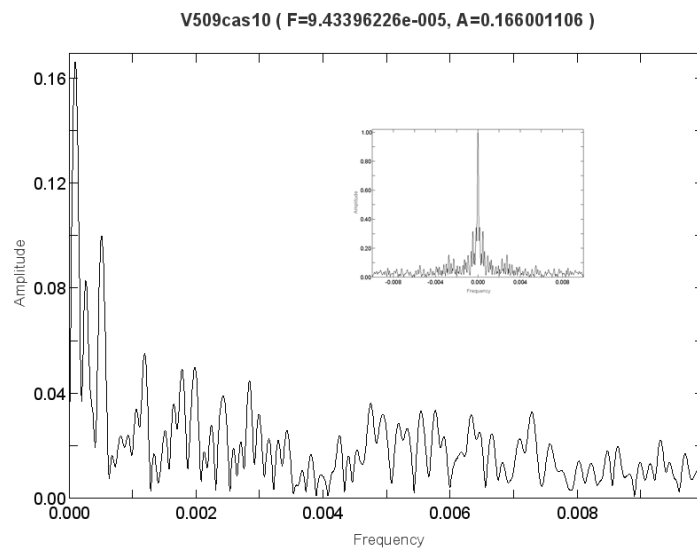
63. ábra. A V441 Herculis vizuális (fekete) és V tartománybeli CCD (zöld) fénygörbéje



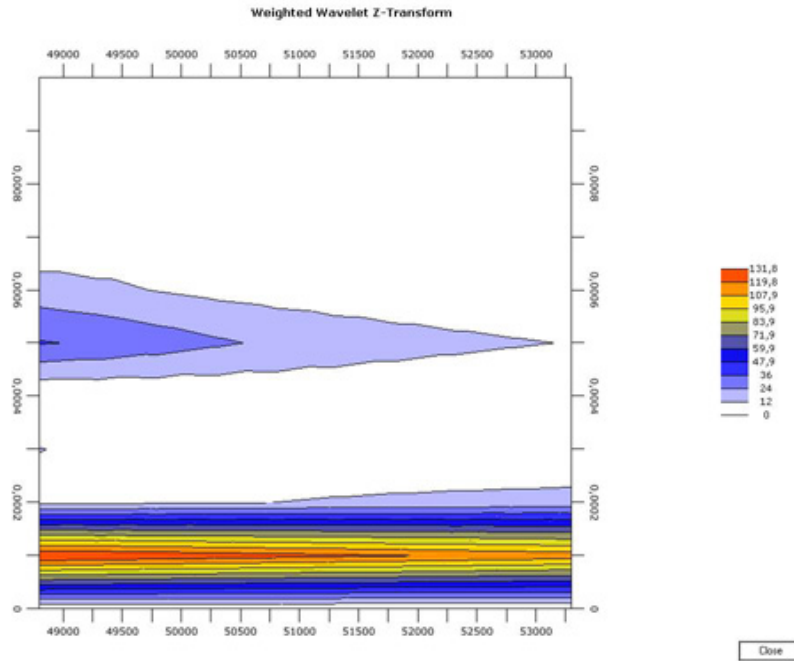
64. ábra. A V441 Herculis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



65. ábra. A V441 Herculis contour térképe



66. ábra. A V509 Cassiopeiae Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



67. ábra. A V509 Cassiopeiae contour térképe

A legerősebb csúcs 72.9 napnál jelentkezett. Általában az ilyen csillagok esetében a wavelet se használható, és valóban a kapott gerincek nem folytonosak, és eléggé kiszélesedtek: 69. ábra. Az illesztés mindezek ellenére viszonylag jól követte a fénygörbét: 70. ábra.

5.22. V Pyxidis

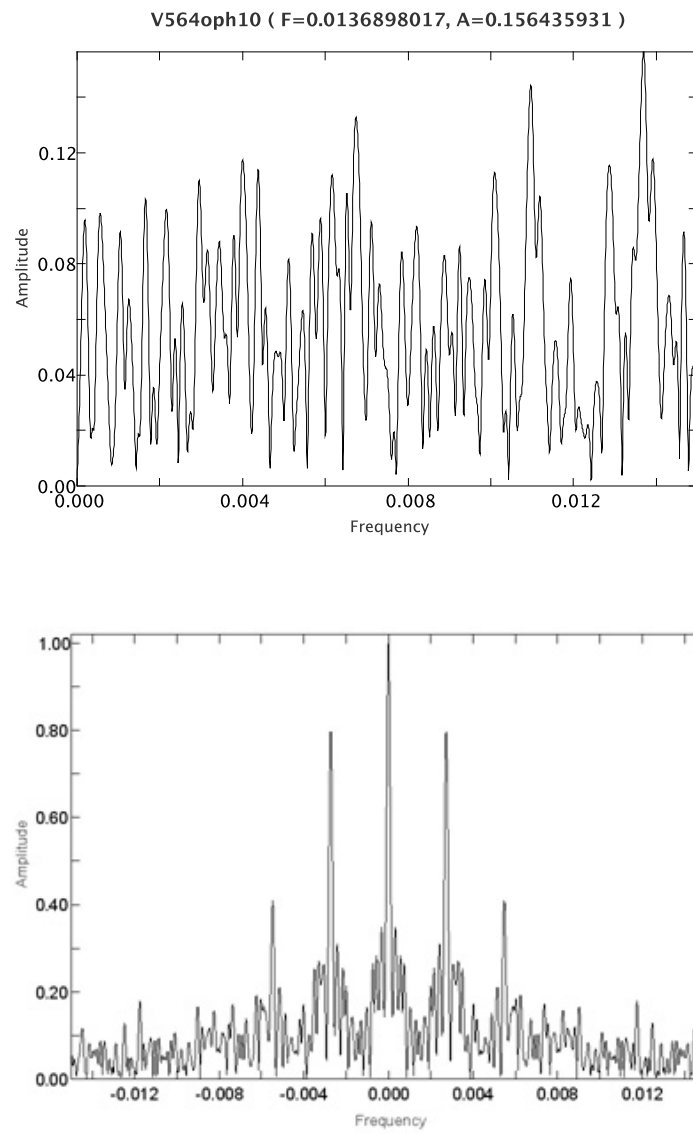
Gaposchkin 1950-ben írt cikket a csillagról (GCVS honlap), periódusnak 69.6 nap találva.

A V Pyxidis fénygörbéjében megfigyelhetők érdekes mély minimumok, hasonlóan a ρ Cassiopeiae-hez. A csillag spektruma kicsit zajos, sok magasabb csúccsal, amik közül a 258.1 napnak megfelelő emelkedik ki a legjobban: 71. ábra. Gaposchkin 69.6 napos változásának nyoma sincs a spektrumban. A contour térkép hasonló a V564 Ophiuciéhoz: 73. ábra. A zajos spektrum ellenére az illesztés jól követte a fénygörbét, a minimumokat is megtalálva: 73. ábra.

