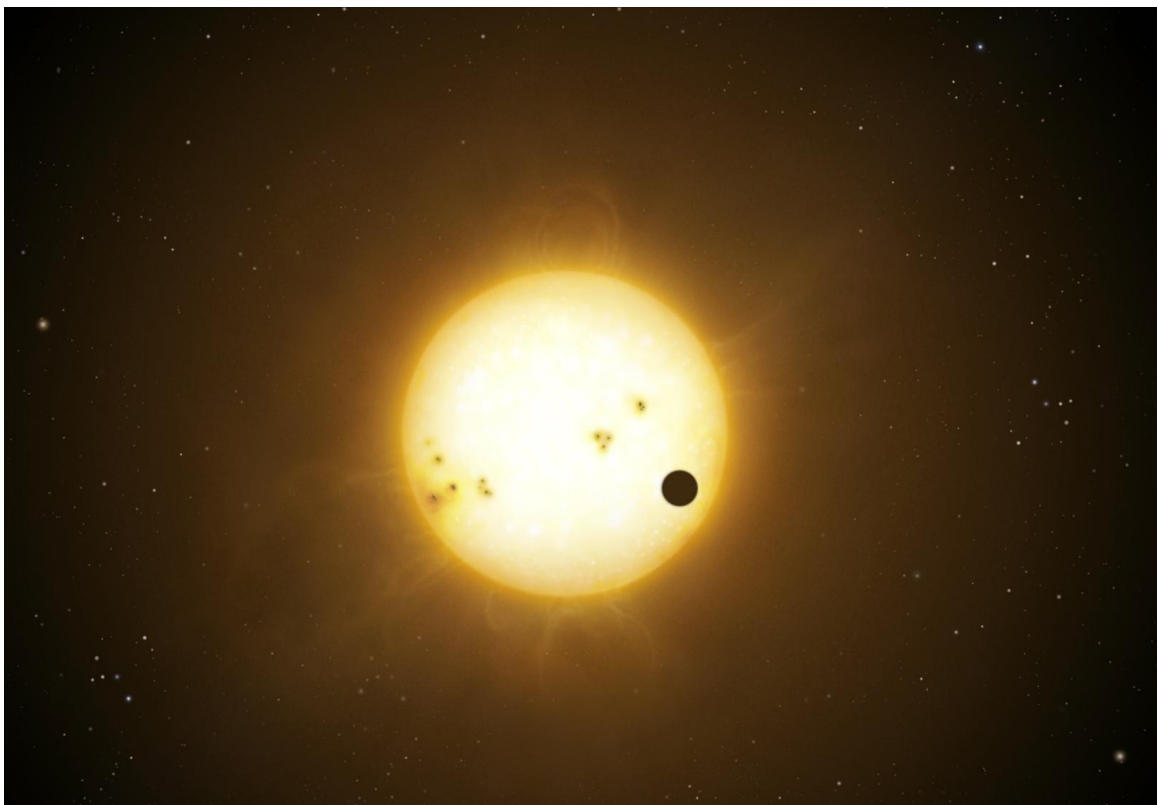


**Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizika Tanszék**

*Tranzitos exobolygók fedésének fotometriai vizsgálata
TDK dolgozat*



*Készítette: Ordasi András (csillagász szakos hallgató)
Témavezetők: Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens
Dr. Szabó M. Gyula, tudományos munkatárs
Dr. Székely Péter, egyetemi tanársegéd*

Szeged, 2010

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
1.1. Exobolygó kutatás lehetséges módjai.....	3
1.2. Jelenleg futó és tervezett kutatási projektek.....	4
2. A mérések előkészítése.....	6
3. Az észlelés menete.....	7
4. A mérési eredmények kiértékelése.....	8
4.1. Alapvető képkorrekciók.....	8
4.2. A fotometrálas lépései.....	9
4.3. A fénygörbeillesztés.....	10
4.3.1. Elvi alapok.....	10
4.3.2. Szélsötétedéstől való függés vizsgálata.....	11
4.3.3. A fénygörbe pontjainak előállításához használt módszerek bemutatása.....	12
5. A mérési eredmények tárgyalása.....	14
5.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.).....	14
5.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.).....	16
5.3. HAT-P-10/WASP-11b (2010. október 30.).....	17
5.4. WASP-33b (2010. november 6. és november 11.).....	18
6. További mérési és kiértékelési tervek.....	20
Köszönetnyilvánítás.....	21
Felhasznált irodalom.....	22
Mellékletek.....	23
A. Az illesztésből kapott grafikonok.....	23
A.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.).....	23
A.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.).....	26
A.3. HAT-P-10/WASP-11b (2010. október 30.).....	29
A.4. WASP-33b (2010. november 6. és november 11.).....	32
B. A WASP-2b exobolygó új keringési periódussal kapott O-C diagramja.....	36
C. A színindex-görbék illesztésekor kapott paraméterek.....	36
D. A fedés mélysége, a fedés hossza és az O-C értékek szélsötétedéstől való függése.....	37
D.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.).....	37
D.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.).....	39
D.3. HAT-P-10b (2010. október 30.).....	41
D.4. WASP-33b (2010. november 6.).....	43
D.5. WASP-33b (2010. november. 11.).....	45

1. Bevezetés

1.1. Exobolygó kutatás lehetséges módjai

Az exobolygók kutatása napjainkban a csillagászat egyik legdinamikusabban fejlődő ágává vált. Az első Nap típusú csillag körül keringő exobolygó – 1990-es évek közepén való – megtalálását követően rendkívül gyors fejlődésnek indult e tudományterület. A motivációt részben a Földön kívüli – esetlegesen értelmes – élet kutatása, részben saját Naprendszerünk kialakulásának mélyebb megértése adja. Ezen „közel láthatatlan” égitestek detektálása igen csak megmozgatta a tudósok fantáziáját, és számos módszert dolgoztak ki az elmúlt két évtizedben ezen probléma megoldására.

Az exobolygók közvetlen kimutatása többféle módon is lehetséges, de csak a legnagyobb földi távcsövekkel vagy a légkör fölé küldött űrteleszkópokkal. Egy-két kivételes esetben *képalkotásra* is van lehetőségünk, de általában mindössze az *infravörös többletsugárzásban* mutatkozik meg a keresett égitest, és ezek természetesen csak a legközelebbi csillagoknál alkalmazható eljárások (12* exobolygó). Sokkal több lehetőségünk nyílik megfigyelni az exobolygók csillagra gyakorolt hatásait.

Léteznek egyéb speciális körülmények, melyek alkalmat adhatnak exobolygók kimutatására, melyek közül elsőként részletesebben az általunk is használt fotometriai *transzit módszert* említjük meg. Számos esetben találkozhatunk olyan bolygórendszerekkel, melyeknek pályasíkja látóirányunkba esik, így a benne keringő bolygó a csillag korongját időről időre elfedi. Ez a fedés a csillag fényének elhalványodásával jár, és – jóllehet ez mindössze millimagnitúdós nagyságrendű változás – precíz méréssel már a kisebb, Föld felszíni távcsövek is képesek kimutatni ezt a változást. A fénygörbe alakjából sok, a bolygórendszerre jellemző fizikai paraméterre lehet következtetni, úgy mint keringési periódus, méret- és tömegarányok, valamint több színszűrővel megmért fedések esetében akár hőmérsékleti viszonyokra is lehet következtetni (106* exobolygó).

Egyes esetekben *asztrometriai* mérésekre támaszkodhatunk, melyekkel ki tudjuk mutatni – elegendően nagy bolygótömeg jelenlétekor – a csillagok sajátmozgásában az exobolygó gravitációs hatása miatt fellépő változást. A csillagnak ugyanezen okok miatt a radiális irányú sebessége is változik időben, ezért *spektroszkópiai* mérések alapján a színekpvonalak eltolódásából is lehet következtetni kisebb kísérők léteire (463* exobolygó).

* Az említett számadatok a dolgozat 2010. november 10-ei írásának napján ismert adatokkal egyeznek meg.

Bizonyos változó csillagok (pulzáló változók illetve pulzárok) esetében a fényváltozás periódusában jelentkező modulációkból következtethetünk bolygó jelenlétére. Ezt hívjuk *timing-effektusnak* (10^* exobolygó),

Még egy másik módszer azon alapul, hogy a csillagok gravitációs terük lévén a távolabbi égitestek fényét az úgynevezett *gravitációs lencsésítés* jelenségével irányunkba felerősítik. Olyan különleges szituációban, amikor a lencséző objektum körül egy exobolygó is található, a lencsésítésből adódó fénygörbe alakja a magányos csillagéhoz képest megváltozik - másik felfényesedést is találhatunk benne -, ami újfent bizonyítékaul szolgálhat az exobolygó létének (11^* exobolygó). [1,4,5]

1.2. Jelenleg futó és tervezett kutatási projektek

A dolgozatomban - a rövidebb áttekintés érdekében - csak az exobolygó tranzitokat kereső kutatási projekteket tekintjük át.

Ezek közül elsőként mindenképpen a magyar *HATNet* (*Hungarian Automated Telescope Network*) programot említem meg, melynek sikeressége adta nagy részben az ezen területen való kutatásaim motivációját. A Bakos Gáspár vezette kutatócsoport kis méretű, de elég nagy látómezejű távcsövekkel kémleli az eget Arizonából, Hawaibiról és Izraelből. A déli égbolt megfigyelését is tervezik, még hozzá Ausztráliából, Chiléből és Namíbiából. E helyszínek jól tükrözik, hogy

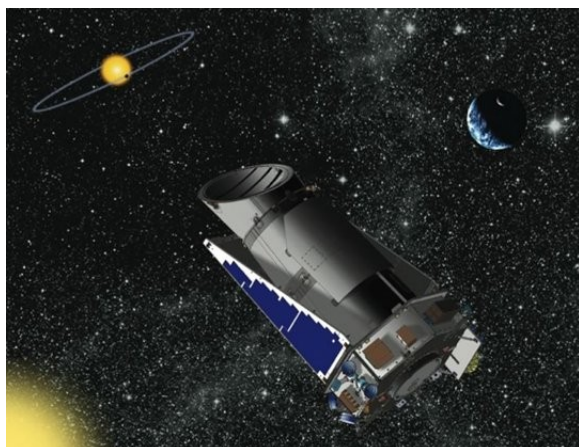
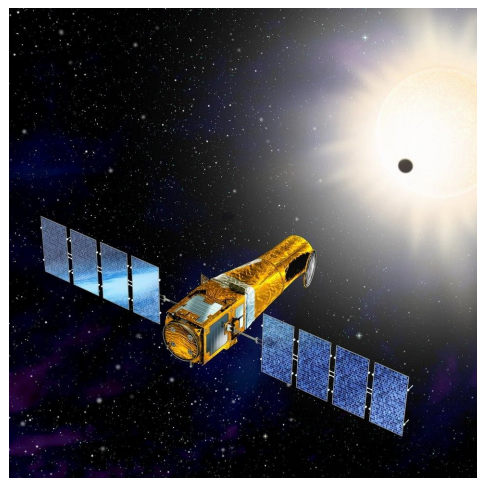


a Budapestről indult kezdeményezés mára igen széles nemzetközi együttműködéssé fejlődött. A program eddig 26^* exobolygó felfedezésével büszkélkedhet, ami a kutatási terület élvonalát jelenti [13].

Hasonló céllal az Egyesült Királyság több egyetemének összefogásával indulhatott be a *SuperWASP* (*Wide Angle Search for Planets*) projekt. E szintén automatizált teleszkóprendszer La Palma szigetéről és Dél-Afrikából figyeli az eget hasonlóan nagy látómezőket lefedve. 38^* bolygó felfedezése köszönhető a kutatócsoportnak mostanáig [16].

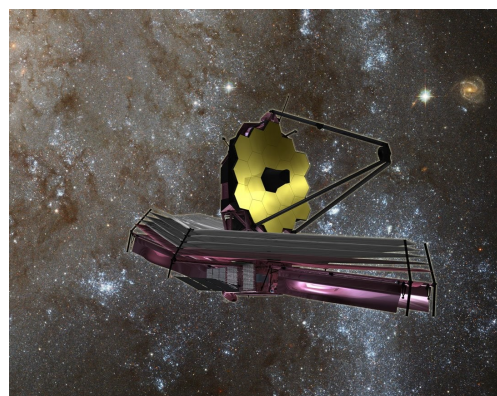
A harmadik említésre méltó felmérés a *TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey)* program, mely dél-Kaliforniából, a Kanári-szigetektől illetve észak-Arizonából keresi a távoli csillagrendszerek bolygóit. A mai napig 4* exobolygót találtak.

Mivel a fotometriai mérések ilyen mértékű pontosságát nagy mértékben a légkör korlátozza, így a csillagászok részéről jogos gondolat volt kifejezetten erre a célra gyártott űrtávcsövek felküldése az űrbe. Egyik jeles képviselője ezen műszereknek a *CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits)* nevű távcső, melyet az ESA és a Francia Nemzeti Űrügynökség indított útjára. A 2007 februárjában történt felbocsátás óta 13* bolygó felfedezését köszönhetjük ennek az űrtávcsőnek [17].



Napjaink legbiztatóbb eredményekkel kecsegtető űrtávcsöve mégis a *Kepler* űrteleszkóp, mellyel mintegy másfél éves működés után szinte naponta jelenthetnek be újabb és újabb felfedezetteket, és még több száz potenciális jelöltre hívták fel a figyelmet, arról nem is beszélve, hogy az első Föld-típusú exobolygó kimutatása is az ő érdeme lehet [15].