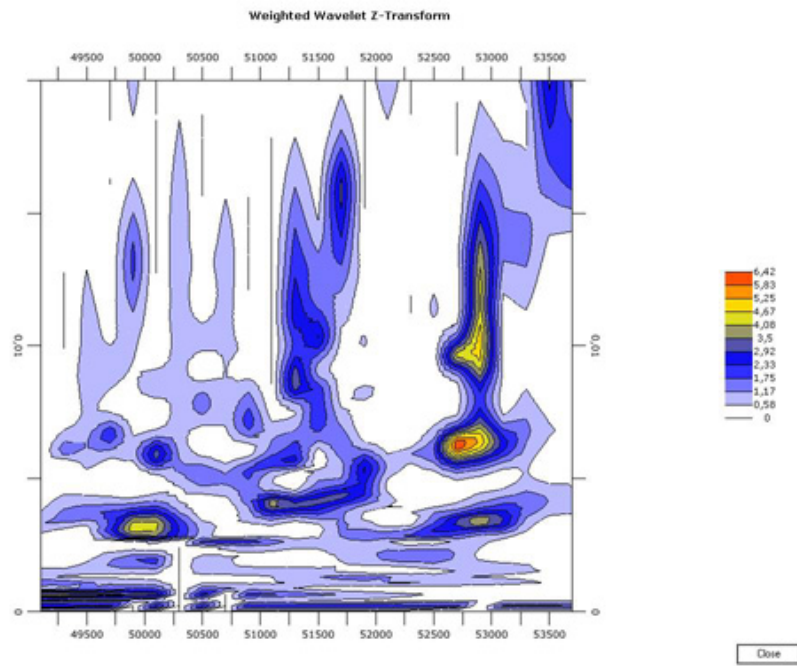
5.23. W Leo Minoris

Beyer 1948-ban (GCVS honlap) 117.2 napos változást tapasztalt. Joy (1952) szintén kimutatta a 117 napos periódust. Giridhar et al. (2000) spektroszkópiai mérései alapján a fémesség $[Fe/H] = -1.1$, ami miatt úgy néz ki, hogy a W Leo Minoris kevésbé fémszegény, mint az átlagos SRd csillagok. Másik érdekesség, amit Giridhar megemlít, hogy radiális sebessége kisebb 70 km/s-nál.

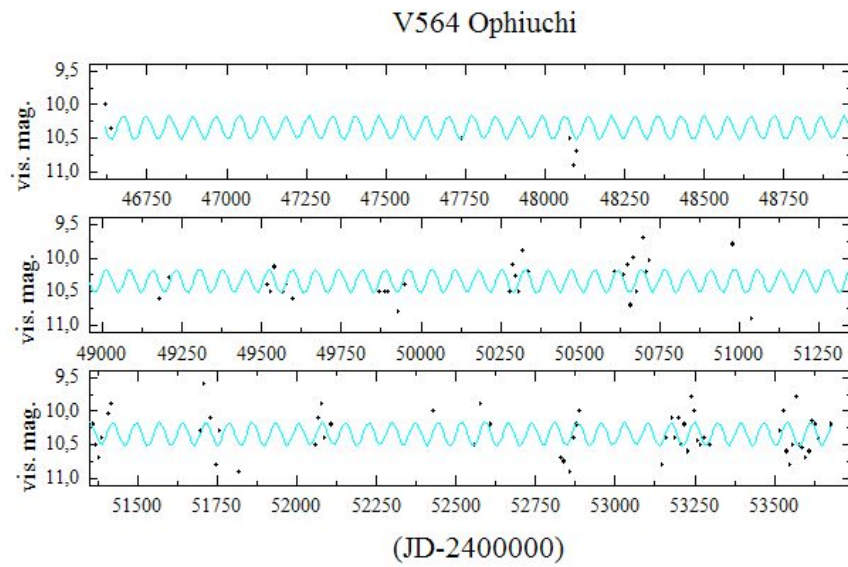
A W Leo Minoris spektrumában egy nagyon határozott csúcsot találtam 116.8 napnál (76. ábra). Két elég erős 1/év mértékű alias figyelhető a csúcs mellett. Megfigyelhetők kisebb mellékcsúcsok is. A wavelet szépen kimutatta a 116.8 napos



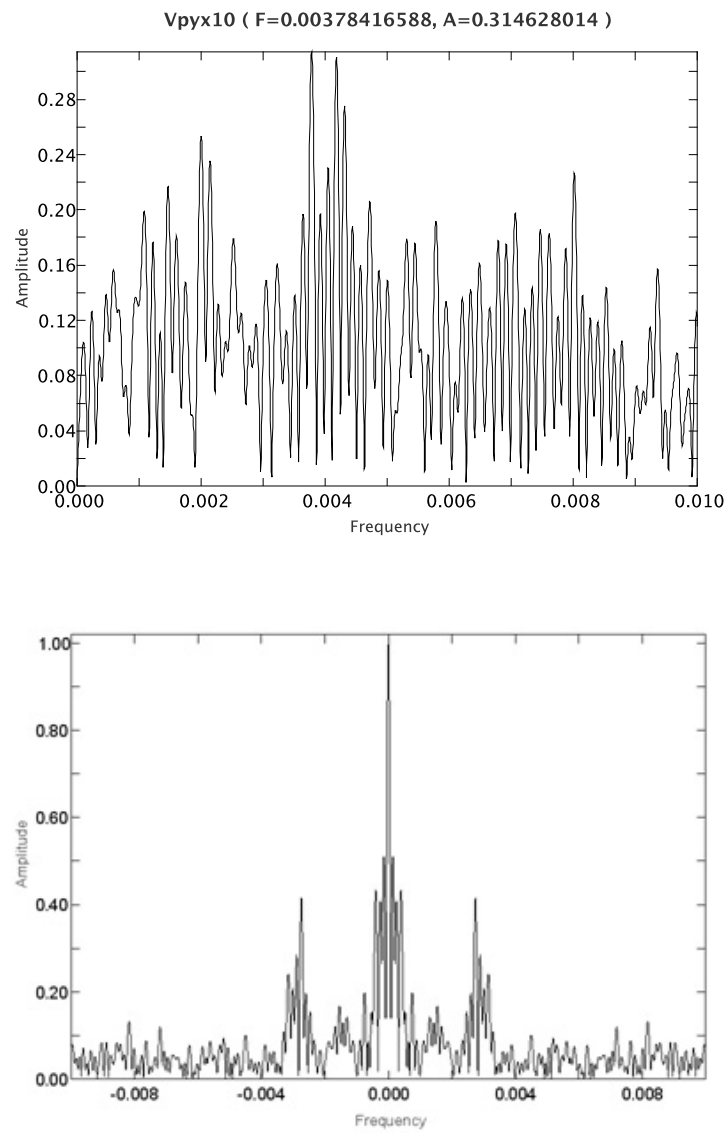
68. ábra. A V564 Ophiuchi Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



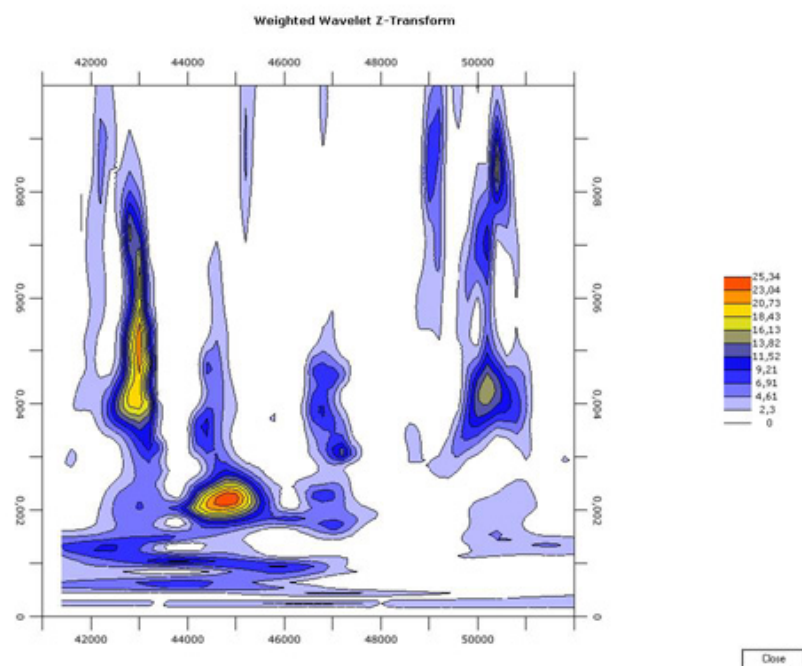
69. ábra. A V564 Ophiuchi contour térképe