Érdeemes a jövőbeli tervek megemlézése, hiszen a leendő *James Webb* infravörös űrteleszkóp egyik fő feladatául az exobolygó-kutatást tűzték ki. A tervezett indítást jelenleg 2014-re datálják. 6,5 méteres átmérőjű tükre a Hubble űrteleszkóp méltó utódjául szolgálhat majd [14].



2. A mérések előkészítése

A méréseket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es Newton-típusú távcsövére szerelt SBIG ST-7 CCD kamera segítségével végeztem, illetve a kiértékeléshez az *IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)* képfeldolgozó szoftvert használtam.

Az exobolygók fedéseinek kiválasztásakor az elsődleges szempont az volt, hogy a Hold ne legyen *telehold* vagy ahhoz közeli fázisban, hiszen a millimagnitúdós változások kimutatásához a lehető legkisebb égi háttér mellett kell észlelni, így a telehold előtt és után négy-négy nappal nem folytattam mérést.

A második kritérium részben a *helyi viszonyok* felmérése nyomán adódott, részben pedig a legkevesebb *levegőtömeg*en való átnézés elvéből. Amennyiben lehetséges volt, olyan égitestet választottam, amely a fedés – illetve az előtte és utána szükséges konstans fényesség – időszaka alatt 30°-os magasság felett tartózkodott. Egyéb esetekben a környező fák magassága adta a magasság-korlátot, amely keleten és délen amúgy is jóformán 30°-ot jelent, de nyugaton és északon 15-20° magasságban is látható volt a célpont (természetesen ez utóbbi esetben a város fényszennyezése és az eleve nagy levegőtömeg sok zajt vihet a mérésbe).

A harmadik szelekciós szempont *a célcsoillag fényessége illetve a fényváltozás mértéke* volt. 13^m-nál fényesebb csillagokat kerestem, mivel a Szegedi Csillagvizsgáló főműszerének vezetése 2-3 percnél hosszabb exponálásnál már nem elég pontos, így elmosódott csillagprofilokat kapunk, és ez a határ az expozíciós időben nagyjából az említett magnitúdóhatárt jelenti. Ezek fényességváltozásának meg kellett haladnia a 0,01^m-s értéket. Amennyiben több potenciális jelölt akadt egy-egy éjszakára, úgy a döntésnél a fényességváltozás esett nagyobb súllyal latba.

3. Az észlelés menete

A csillagászati képek precíz kiértékelése érdekében az objektumról készített felvételek mellett szükségünk van korrekciós képekre is. Ezek a *bias*, *dark* illetve *flat* képek, melyek a legkörültekintőbb eljárás szerint minden éjszakai méréshez el kell, hogy készüljenek. Ugyanakkor az időjárási viszontagságok miatt ez nem minden este volt lehetséges, így flat képek csak 2010. augusztus 9-én és 2010. október 29-én készültek.

A mérés kezdetén a *CCD kamera hűtését* a lehető legkisebb hőmérsékletig fokoztam, ami a nyáron általában 0 °C és -20 °C között változott. A flat képek elkészítését az is nehezíti – mivel rövid idő alatt, a kora esti vagy a kora hajnali égen, napnyugta után vagy napkelte előtt, de még illetve már világosban kell véghezvinni –, hogy a hűtéskor lecsapódó pára olykor ráfagyhat a detektorra, így egy „jéggyűrű” válik megfigyelhetővé a felvételeken, s emiatt azok használhatatlanná válnak, és később nem nyílik már lehetőség a képek pótlására.

Az exobolygók mérése minden esetben *több – Johnson-féle – színszűrővel* történt. A leggyakrabban a V, R és I szűrőt alkalmaztam, mindazonáltal amennyiben a csillag fényessége engedte – az amúgy legkevésbé érzékeny – B szűrőt is használtam. A felvételek ideális expozíciós idejének meghatározása kísérleti úton történt, mely során a csillagnak a felvételen a háttér intenzitásának legalább 10-15-szörösével ki kellett emelkednie abból. Az expozíciós időt minden színszűrő esetében a mérés előtt tesztfelvétellel állapítottam meg.

Ennek megfelelően mérések a következő napokon történtek:

- x 2010. augusztus 9. – WASP-2b mérése;
- x 2010. szeptember 2. – TrES-2b mérése;
- x 2010. október 30. – HAT-P-10b mérése;
- x 2010. november 6. és 2010. november 11. – WASP-33b mérése.

4. A mérési eredmények kiértékelése

4.1. Alapvető képkorrekciók

A csillagászati CCD felvételeknek (legalább) három alapvető korrigálási folyamaton kell átesniük ahhoz, hogy a fotometrást (a fényességek kimérését) végrehajthassuk rajtuk, melyek a már említett bias-, dark- és flat-korrekció. Ezeket az *IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)* programmal hajtottam végre.

A *bias-korrekció* során a CCD kamera pixelhibáit lehet kiszűrni. Ehhez nulla expozíciós idejű képek sorát kellett elkészítenünk, melyeket a `noao.imred.ccdred.zerocombine` programcsomag segítségével összeátlagoltam. Erre az összeátlagolt képre minden egyes korrekciós fázisban szükségünk lesz. Általában egy sorozat 15 felvételt tartalmazott.

A *dark-korrekció* alkalmazása az úgynevezett sötétáram kompenzálásának érdekében történik, ami a molekulák hőmozgásából adódó, pixelekben felhalmozódó többlet elektronokat takarja. Ez a hiba a hőmérséklettel exponenciálisan, az expozíciós idővel lineárisan nő. A dark-korrekció első lépése, hogy minden képkockát lekorrigáljunk az imént elkészített átlagolt bias képet használva a `noao.imred.ccdred.ccdproc` programcsomaggal. Ezután az expozíciós idők szerint szortírozva a felvételeket, ismét átlagolást végzünk az összes képen a `noao.imred.ccdred.darkcombine`, majd ezeket az átlagolt képeket fogjuk később felhasználni. Minden expozíciós idővel 10-15 dark képet készítettem.

A *flat-korrekcióval* az optikai elemeken felgyülemlett szennyeződés okozta képhibákat, illetve a CCD detektor nagyobb struktúrájú hibáit lehet kompenzálni, amelyek a pixelek eltérő kvantumhatásfokából erednek. Ennek menete, hogy az egyes képeken elvégezzük az átlagolt bias- és megfelelő expozíciós idejű, átlagolt dark felvétellel való korrigálást a `noao.imred.ccdred.ccdproc` csomag segítségével, majd a különböző színszűrővel készült képeket a `noao.imred.ccdred.flatcombine` programcsomagot használva átlagoljuk. Mivel az időjárási viszonyok csak két éjszakán engedték a flat felvételek elkészítését, így a méréshez időben legközelebbi flat képeket használtam, amelyekből általában 7-7 felvételt lehetett készíteni egy-egy színszűrőben.

Ekkor elkészült az összes korrekciós kép, melyet használnunk kell az *objektumokról* készült képek *redukálásánál*. Ezt szintén a `noao.imred.ccdred.ccdproc` csomaggal tehetjük meg, ahol – ahogyan eddig is – az összeátlagolt bias-, a megfelelő expozíciós idejű dark- és a megfelelő színszűrővel készült flat képek átlagait kell használnunk.

Ezen a ponton érdemes pár hasznos információt beleépíteni szükség esetére a képek fejlécébe, úgy mint például a levegőtömeget és a csillagidőt a `noao.astutil.asthedit` taszkot alkalmazva, melynek használatához a Csák Balázs által készített 'st.cmd' parancsfájl szükséges, amelyért ezúton is szeretnék köszönetet mondani. Ezen kívül nagyon fontos az időpontok geo- és heliocentrikus Julián dátumokba való konvertálása, ami a `noao.astutil.setjd` csomaggal történt, illetve érdemes a kozmikus sugarakat a `noao.imred.crutil.cosmicrays` taszk alkalmazásával kiszűrni.

Ezek után akár már fotometrálnánk is, csak hogy a képeken a csillagok egymástól elcsúsznak, mivel a távcső nem vezet pontosan, így képről képre új koordinátasort kellene megadni. Ugyanakkor *összetolással* az összes felvételen egy referencia képhez igazíthatjuk a csillagokat. Ennek több módja van, melyek közül a `noao.immatch.xregister` csomag használata tűnt célszerűnek. Végeredményként az összes képen ugyanazon pixelkoordinátáknál fogjuk megtalálni a csillagokat.

4.2. A fotometrálás lépései

Még a fotometrálás megkezdése előtt *medián átlagolást* végeztem az egymás után készült képeken hármásával és ötösével, így egyúttal az átlagolt képeken is elvégezhető lett a fotometrálás. Az átlagoláshoz a `noao.immatch.imcombine` csomagot használtam, ami – mint a továbbiakban használt csomagok is mind – szintén az „IRAF” programcsomag alprogramjai.

Jóllehet a CCD kamera látómezeje elég kicsi, és így kevés (szám szerint nagyjából 10 és 25 közötti) kellően fényes csillagot találunk a differenciális fotometriához, mégis hasznos volt a `noao.digiphot.daophot.daofind` csomag segítségével a *csillagok* automatikus *megkeresése*, hiszen gyorsabb művelet, mint egyesével kiírni a pixelkoordinátákat egy fájlba minden esti mérés esetében. Hasznos elsajátítani a használatát, mert ugyanúgy fel lehet vele dolgozni nagyobb látómezőket is, amelyeken akár több száz, több ezer csillagot fellelhetünk.

A megtalált *csillagok fényességének kimérésére* a `noao.digiphot.daophot.qphot` programot használtam, amely apertúra-fotometriát hajt végre. Miután a nyers adatfájlokból a megfelelő formára hoztam az adatsoromat minden csillagnak az egész éjszaka alatt mutatott fényessége szűrőnként egy-egy fájlba került. Ezek után már lehetőség nyílt a differenciális fotometriához szükséges összehasonlító csillagok kiválasztására. A `noao.digiphot.daophot.daofind` csomaggal talált csillagok mindegyikéről készítettem differenciális fénygörbét, melyeken jól láthatóvá váltak a változó csillagok.

Az elkészült fénygörbék alapján minden esetben *négy nem változó csillag kiválasztása* történt meg, amelyeket összehasonlító csillagként használtam. Ezen négy csillag egyesével mért, és összeátlagolt fényességéből vontam ki az exobolygó szülő csillagának fényességét, majd ezen *differenciális fénygörbéket* ábrázoltam¹, illetve ezalatt készültek el az illesztéshez használható adatsorok is. A fénygörbe-illesztésnél minden esetben a csillagok átlagfényességével képzett adatsorokat használtam, amelyek az ötösével összeátlagolt képekből születtek. Ez utóbbi választás oka, hogy az említett képek produkálták a legkisebb szórást, amint azt az alábbiakban látjuk majd.

4.3. A fénygörbeillesztés

4.3.1. Elvi alapok

Az alapkonceptió [2] szerint a csillagot egy széle felé sötétedő, a bolygót pedig egy teljesen sötét korongként kezeljük. A tranzit paramétereinek illesztésénél a következő egyenletet illesztjük a fénygörbére:

$$m(t_i) = A - 2,5 \log F(z[t_i, t_0, D, b], p, u) + B(t_i - t_{\text{mean}}) + C(t_i - t_{\text{mean}})^2, \quad (1)$$

ahol $m(t_i)$ a t_i időpontokban a relatív magnitúdó, $F(z, p, u)$ a relatív fluxus, melyben a z a relatív szeparáció vetülete, p a csillag és a bolygó sugarának aránya, u pedig a szélsötétedési együttható (a cikkben c_1 jelöli) illetve b az ütközési paraméter. Az $F(z, p, u)$ fluxus analitikus meghatározását Mandel & Agol cikkében [3] leljük meg, melyben egyenletesen világító forrás szélsötétedését, valamint kvadratikus és nemlineáris szélsötétedéseket vizsgáltak. A legtöbb esetben fennáll a „kicsiny bolygó” megközelítés – miszerint a p sugárárány nem nagyobb, mint 0,2 –, amikor a szélsötétedés lineáris függéssel modellezhető, melynek az u együttható lesz a paramétere. A a nullpont-eltolást, B és C tényezők pedig a levegőtömeg fénygörbében okozott szisztematikus trendjeit írja le. A fedések részletes tárgyalásánál a lineáris és kvadratikus rendű szisztematikus hibák alatt ezen trendeket fogom érteni.

Ezek ismeretében az adatsorokat az *Exoplanet Transit Database (ETD)* nevű honlap [12] interaktív fénygörbe-illesztő programjának segítségével dolgoztam fel, melynél a legfőbb változtatandó paraméter a szélsötétedési paraméter volt. A szélsötétedés értékét az általánosan elfogadott $0,6 \pm 0,1$ értékek között vizsgáltam 0,05-es lépésközzel, melyek közül a legjobban illeszkedő görbénél kapott értéket, és az abból nyert görbéket fogom a későbbiekben megmutatni. A következő bekezdésben bemutatok egy részletesebb vizsgálatot is, amely a szélsötétedés és az illesztésből nyert paraméterek egymástól való függését elemzi.

¹ Az ábrázolást a „gnuplot” programmal végeztem.

4.3.2. Szélsötétedéstől való függés vizsgálata

Az általam használt fénygörbe-illesztő szoftver a *lineáris szélsötétedés analitikus alakjával* számol, amelyet a következő formába írhatunk fel:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u(1 - \mu), \quad (2)$$

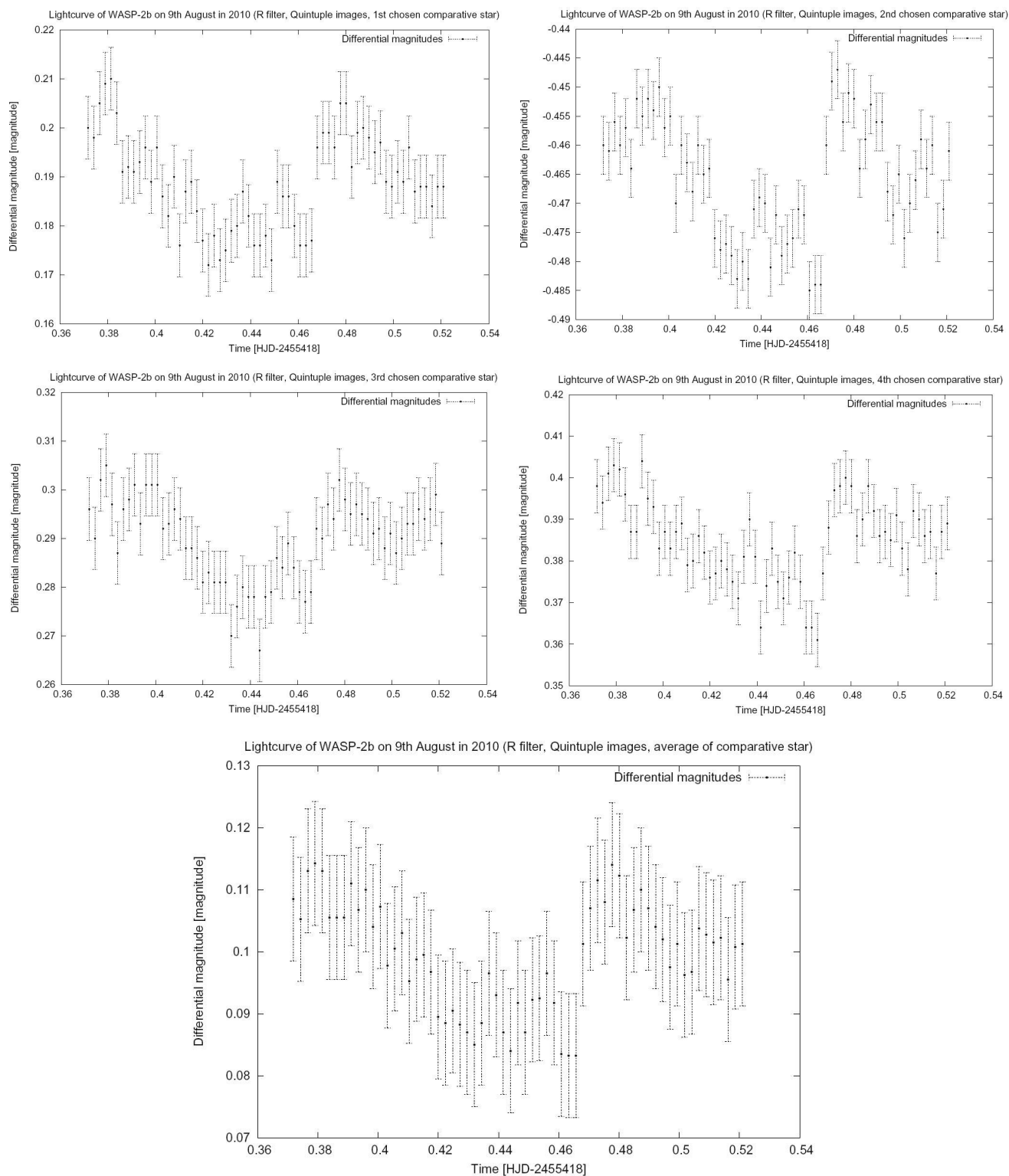
ahol μ a látóirány és a csillag felületének normálisa által bezárt szög koszinuszát jelenti, illetve az u mennyiséget a szélsötétedési paraméternek. Bár a szürke atmoszféra közelítést alkalmaztuk a megfigyelt csillagoknál – s ezért használtam a fent már említett becslést a szélsötétedési paraméterre – mégis érdemesnek tartottam tágabb tartományon megvizsgálni a szélsötétedést. Ezért a szélsötétedést 0,1-től 0,9-ig 0,05-os lépésközzel változtatva felvázoltam az O-C érték, a fedés mélység és a fedés hossz függését e szélsötétedési paramétertől (az eredmény grafikus ábrázolása a melléklet D. fejezetében található minden éjszakára külön-külön).

Összességében az állapítható meg a diagramokról, hogy akár a szürke atmoszféra közelítésben használatos 0,6 szélsötétedési értéknél is *ingadozásokat tapasztalunk* a paraméter kicsiny változtatása esetén. Erre a TrES-2b (D.2. fejezet) Johnson-féle R szűrővel kapott görbéje a legjobb példa, ami amúgy az exobolygó észlelések egyik legkedveltebb fotometriai sávja. Ugyanakkor jegyezzük meg, hogy az ingadozások bőven benne vannak a hibasávokban, így igazából releváns változás a szélsötétedés értékének változtatásával nem történik a vizsgált paraméterek esetében.

Mindazonáltal érdemes megemlíteni, hogy a lineáris szélsötétedési modellnél jóval *precízebb eljárások* is léteznek, melyek a μ mennyiség valamilyen hatványkitevőjével számolnak, avagy annak logaritmusával. A legújabb eredmények igen bizakodóak egy úgynevezett négy együtthatós illesztéses módszer hatékonyságát illetően. A felsorolt módszerek mind pontosabb, jobb leírást adnak a lineárisnál [18].

4.3.3. A fénygörbe pontjainak előállításához használt módszerek bemutatása

A 2010. augusztus 9-ei éjszakán készült WASP-2b fedés fénygörbéin szemléltetem az alkalmazott eljárásokat. Az egy összehasonlító csillaggal alkotott fénygörbéken jól látszik, hogy az összehasonlító változásai igen drasztikusan befolyásolhatják a fénygörbe alakját, ami viszont az összehasonlító fényességének átlagával képzett görbén szépen kisimul.

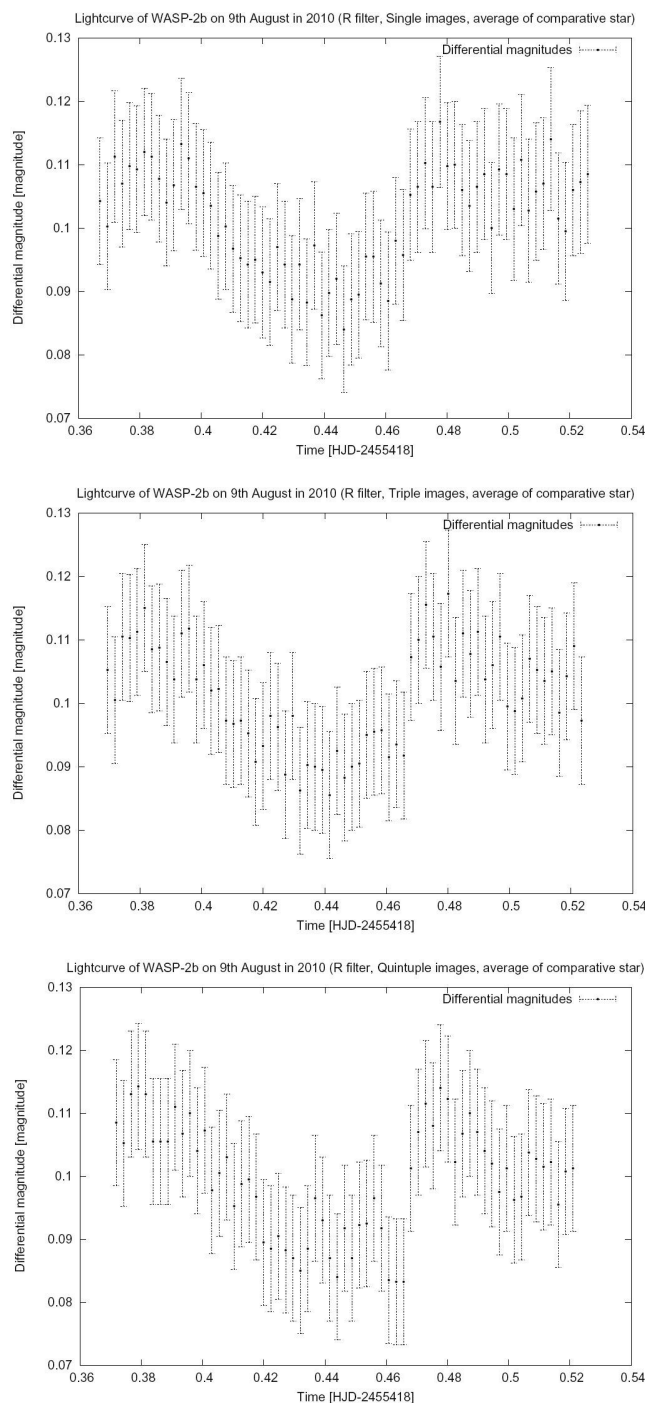


1. ábra: A négy összehasonlító csillaggal egyesével képzett differenciális fénygörbék és az összehasonlító fényességének átlagával képzett differenciális fénygörbe

Ezek alapján elsődlegesen az összehasonlító fényességének átlagával dolgoztam, mindazonáltal egyes esetekben nem volt a látómező területén négy darab megfelelő összehasonlító csillag – például hasonló fényességű, vagy csak egyszerűen nem változó csillag –, így ott egy-egy összehasonlítót önmagában használva jóval látványosabb eredményt kaptam. A 2010. november 6-ai WASP-33b fedésnél találtam ez utóbbi megoldást hasznosabbnak, mely esteiken jellemzően egy-egy kisebb felhőátvonulás is megzavarta a mérést, így rontva az adatsor minőségét.

A másik módszer a képek *medián átlagolása* volt, amelynek menetét a fotometráls leírásánál már felvázoltam. Az ábrákon az figyelhető meg, hogy a medián átlagolás révén a fénygörbéken az egyes pontok hibája – ha nem is nagy mértékben, de – lecsökken. Emiatt minden esetben az ötösével átlagolt képekből kapott fénygörbéhez illesztettem a modellgörbét, amelyeket az alábbiakban részletezek.

Itt említeném meg, hogy a differenciális magnitúdók képzésekor a fényességek hibái azok négyzetösszegének négyzetgyökeként álltak elő.



2. ábra: Az egyedi képekből, illetve a hármasával és ötösével átlagolt képekből nyert fénygörbék

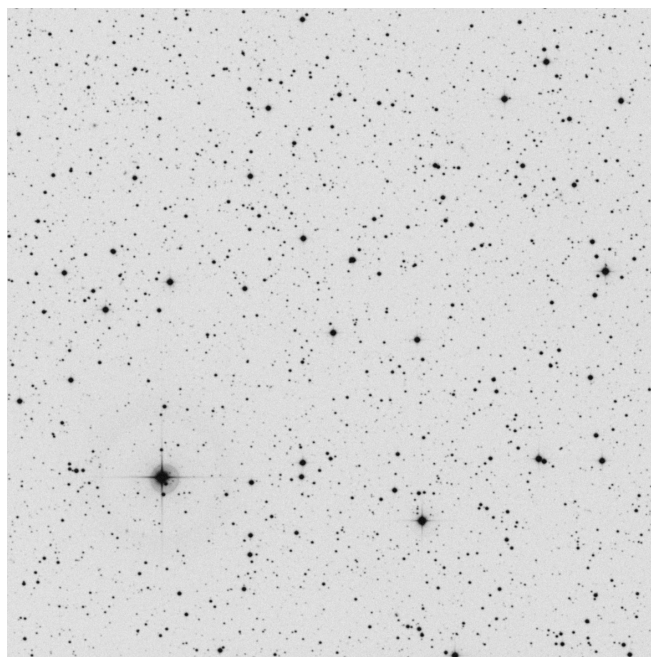
5. A mérési eredmények tárgyalása

Amennyiben lehetséges volt fénygörbét illeszteni a mért pontokra, ott az illesztés eredményeit tüntettem fel, a grafikonok a mellékletben találhatóak; amikor pedig nem, akkor a fénygörbékét vázoltam. A *STSci Digitized Sky Survey* program látómezői láthatóak az egyes objektumoknál.

5.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.)

A csillag és bolygójának fontosabb adatai [8]:

m_V [m]	11,98
Színképtípus	K1V
T_{eff} [K]	5200±200
M_V [m]	6,2±0,5
M^*/M_{\odot}	0,79 ^{+0,15} _{-0,04}
R^*/R_{\odot}	0,78±0,06
Periódus [nap]	2,152226±0,000004
a [Cs. E.]	0,0296–0,0318
R_P/R^*	0,119–0,140
M_P/M_{Jup}	(0,81–0,95)±0,04
R_P/R_{Jup}	0,65–1,26
$b=a \cos i / R^*$	0–0,08



3. ábra: A WASP-2b 20°×20°-os látómezője

A fénygörbe illesztésénél az alábbi paraméterekkel kaptam a legjobb illeszkedést, és ezek az alábbi fedéshosszt és mélységet adták a különböző színszűrőkben:

	V szűrő	R szűrő	I szűrő
A fedés középideje [HJD-2455418]	0,43708±0,00138	0,43768±0,00124	0,43899±0,00146
A fedés hossza [perc]	104,5±5,9	117,8±5,3	115,0±6,3
A fedés mélysége [m]	0,0205±0,0028	0,0209±0,0026	0,0202±0,0030
A keresett szélsőtétedési paraméter értéke	0,5	0,5	0,5
Az átlagos eltérés az illesztett görbétől [m]	0,0045	0,0038	0,0044

A lineáris és a kvadratikus rendű szisztematikus hibák is levonásra kerültek. A heliocentrikus korrekció 0,00530 nap volt. Az illesztett görbék a melléklet A.1. fejezetében találhatóak.