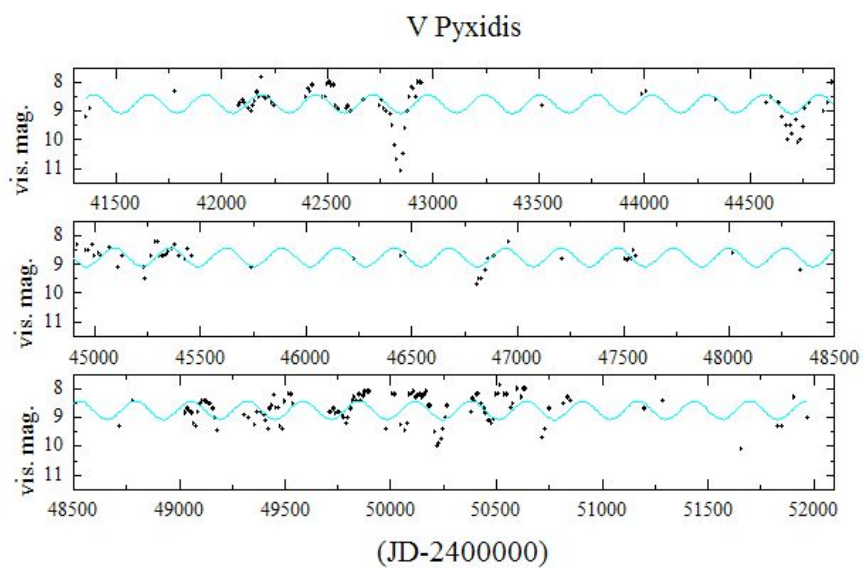
70. ábra. A V564 Ophiuchi fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 72.9$ nap



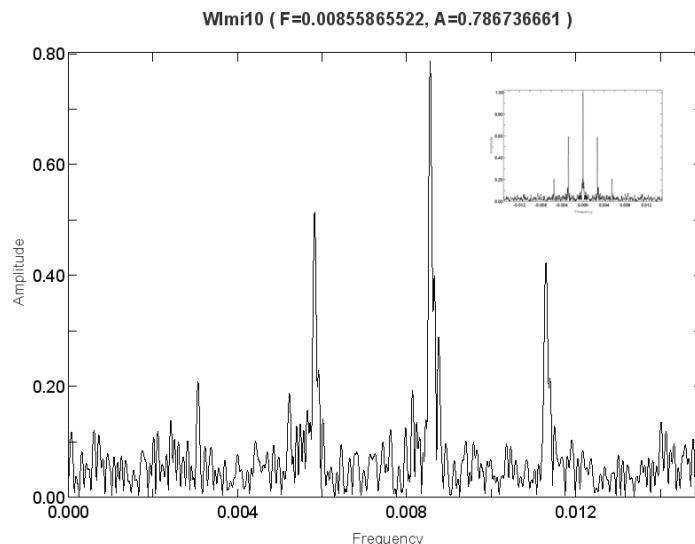
71. ábra. A V Pyxidis Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



72. ábra. A V Pyxidis contour térképe



73. ábra. A V Pyxidis fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 258.1$ nap



74. ábra. A W Leo Minoris Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye

gerincet (75. ábra), illesztés jó lett: 76. ábra.

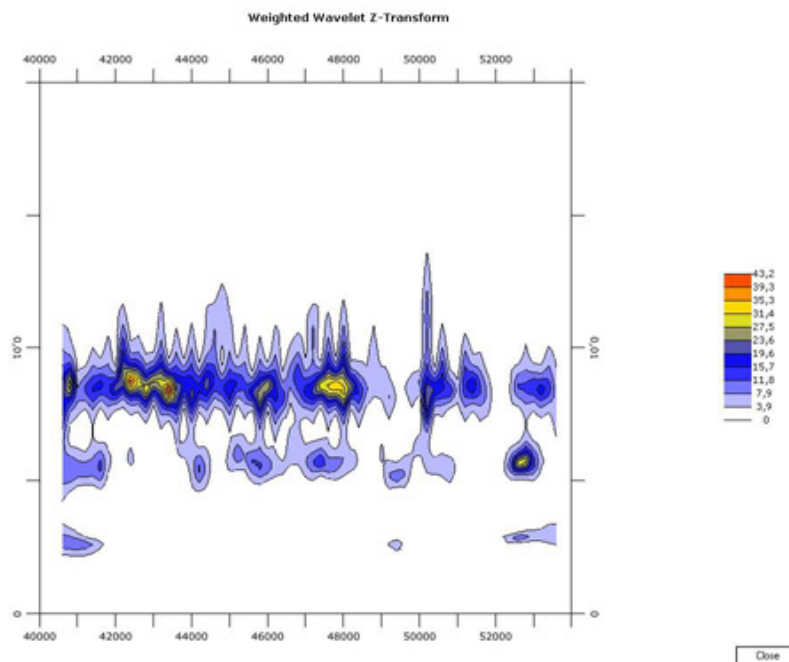
5.24. WY Andromedae

Joy (1952) 109 napos periódust határozott meg a csillagra. A GCVS alapján ez az érték 108 nap. Dawson (1979) szintén vizsgálta a WY Andromedae-t, és próbálta meghatározni a fizikai paramétereket, amikre elég szélsőséges értékeket kapott, kivéve az effektív hőmérsékletet, aminek értékére körülbelül 3600 K-t kapott. Szerencsére Giridhar et al. (1999) újra megvizsgálta a csillagot, és meghatározta a fémességet: $[Fe/H] = -1.0$.

A WY Andromedae spektruma nagyon hasonló a W Leo Minoriséhoz. Határozott csúcs 108.4 napnál, csak az aliasok sokkal gyengébbek, ellenben a mellécsúcsok erősebben jelentkeznek: 77. ábra. A wavelet egy szép, határozott gerincet mutatott 108 nap környékén, bár az űrök miatt nem teljesen folytonos: 78. ábra. A generált szinusz jól illeszkedik a fénygörbére: 79. ábra, 80. ábra.