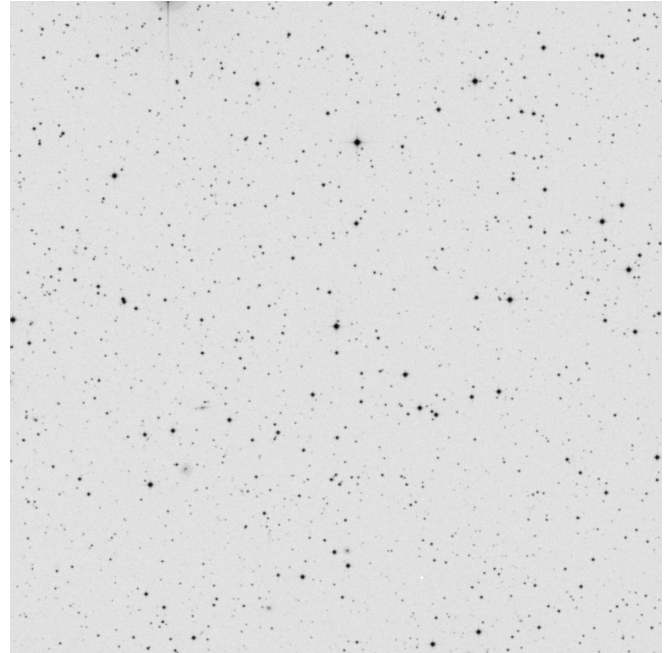
Itt a fedés középideje meglepően közel esik a különböző szűrőkben, illetve a fedés hossza és mélysége is kellően kicsi hibákkal terhelt. Ugyanakkor az O-C görbe lefelé hajló lineáris trendje azt sugallta, hogy új periódus számolására volt szükség.

Az új periódust szintén az ETD honlap interaktív felületén állapítottam meg, ahol a periódus legutolsó megadott tizedesjegyét változtattam, még hozzá csökkentettem, hiszen a mellékletben látható O-C diagramok negatív meredekségűek, azaz a számolt periódus nagyobbak adódott, mint valójában kellett volna. Így a 2,152226 napos helyett 2,152221 napos periódusnál kaptam vízszintes (konstans) egyenest, vagyis közelítőleg ez a helyes periódus. Ez az $5 \cdot 10^{-6}$ nap eltérés valójában 4,32 másodperc eltérést jelent (ami kevesebb, mint 0,003%-os relatív eltérést takar), ami az általam készített fénygörbék időfelbontásánál jóval rövidebb idő. Az új O-C diagram a melléklet B. fejezetében található.

5.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.)

A csillag és bolygójának fontosabb adatai [6]:

m_V [m]	11,41
Színképtípus	G0V
T_{eff} [K]	5850 ± 50
M^*/M_{\odot}	$0,98 \pm 0,062$
R^*/R_{\odot}	$1 \pm 0,036$
Periódus [nap]	$2,470614 \pm 10^{-6}$
a [Cs. E.]	$0,03556 \pm 0,00075$
R_P/R^*	$0,1253 \pm 0,0010$
M_P/M_{Jup}	$1,253 \pm 0,052$
R_P/R_{Jup}	$1,261 \pm 0,041$
$b = a \cos i / R^*$	$0,8540 \pm 0,0062$



4. ábra: A TrES-2b $20^\circ \times 20^\circ$ -os látómezője

A fénygörbe illesztésénél az alábbi paraméterekkel kaptam a legjobb illeszkedést, és ezek az alábbi fedéshosszt és mélységet adták a különböző színszűrőkben a két fedés esetében:

	V szűrő	R szűrő	I szűrő
A fedés középideje [HJD-2455442]	$0,47978 \pm 0,00542$	$0,47581 \pm 0,00514$	$0,47400 \pm 0,00514$
A fedés hossza [perc]	$106,1 \pm 27,0$	$95,6 \pm 22,9$	$136,3 \pm 26,4$
A fedés mélysége [m]	$0,0112 \pm 0,0047$	$0,0058 \pm 0,0029$	$0,0116 \pm 0,0043$
A keresett szélsőtétedési paraméter értéke	0,55	0,5	0,5
Az átlagos eltérés az illesztett görbétől [m]	0,0072	0,0050	0,0055

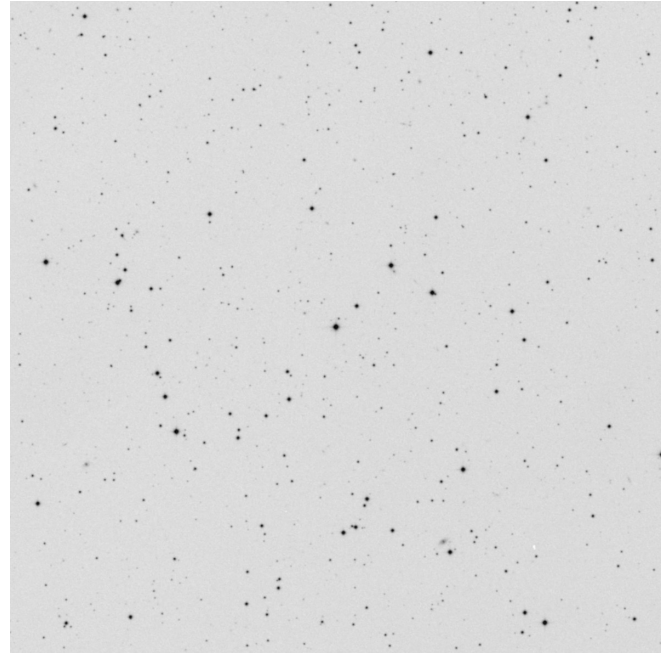
Csak a lineáris szisztematikus hibák is kerültek levonásra. A heliocentrikus korrekció 0,00156 nap volt. Az illesztett görbék a melléklet A.3. fejezetében találhatók.

A fedés középidejének ingadozása a különböző szűrőkben itt is további vizsgálatokra adhat indítékot, ugyanakkor a többi paraméter értéke illeszkedik az eddigi mérések által tükrözött képbe, a mellékletben a régi értékek közé jól belesimulnak az új eredmények. Sajnos – ahogyan a fénygörbe hiányosságán is látszik – a rossz időjárás miatt elég pontatlan illeszkedést tudtam csak elérni.

5.3. HAT-P-10/WASP-11b (2010. október 30.)

A csillag és bolygójának fontosabb adatai [9]:

m_V [m]	11,89
Színképtípus	K3V
T_{eff} [K]	4980±60
M^*/M_{\odot}	0,82±0,03
R^*/R_{\odot}	0,81 ^{+0,03} _{-0,02}
Periódus [nap]	3,722469±6,7·10 ⁻⁶
a [Cs. E.]	0,0439 ^{+0,0006} _{-0,0009}
R_P/R^*	0,1332±0.0013
M_P/M_{Jup}	0,460±0.028
R_P/R_{Jup}	1,045 ^{+0,05} _{-0,033}
$b=a \cos i / R^*$	0,238 ^{+0,130} _{-0,093}



5. ábra: A HAT-P-10b 20°×20°-os látómezője

A fénygörbe illesztésénél az alábbi paraméterekkel kaptam a legjobb illeszkedést, és ezek az alábbi fedéshosszt és mélységet adták a különböző színszűrőkben:

	B szűrő	V szűrő	R szűrő	I szűrő
A fedés középideje [HJD-2455500]	0,45495±0,00373	0,45985±0,00536	0,45705±0,00226	0,44941±0,00239
A fedés hossza [perc]	195,5±14,0	154,8±18,4	114,8±8,0	123,9±8,4
A fedés mélysége [m]	0,0418±0,0055	0,0158±0,0041	0,0246±0,0032	0,0200±0,0027
A keresett szélsőtédési paraméter értéke	0,5	0,5	0,5	0,5
Az átlagos eltérés az illesztett görbétől [m]	0,0156	0,0103	0,0076	0,0067

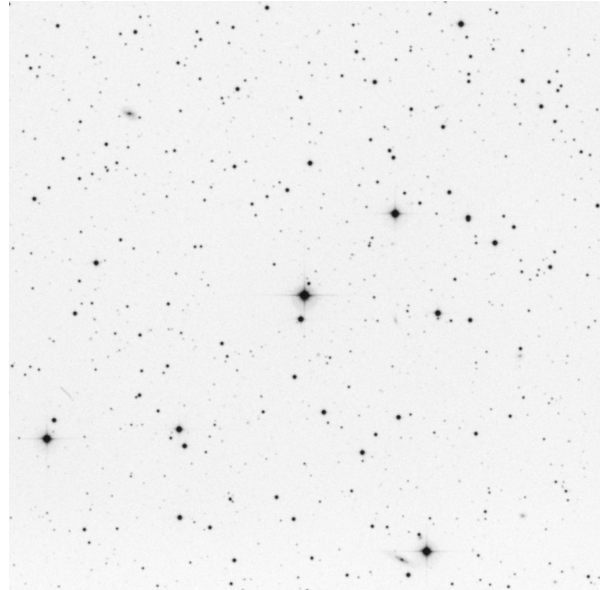
A lineáris rendű szisztematikus hibák kerültek csak levonásra. A heliocentrikus korrekció 0,00539 nap volt. Az illesztett görbék a melléklet A.4. fejezetében található.

Észrevehetjük, hogy a fedés hossza éppúgy mint a fedés mélysége a különböző szűrőkben igen eltérő. A továbbiakban megválaszolendő kérdés, hogy vajon ezek az eltérések valós fizikai jelenség miatt adódtak-e. Mivel elég kevés mérés született erről az exobolygóról, így nehéz lenne megállapítani bármi hiteleset a kapott grafikonokról, ezért hasznos lehet több, precízebb mérés elvégzése is a jövőben.

5.4. WASP-33b (2010. november 6. és november 11.)

A csillag és bolygójának fontosabb adatai [10]:

m_V [m]	8,3
Színképtípus	A5
T_{eff} [K]	7400±200
M^*/M_{\odot}	1.495±0.031
R^*/R_{\odot}	1.444±0.034
Periódus [nap]	1,2198669±1,2·10 ⁻⁶
a [Cs. E.]	0,02555±0,00017
M_P/M_{Jup}	< 4,1
R_P/R_{Jup}	1,497±0,045
$b=a \cos i / R^*$	0,186±0,032



6. ábra: A WASP-33b 20°×20°-os látómezője

A fénygörbe illesztésénél az alábbi paraméterekkel kaptam a legjobb illeszkedést, és ezek az alábbi fedéshosszt és mélységet adták a különböző színszűrőkben:

	B szűrő	V szűrő	R szűrő	I szűrő
A fedés középideje [HJD-2455507]	0,51848±0,00231	0,50438±0,00220	0,51768±0,00422	0,51656±0,00244
A fedés hossza [perc]	162,7±7,8	140,6±7,6	163,0±13,7	192,7±8,1
A fedés mélysége [m]	0,0152±0,0017	0,0214±0,0024	0,0081±0,0018	0,0141±0,0015
A keresett szélsőtédési paraméter értéke	0,5	0,5	0,5	0,5
Az átlagos eltérés az illesztett görbétől [m]	0,0062	0,0082	0,0068	0,0052
A fedés középideje [HJD-2455512]	0,40589±0,00510	0,40458±0,00254	0,39026±0,00308	0,40735±0,00233
A fedés hossza [perc]	167,8±16,4	179,5±8,6	136,0±10,3	181,6±7,7
A fedés mélysége [m]	0,0112±0,0040	0,0225±0,0035	0,0104±0,0027	0,0171±0,0025
A keresett szélsőtédési paraméter értéke	0,5	0,5	0,5	0,5
Az átlagos eltérés az illesztett görbétől [m]	0,0103	0,0084	0,0068	0,0065

A november 6-ai mérés illesztéséhez elég volt a lineáris rendű szisztematikus hibák levonása, míg a november 11-ei adatok a kvadratikus rendű hibák levonását is igényelték. A heliocentrikus korrekció 0,00531 illetve 0,00530 nap volt. Az illesztések a melléklet A.5. fejezetében találhatóak.

A WASP-33b jelű bolygó egy δ Scuti változócsillag körül kering rendkívül közel a szülőcsillagához, ami erős kölcsönhatással jár, akár anyag-átáramlás is történhet. Jóllehet a csillag pulzációjának periódusa $67,57 \pm 0,08$ perc – ami jócskán rövidebb, mint a fedés megállapított hossza –, annak amplitúdója mindössze 0,9 millimagnitúdó, ami a detektorunk érzékenységi határa, ezért nem szükséges figyelembe venni, az ebből adódó fényességben bekövetkezett ingadozásokat [19]. Ezen exobolygó a további kutatásaim során kiemelt figyelmet fog kapni.