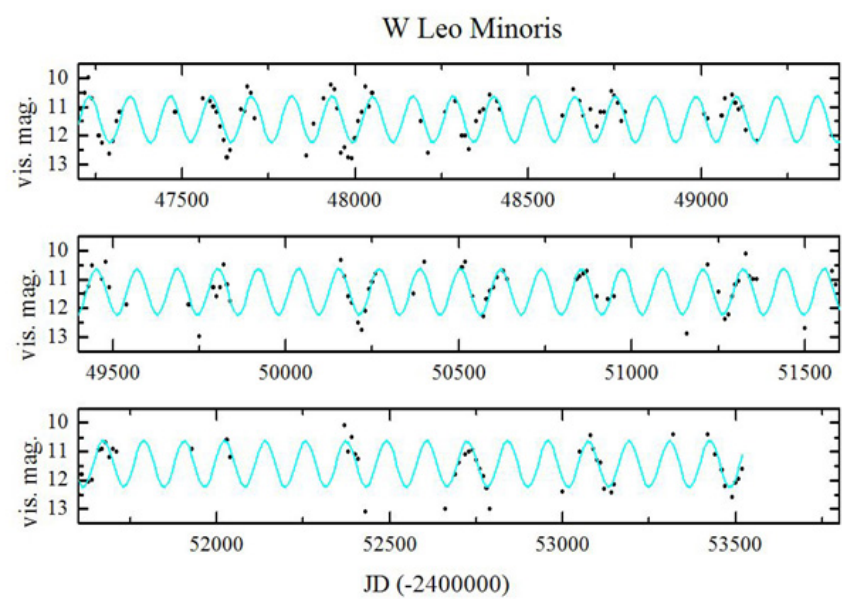
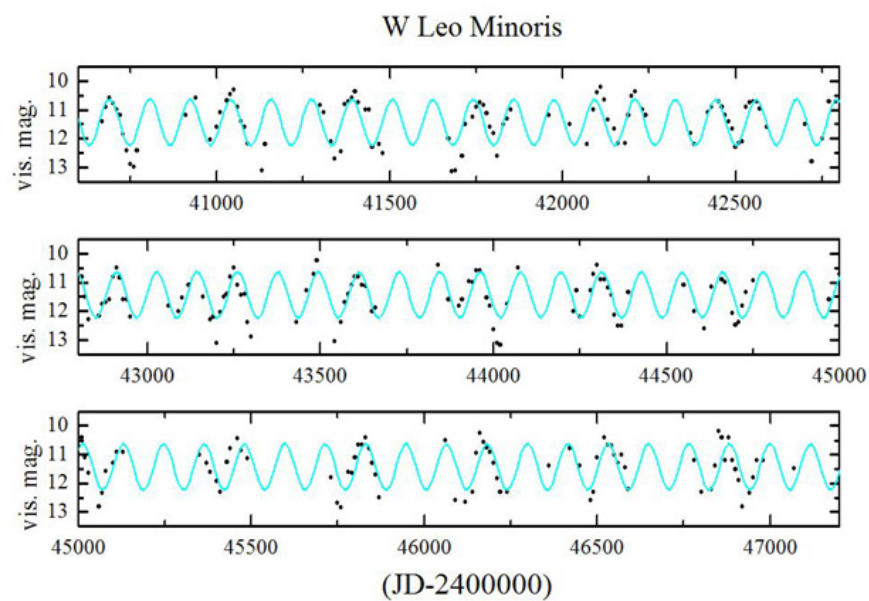
5.25. Z Aurigae

Erről a csillagról már elég sokan írtak, különleges fényváltozása miatt. Először Joy (1952) tesz említést a csillagról, egy 111 napos változást kimutatva. Ezen kívül megemlíti, hogy a TiO vonalakban a csillag spektruma M1. Mayall (1966) már említést tesz a csillag változó periódusáról, felsorolva őket: 1903. február-1928. november között 113.3 nap, 1928. november-1940. szeptember 135.5 nap, 1940. szeptember-1950. január 110 nap. Mayall (1971) másodszor csak annyit ír a csillagról, hogy a fényváltozása teljesen irregulárisá vált. Lacy (1973) valóban kimutatja a periódus változását. Percy et al. (1999) újra megvizsgálta a Z Aurigae-t, kimutatva a különböző periódusokat, és ő ajánlotta először, hogy az SRd osztályba sorolják a csillagot, a Mira helyett. Giridhar (2000) spektroszkópiái vizsgálatai alapján a Z Aurigae fémessége $[Fe/H] = -1.4$.

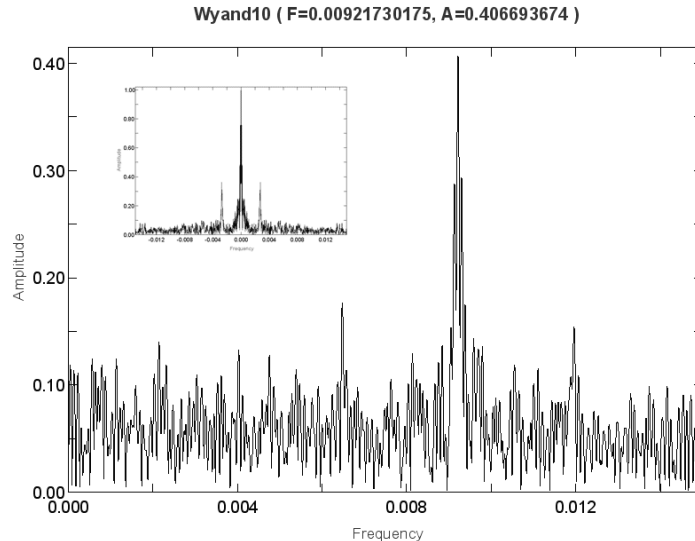


75. ábra. A W Leo Minoris contour térképe

A Z Aurigae-nél rendelkeztem a leghosszabb adatsorral, 1908 áprilisától kezdve szinte folyamatos. A Fourier-transzformáció eredménye: (81.ábra), a 111.2 naphoz tartozó csúcs a legerősebb. Érdekes a két tarajos csoport, melyek rendkívül sok mellékcúccsal rendelkeznek. A wavelet igazolta a változó periódust: 82. ábra. A wavelet alapján nem lehet eldönteni, hogy frekvenciamoduláció vagy módusváltások jelentkeznek a csillagnál. A fénygörbére illesztett szinusz a periódus változások miatt nem lett jó, csupán a megfelelő periódusú helyeken követi a fénygörbét: 83. ábra, 84. ábra, 85. ábra.



76. ábra. A W Leo Minoris fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 116.8$ nap