6. További mérési és kiértékelési tervek

- x A mérési eljárás tökéletesítése érdekében további tranzit-jelenségek megfigyelését tervezem a Szegedi Csillagvizsgálóban, illetve nagyobb obszervatóriumokban, továbbá kutatócsoportokkal együttműködve szinkron-észlelésre is szívesen vállalkozok, ahogy eddig is külön figyelemmel kísértem az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet munkatársainak exobolygós megfigyeléseit.
- x Az általam vizsgált csillagok esetében nem jelentkezett különösebb probléma az apertúra-fotometria alkalmazásával, de egyes célcillagoknál – melyek közvetlen közelében másik csillag is látszik – elengedhetetlen a *PSF-fotometria alkalmazása*, s ennek elsajátítását szükségesnek tartom.
- x A már feldolgozott mérésekből is látszik, hogy esetenként szükség lehet új *O-C illesztésre*, mint ahogy tettem is a WASP-2b exobolygó esetében, mindazonáltal a későbbiekben magam kívánok programot írni az illesztéshez.
- x Már a mérés megtervezésénél figyelembe vettem annak lehetőségét, hogy a több színszűrőben megfigyelt tranzit jelenségek többlet információval szolgálhatnak a bolygórendszerrel illetően, így a *színindex görbék vizsgálata* is jövőbeli terveim között szerepel.
- x Az esetenként túl nagy zaj megszürése érdekében a feldolgozási eljárások mélyebb megértésével lehetőségem nyílna az eddigi mérések *pontosabb kiértékelésére* is. Ennek keretében szeretnék többfajta fénygörbe-illesztési eljárással megismerkedni a közeljövőben.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni a Szegedi Tudományegyetemnek és *Dr. Szatmáry Károlynak*, hogy lehetőséget biztosítottak a Szegedi Csillagvizsgáló 40 centiméteres főműszerének használatára. Köszönöm továbbá *Csák Balázsnak*, hogy bevezetett a mérőműszer használatának rejtelmeibe; *Dr. Szabó M. Gyulának* a célobjektum kiválasztásában nyújtott segítségét; *Dr. Székely Péternek* a kiértékelés technikai részleteivel kapcsolatos tanácsait és *Dr. Szatmáry Károlynak* az elméleti háttér megértésének biztosítását.

Ezen kívül szeretném megköszönni *feleségemnek* segítségét a programozási problémák megoldásában, az ábrák gondos rendezésében, és a türelmét, hogy elkészülhessen ez a dolgozat.

Szeged, 2010. november 15.

Ordasi András (csillagász szakos hallgató)

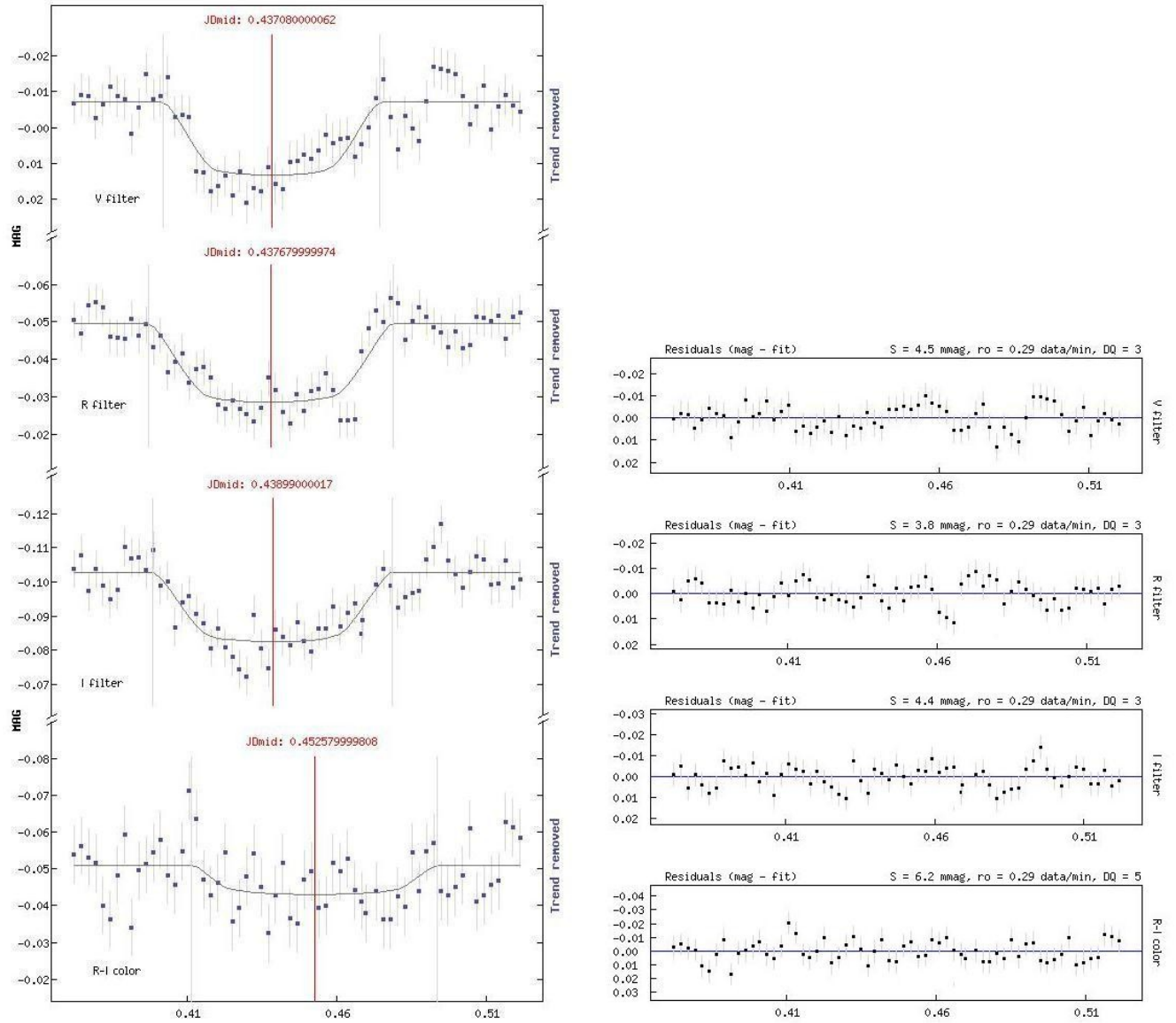
Felhasznált irodalom

1. **Haja Orsolya:** Fedési exobolygó rendszerek fotometriai vizsgálata
(2010, szakdolgozat, <http://www.astro.u-szeged.hu/oktatas/szakdolg.html>);
2. **Ondřej Pejcha:** Exoplanet transit parameters from amateur-astronomers observations
(2008, <http://var2.astro.cz/ETD/FitProcedureDescription-Pejcha2008.pdf>);
3. **Kaisey Mandel & Eric Agol:** Analytic light curves for planetary transit searches
(2002, ApJL, 580, 171);
4. **Szatmáry Károly:** Bolygók felfedezése más csillagok körül
(2008, <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>);
5. **Szalai Tamás:** Megvan az eddigi legkisebb szuper-Föld?
(2008, http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok/20080416_uj_szuperfold.html);
6. **Matthew J. Holman:** The Transit Light Curve (TLC) project. VI. Three transits of the exoplanet TrES-2 (2007, ApJ, 664, 1185);
7. **D. Pollacco et al.:** WASP-3b: a strongly-irradiated transiting gas-giant planet
(2007, MNRAS, 385, 1576);
8. **David Charbonneau et al.:** Precise radius estimates for the exoplanets WASP-1b and WASP-2b (2007, ApJ, 658, 1322);
9. **Bakos Gáspár et al.:** HAT-P-10b: a light and moderately hot jupiter transiting a K dwarf (2009, ApJ, 696, 1950);
10. **Lorenzo Iorio:** Classical and relativistic node precessional effects in WASP-33b and perspectives for detecting them
(2010, Astrophysics and Space Science, arXiv:1006.2707);
11. **Extrasolar Planets Encyclopaedia:** <http://exoplanet.eu>;
12. **Exoplanet Transit Database:** <http://http://var2.astro.cz/ETD/index.php>;
13. **HAT program honlapja:** <https://www.cfa.harvard.edu/~gbakos/HAT>;
14. **James Webb űrteleszkóp honlapja:** <http://www.jwst.nasa.gov>;
15. **KEPLER űrteleszkóp honlapja:** <http://www.kepler.arc.nasa.gov>;
16. **SuperWASP program honlapja:** <http://www.superwasp.org>;
17. **COROT űrtávcső honlapja:** <http://smc.cnes.fr/COROT>;
18. **Ian D. Howarth:** New limb-darkening coefficients and synthetic photometry for model-atmosphere grids at Galactic, LMC & SMC abundances
(2010, MNRAS, arXiv:1006.2707);
19. **E. Herrero et al.:** WASP-33: The first δ Scuti exoplanet host star and evidence of star-planet interactions (2010, A&A, arXiv:1010.1173).