77. ábra. A WY Andromedae Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye

5.26. Konklúzió

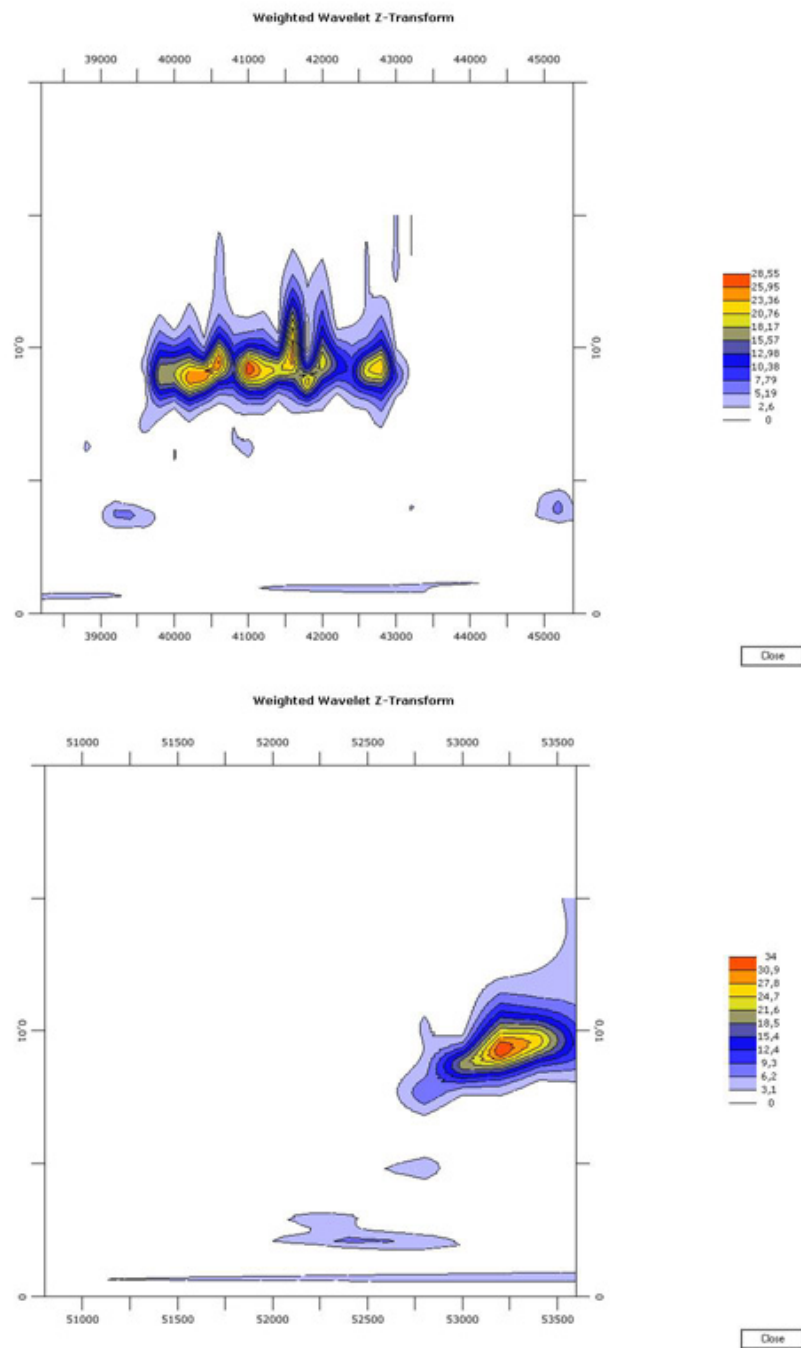
Az adatsorok a legtöbb esetben használhatóak voltak a fő változás kimutatására, és igazolni tudtam a korábbi eredményeket: 3. táblázat.

A Fourier-spektrumok alapján lehetséges volt a csillagok egyfajta csoportosítása:

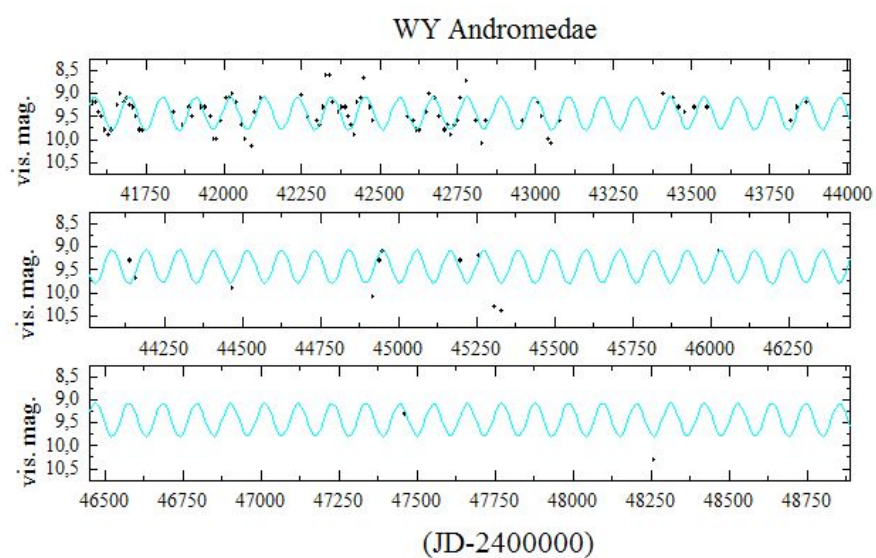
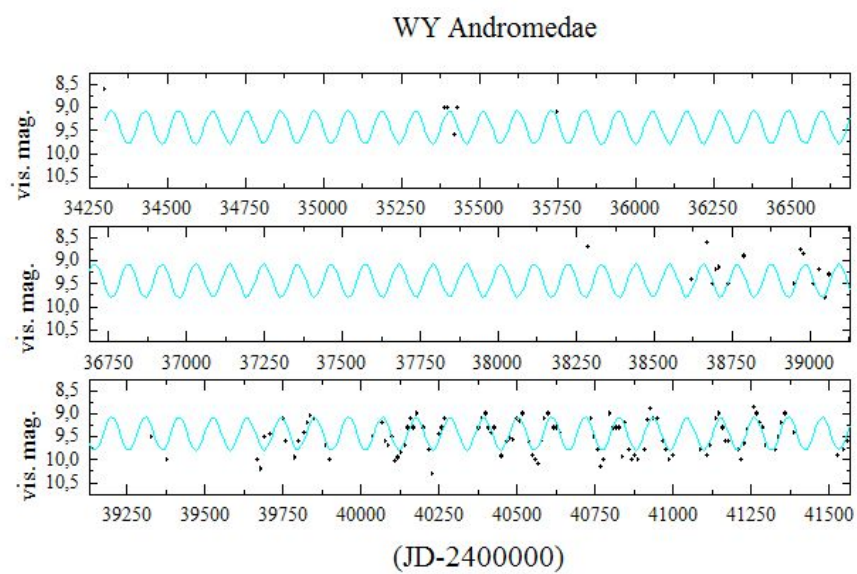
1. Zajos: A legerősebb csúcs alig emelkedik ki a zajból
2. 100 nap körüli "tarajos": Egy erős 100 nap környéki periódus kevesebb vagy több mellékcúccsal
3. Lejtős: A legerősebb csúcsok alacsony frekvenciákon, a csúcsok erőssége csökken a magasabb frekvenciák felé, vagyis megfigyelhető az $1/f$ zaj
4. Egycsúcsos: Egy meghatározó periódus
5. Többcsúcsos: Több meghatározó periódus

Mivel nem rendelkeztem minden csillagnál tömeg adatokkal, illetve más fizikai paraméterekkel, ezért ez a csoportosítás nem elegendő mélyebb fokú összehasonlításhoz. Ellenben a "lejtős" csoport, ahova például a ρ Cassiopeiae, RW Cephei és a V509 Cassiopeiae tartozik, ugyanolyan típusú szuperóriás csillag, extrém nagy luminozitással. A másik ilyen csoport, amelyben nagyon hasonlóak a Fourier-spektrumok, a 100 nap körüli "tarajos", ahová az AB Leonis, az AV Cygni, az AG Aurigae, az SX Herculis, a WY Andromedae, a W Leo Minoris és a Z Aurigae tartozik. Ezen tulajdonságok alapján érdekes lenne további, hasonló típusú csillagok vizsgálata is mindkét csoport esetében.

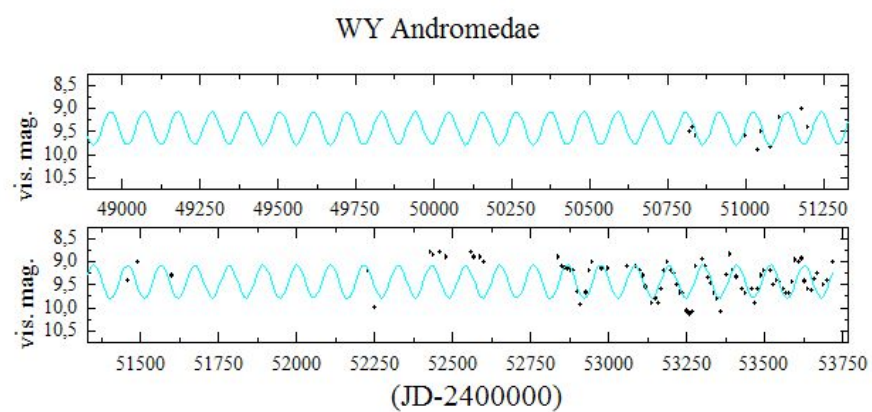
A Bevezetőben megemlítettem a felhangokat és felharmonikusokat. Fox és Wood (1982) kiszámították a hosszú periodusú változóknál az első három radiális pulzációs módust. A számításokat vörös óriásokra (korong csillagok és II. populáció) és szuperóriásokra végezték el. Ezek alapján modellt készítettek, amely tartalmazta



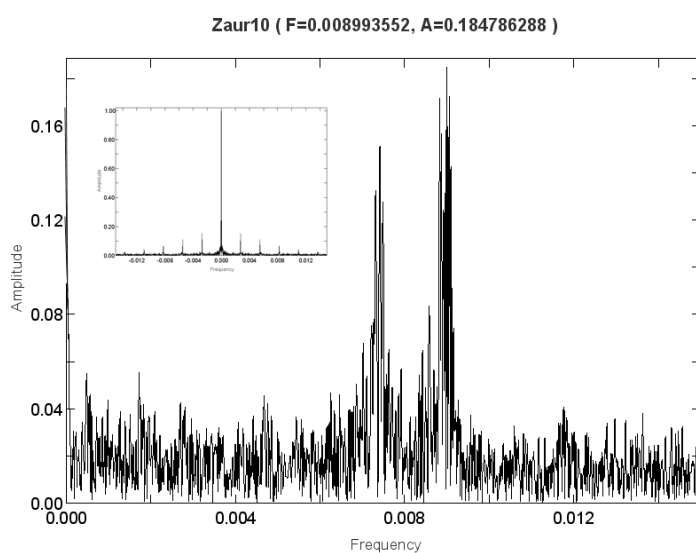
78. ábra. A WY Andromedae contour térképe



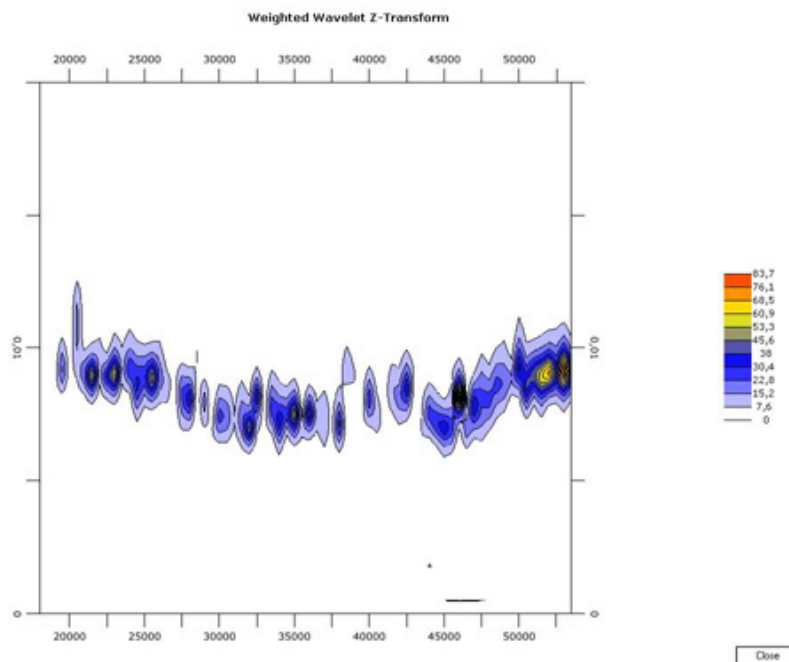
79. ábra. A WY Andromedae fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 108.4$ nap



80. ábra. A WY Andromedae fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 108.4$ nap



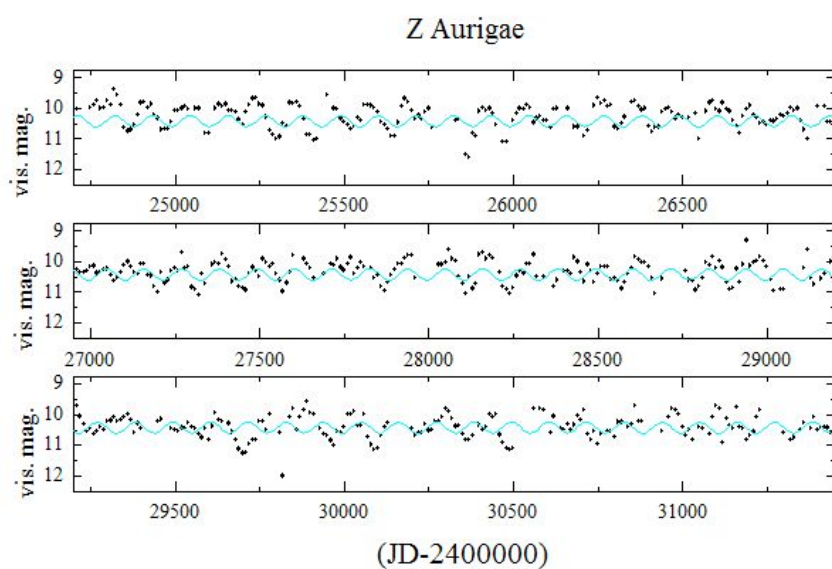
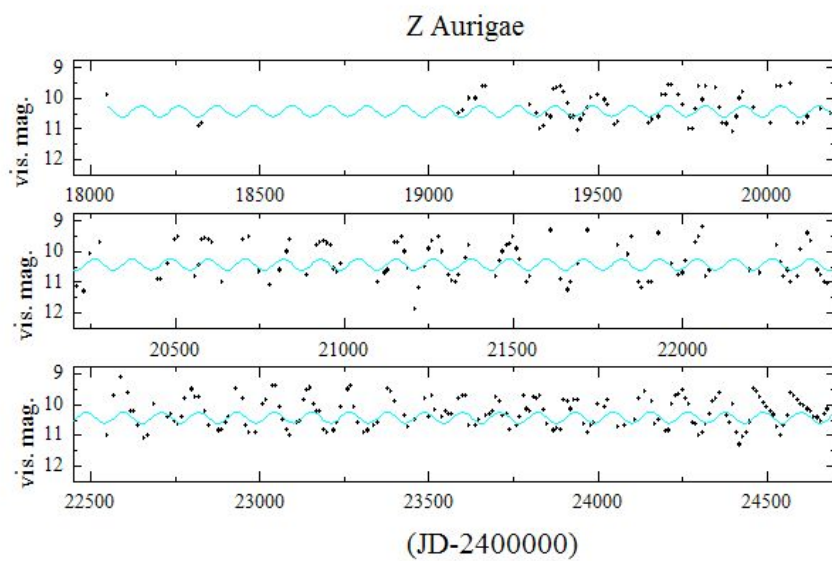
81. ábra. A Z Aurigae Fourier-spektruma és spektrálablak függvénye