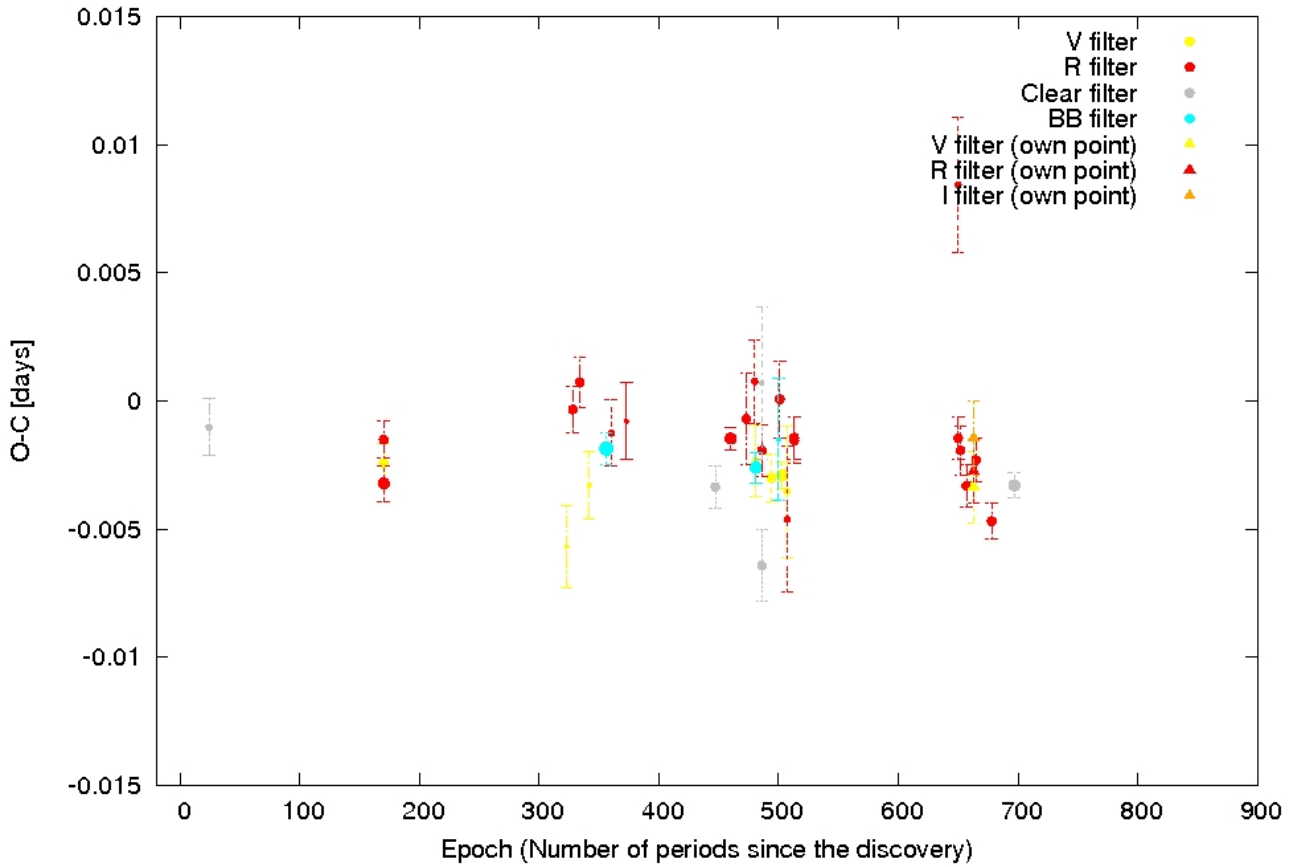
Mellékletek

A. Az illesztésből kapott grafikonok

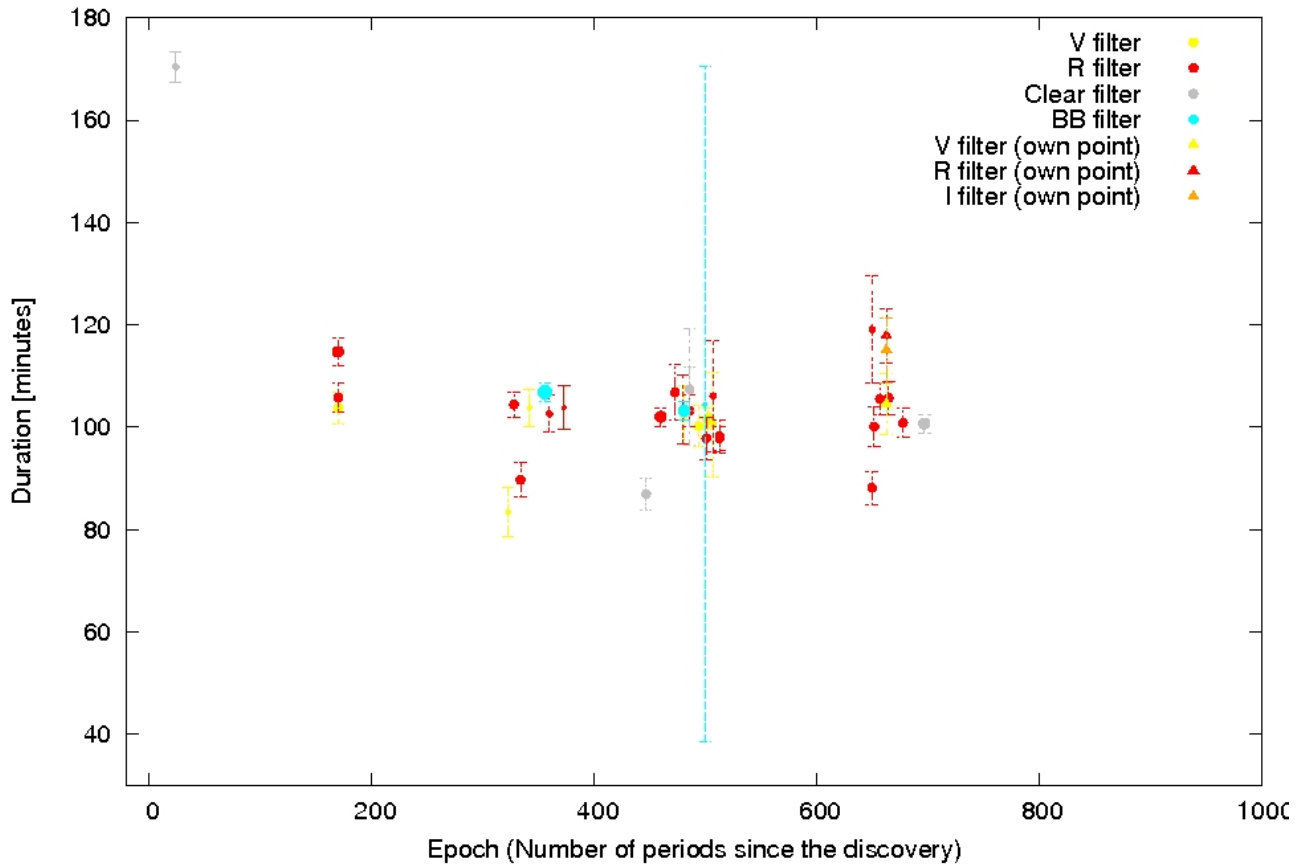
A.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.)



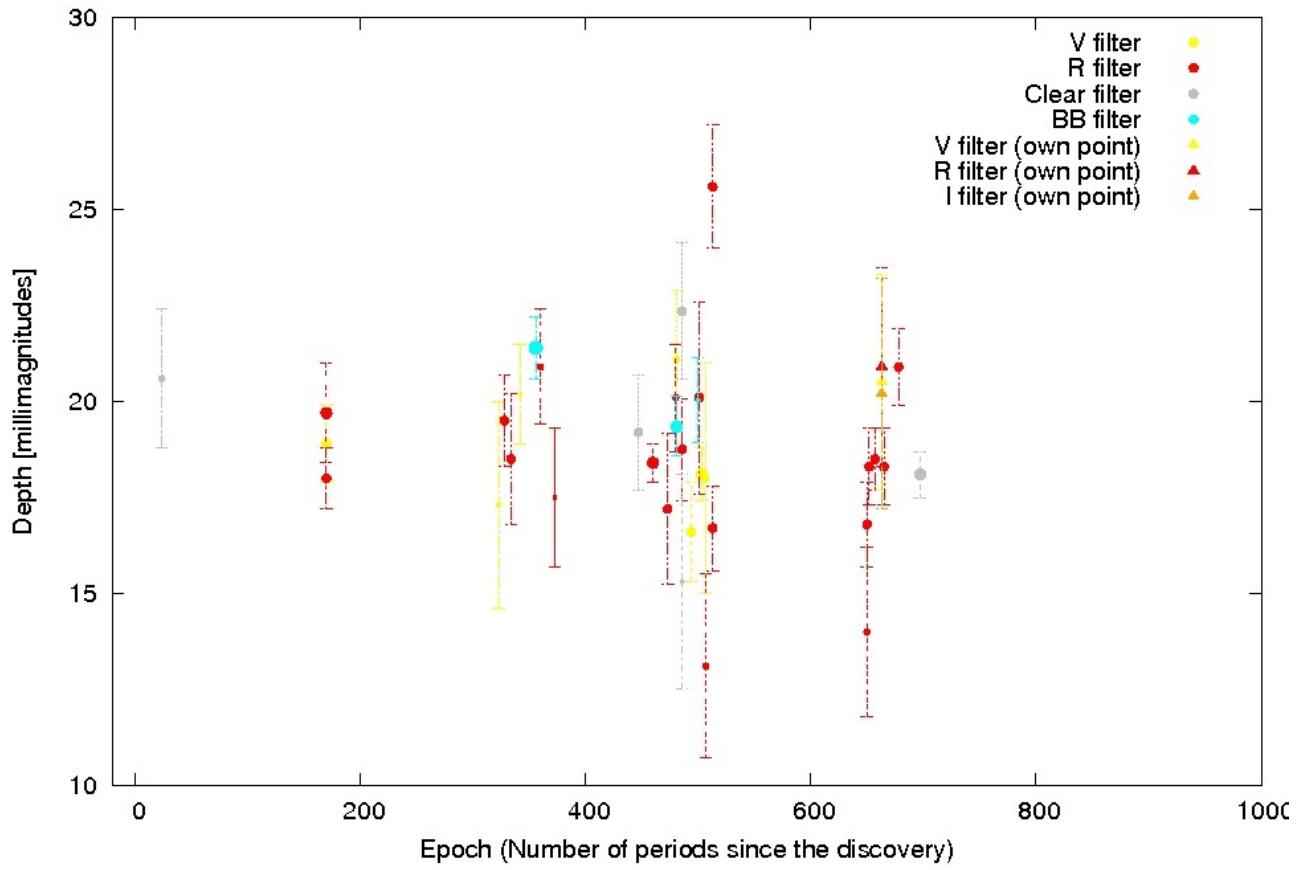
O-C diagram of WASP-2b based on all of the available measurements



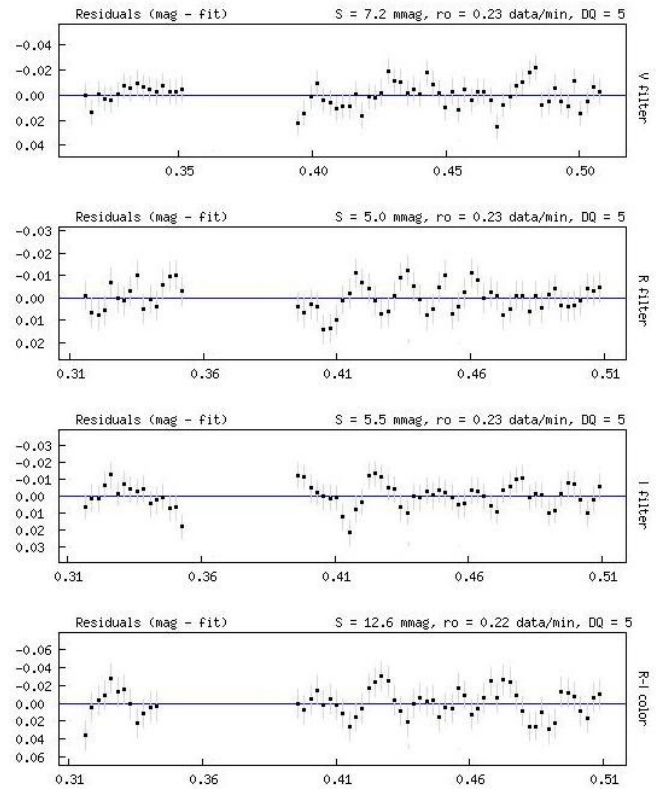
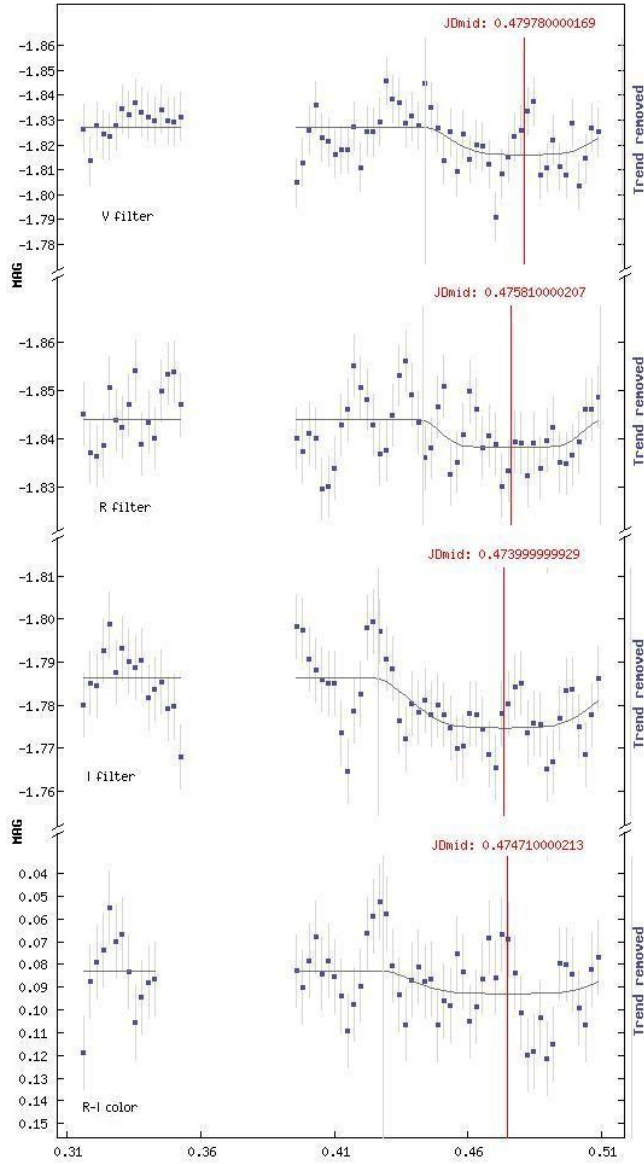
Duration diagram of WASP-2b based on all of the available measurements



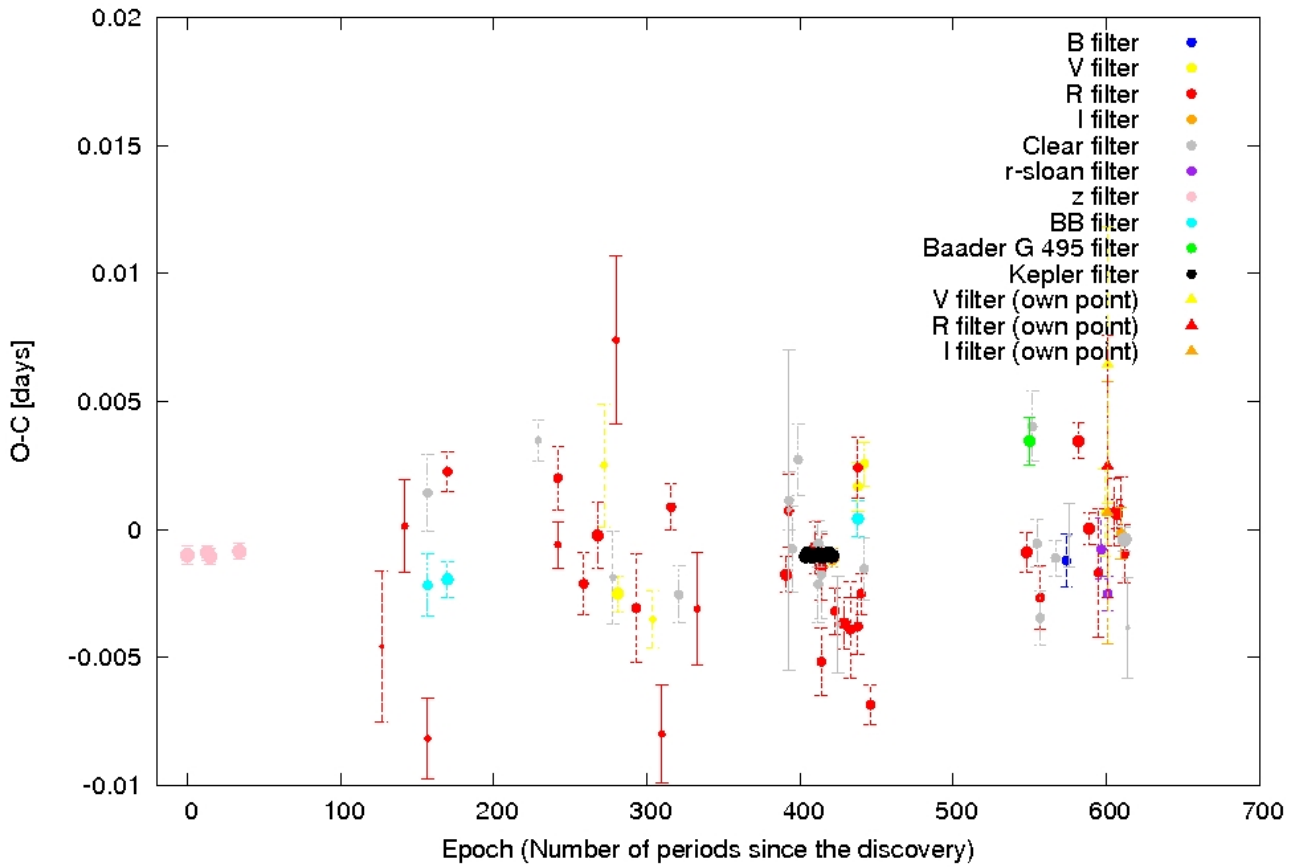
Depth diagram of WASP-2b based on all of the available measurements



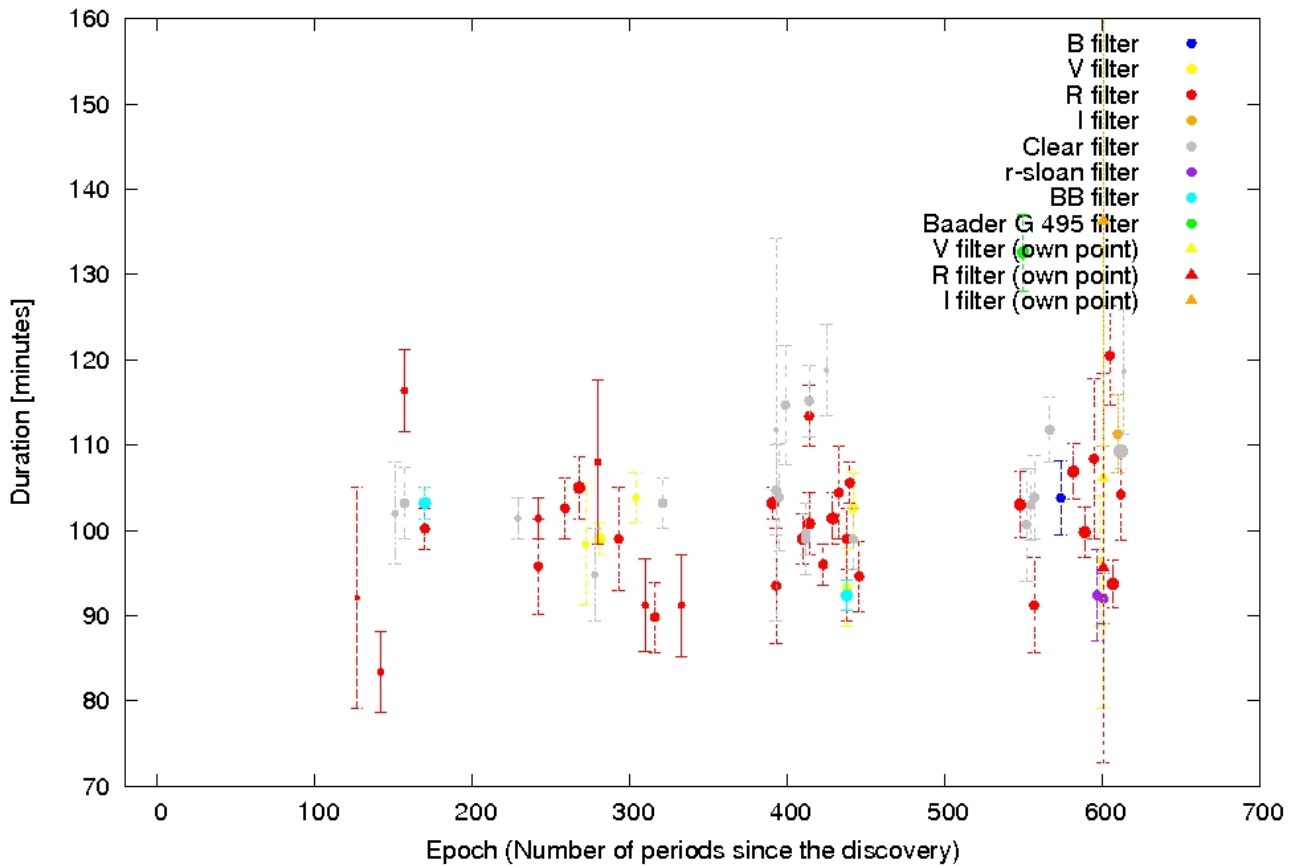
A.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.)



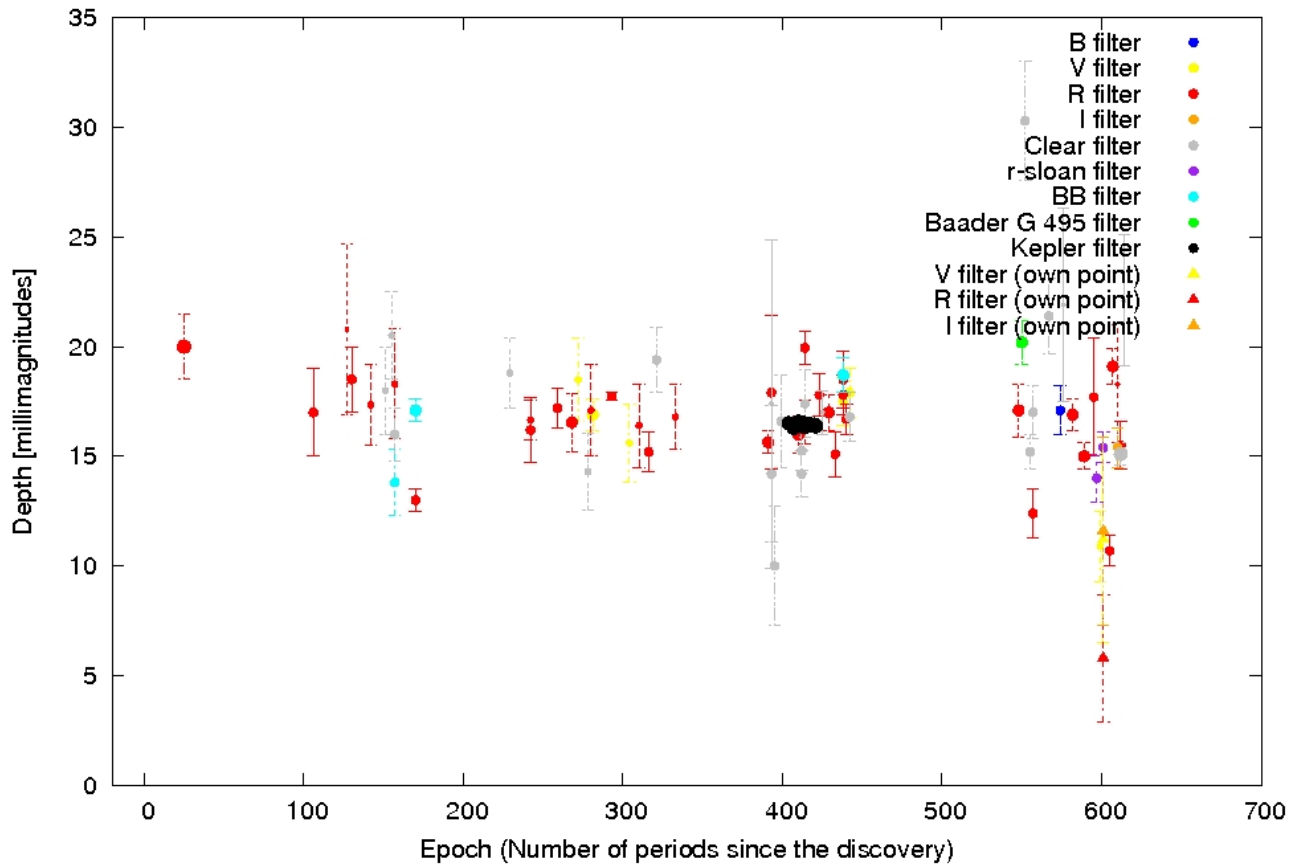
O-C diagram of TrES-2b based on all of the available measurements



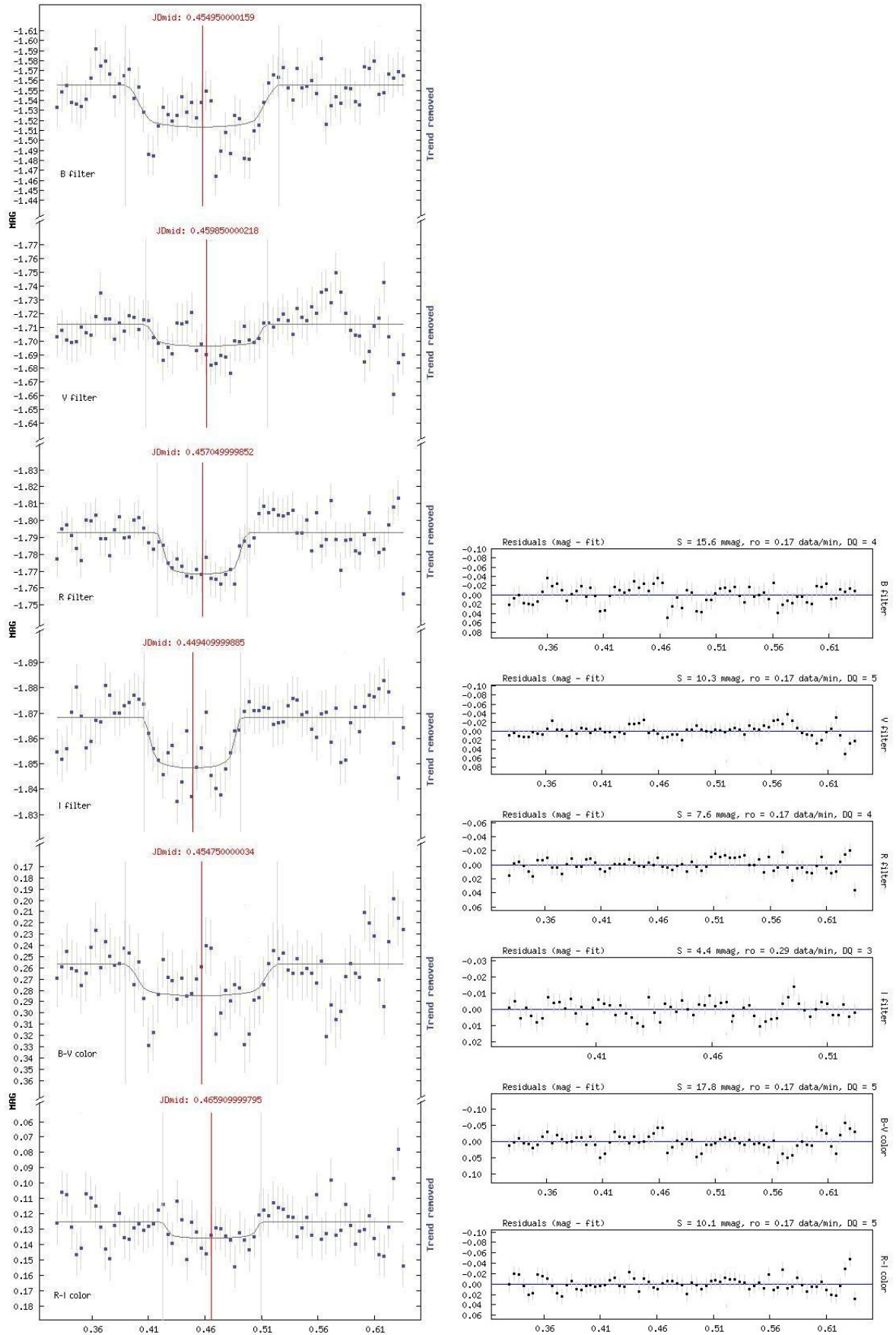
Duration diagram of TrES-2b based on all of the available measurements