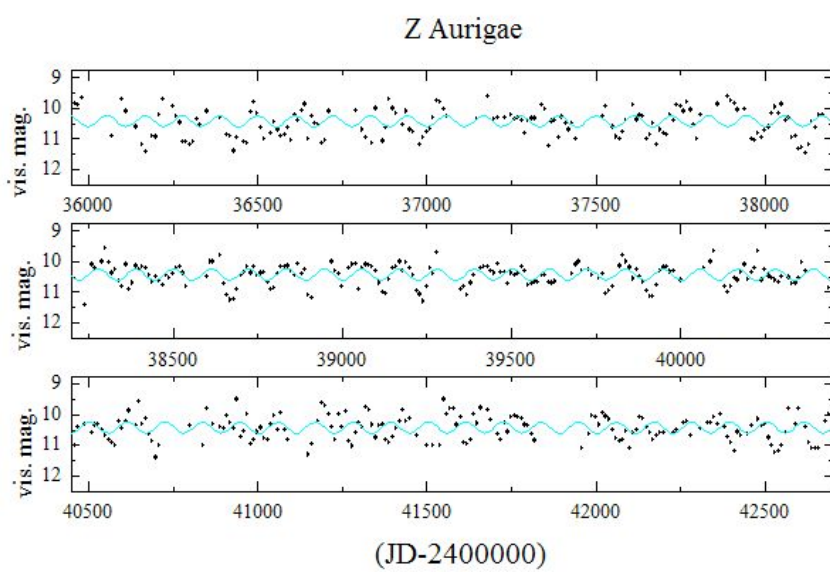
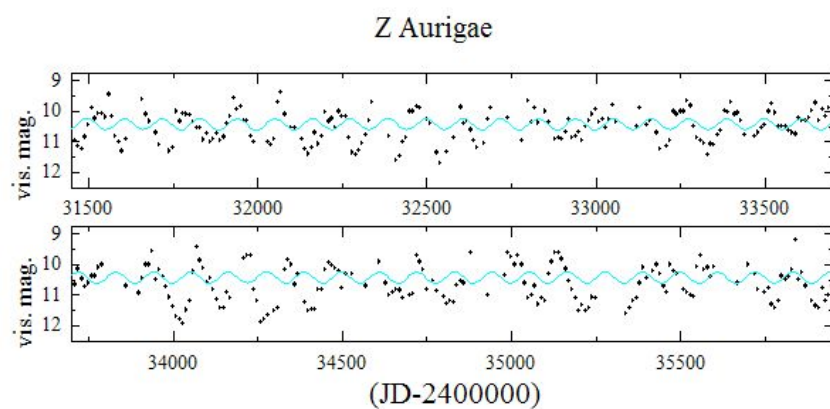
82. ábra. A Z Aurigae contour térképe

a periódusokat és azok arányait. Alapmódusnak ők a hosszabb periódust tekintették, első felhangnak pedig a rövidebbet. Mivel én is rendelkeztem néhány olyan csillaggal, aminek két periódusa volt, össze tudtam hasonlítani az kapott periódusarányokat a modell eredményeivel. A legjobb egyezést a szuperóriások modelljével kaptam: 86. ábra. Látható, hogy a modell eredményei jelentősen eltérnek a kapott arányoktól. Ennek oka lehet, hogy a kapott arányok például nem pulzációval kapcsolatosak. A három csillag, ami a jobb alsó sarokban látható a "lejtős" csoportba tartozik.

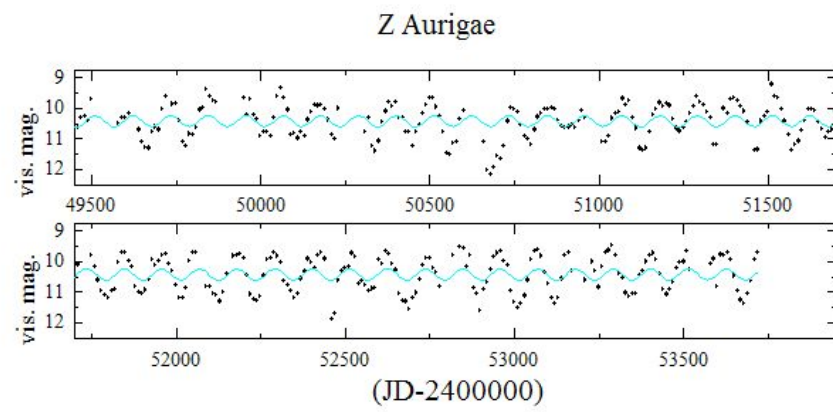
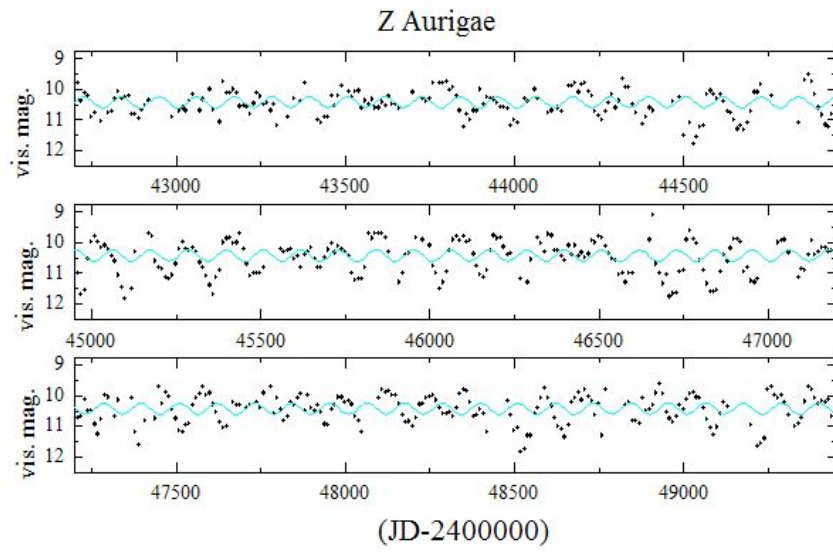
Mivel az SRd csillagokról még nem készült átfogó vizsgálat, ezért új eredmények várhatóak a jövőben ezekről a csillagokról. Ez a dolgozat csak betekintést adott az SRd csillagok világába. Mivel sok csillagnál a fényváltozás csak kis amplitúdójú volt, amihez pontos CCD mérések kellenének, ezért messzemenő következtetéseket levonni nem lehet. Ezt különösképpen igazolja a Fox és Wood modellel történt összehasonlítás, aminek következménye, hogy nem állítható biztosan, hogy pulzációs folyamatokról van szó. Ennek a problémának a körbejárása is a jövő feladata marad.



83. ábra. A Z Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 111.2$ nap



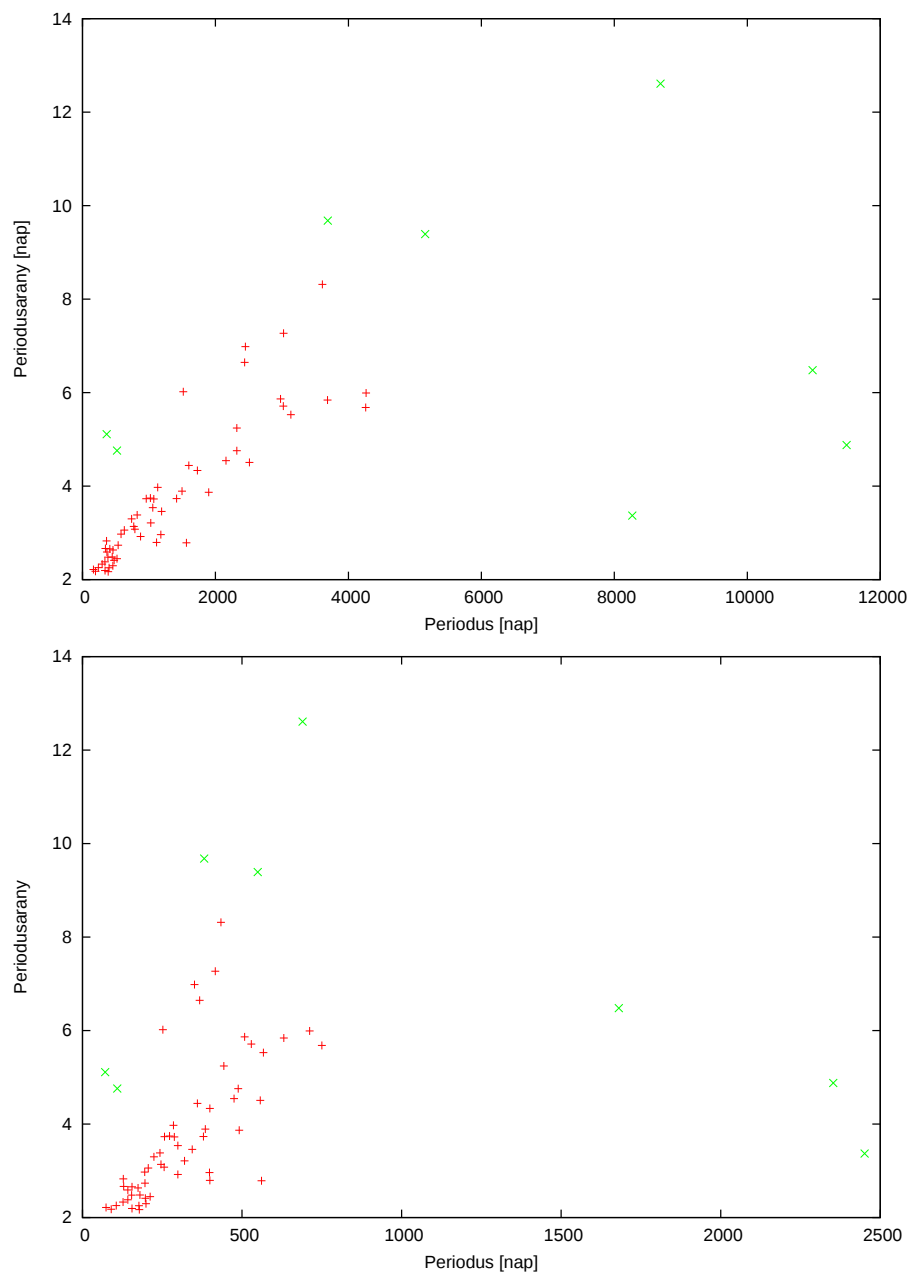
84. ábra. A Z Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 111.2$ nap



85. ábra. A Z Aurigae fénygörbéje és a rá illesztett szinusz, $P = 111.2$ nap

Csillag	Periódus GCVS alapján [nap]	Általam talált fő periódus [nap]
AB Leo	130.2	103.2
AG Aur	96	96.1
AV Cyg	89.2	88.4
BM Sco	381.2	381.7
DE Her	165.2	7936.5
GT Ori	86	689.6
LR Sco	104.4	359.7
ρ Cas	320	8271.3
RS Lac	237.2	238.1
RU Cep	109	108.7
RW Cep	346	11494.2
RX Ret	-	547
SV UMa	76	1709.4
SX Her	102.9	103.1
TV Per	358	23255.8
TZ Cep	83	82.6
UU Her	80.1	45
UY CMa	114.6	5263.1
V441 Her	68	363
V509 Cas	-	10638.3
V564 Oph	70.3	72.9
V Pyx	69.6	258.1
W LMi	117.2	116.8
WY And	108	108.4
Z Aur	134.2	111.2

3. táblázat. A talált periódusok



86. ábra. A Fox-Wood modell eredményei (piros) illetve az általam vizsgált csillagok jellemzői (zöld). A felső képen a vízszintes tengely az alpmódus periódusa, függőleges tengely a periódusok aránya. Alsó képen a vízszintes tengely az első felhang periódusa, a függőleges tengely a periódusok aránya

6. Hivatkozások

1. Beyer M., 1937, AN 262, 257
2. Cooper W. A., Walker E. N., Csillagok távcsővégen, Gondolat kiadó, 1994
3. Dawson D. W., 1979, ApJ 41, 97
4. Fernie J. D. et al., 1972, ApJ 172, 383
5. Fernie J. D., 1981, ApJ 243, 576
6. Fox M. W., Wood P. R., 1982, ApJ 259, 198
7. GCVS honlap: www.sai.msu.su/groups/cluster/gcvs/cgi-bin/search.htm
8. Giridhar S. et al., 1992, JApA 13, 307
9. Giridhar S. et al., 1998, PASP 110, 671
10. Giridhar S. et al., 1999, PASP 111, 1269
11. Giridhar S. et al., 2000, JApA 13, 307
12. Hoffleit D., 1949, HB N919
13. Joy A. H., 1952, ApJ 115, 25
14. Lacy C. H., 1973, AJ 78, 90
15. Lambert D. L. et al., 1981, ApJ 248, 638
16. Lenz P., Breger M., 2005, Communications in Astroseismology 146, 53
17. Lobel A. et al., 2003, ApJ 583, 923
18. Mayall M. W., 1966, JRAS Can 60, 293
19. Mayall M. W., 1971, JRAS Can 65, 93
20. Mizser A., AmatőrCsillagászok kézikönyve, Magyar Csillagászati Egyesület, 1999
21. Olivier C. P., 1958, AN 284, 185
22. Percy J. R., Welch D. L., 1981, PASP 93, 367
23. Percy J. R., Colivas T., 1999, PASP 111, 94
24. Percy J. R., Bagby D. H., 1999, PASP 111, 203
25. Percy J. R., Kolin D. L., 2000, JAAVSO 28, 1
26. Percy J. R. Mohammed F., 2004, JAAVSO 32, 9
27. Shapley H., Swope H. H., 1940, AnHar 90, 177
28. Stephenson C. B., 1978, IBVS N1453
29. Stothers R., 1964, PASP 76, 98
30. Szatmáry K., 1994, Kandidátusi értekezés

31. Szegedi csillagvizsgáló honlap: astro.u-szeged.hu
32. Wahlgren G. M., 1993, ASPC 45, 270
33. Wood P. R. et al., 2004, ApJ 604, 800
33. Zsoldos E., Sasselov D. D., 1993, ASPC 45, 330

Nyilatkozat

Alulírott, szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy a diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.