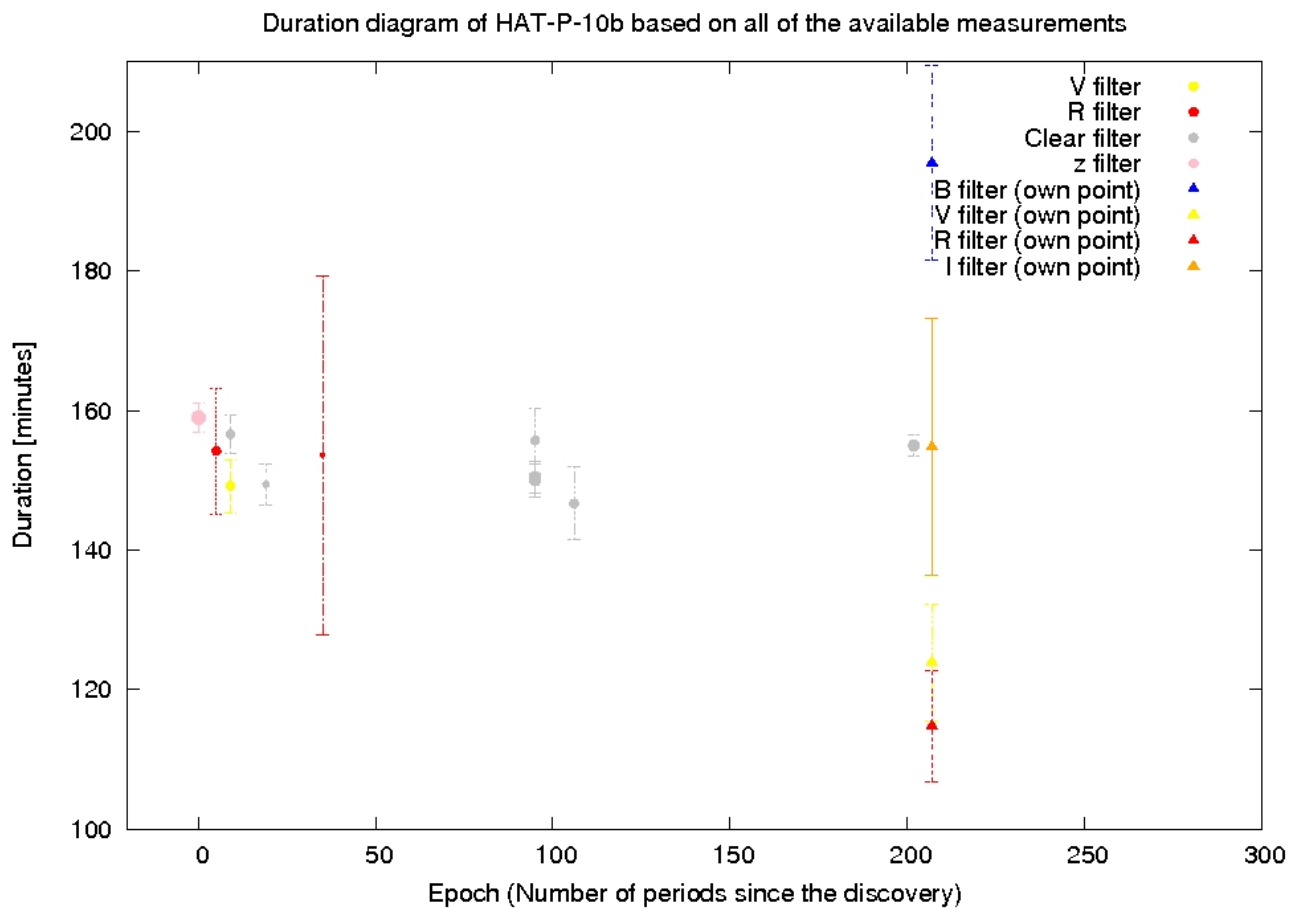
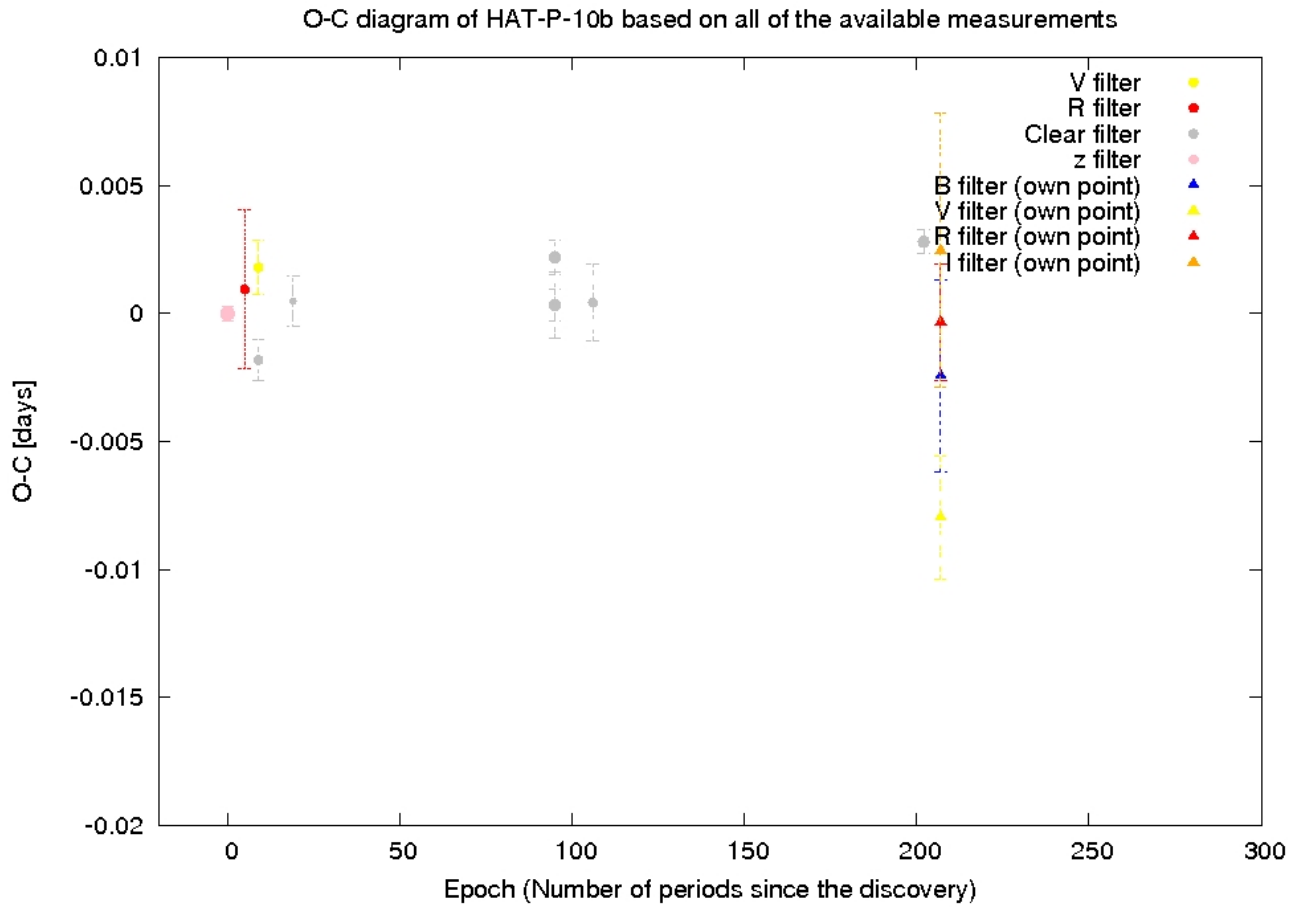


Depth diagram of TrES-2b based on all of the available measurements

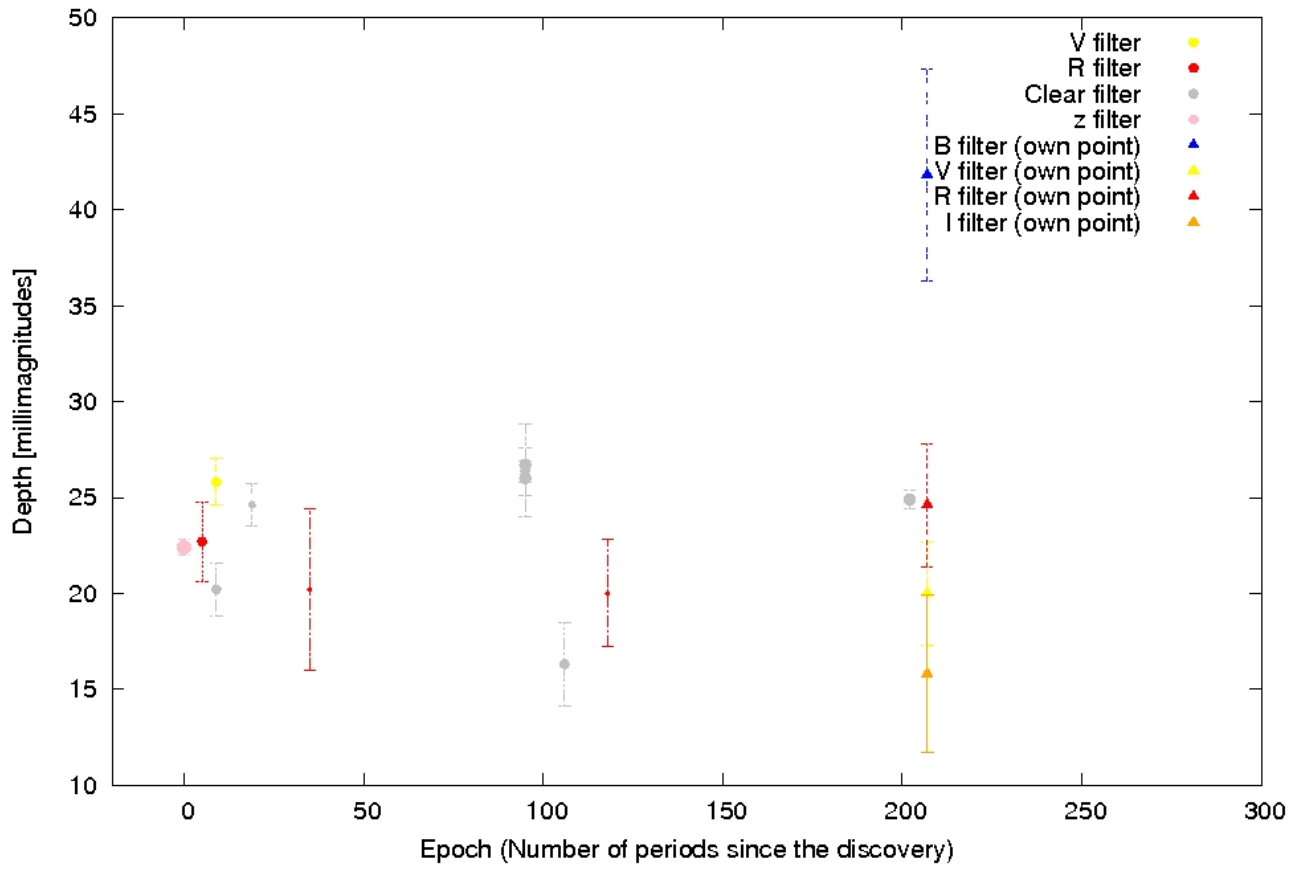


A.3. HAT-P-10/WASP-11b (2010. október 30.)

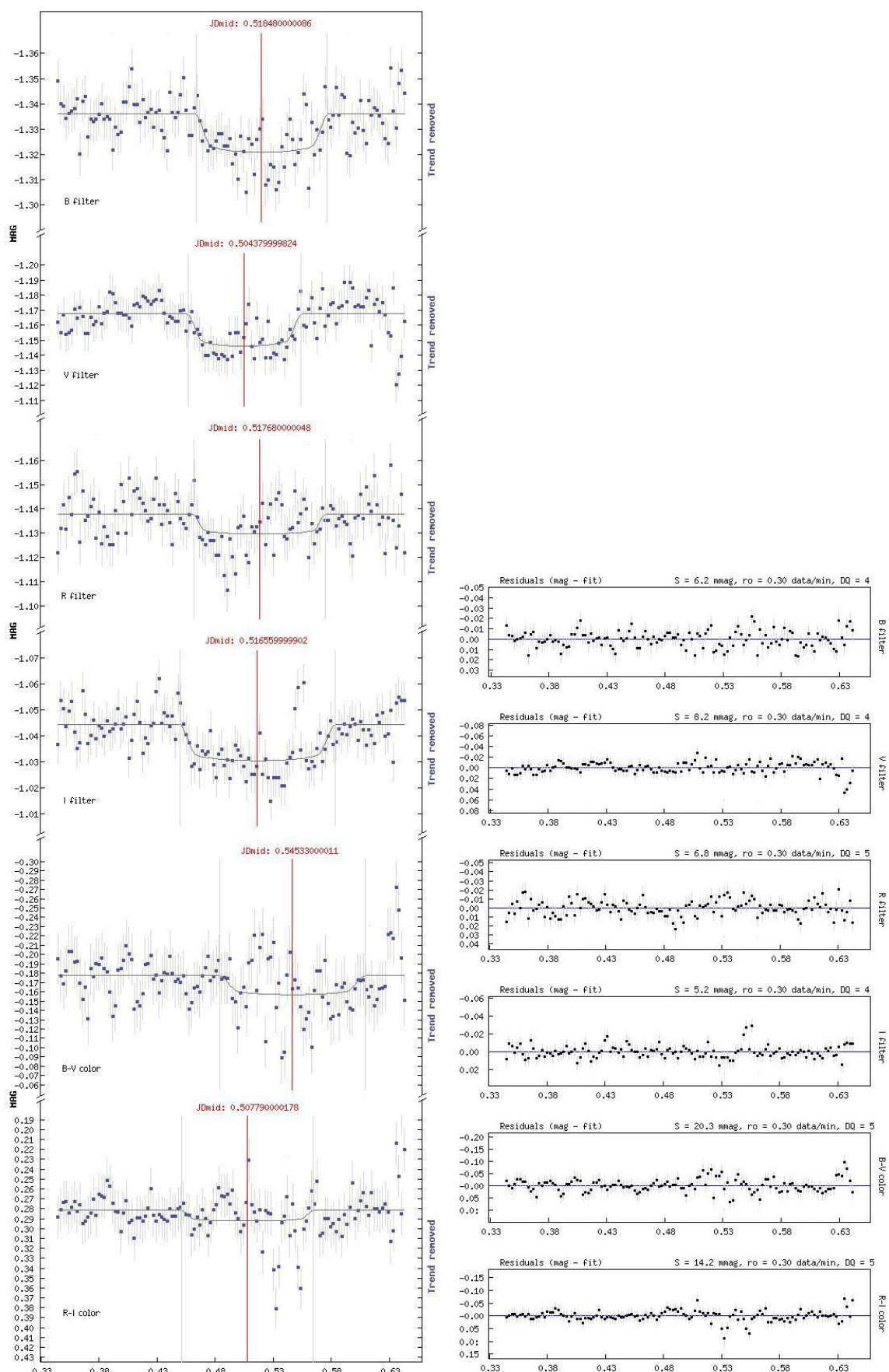




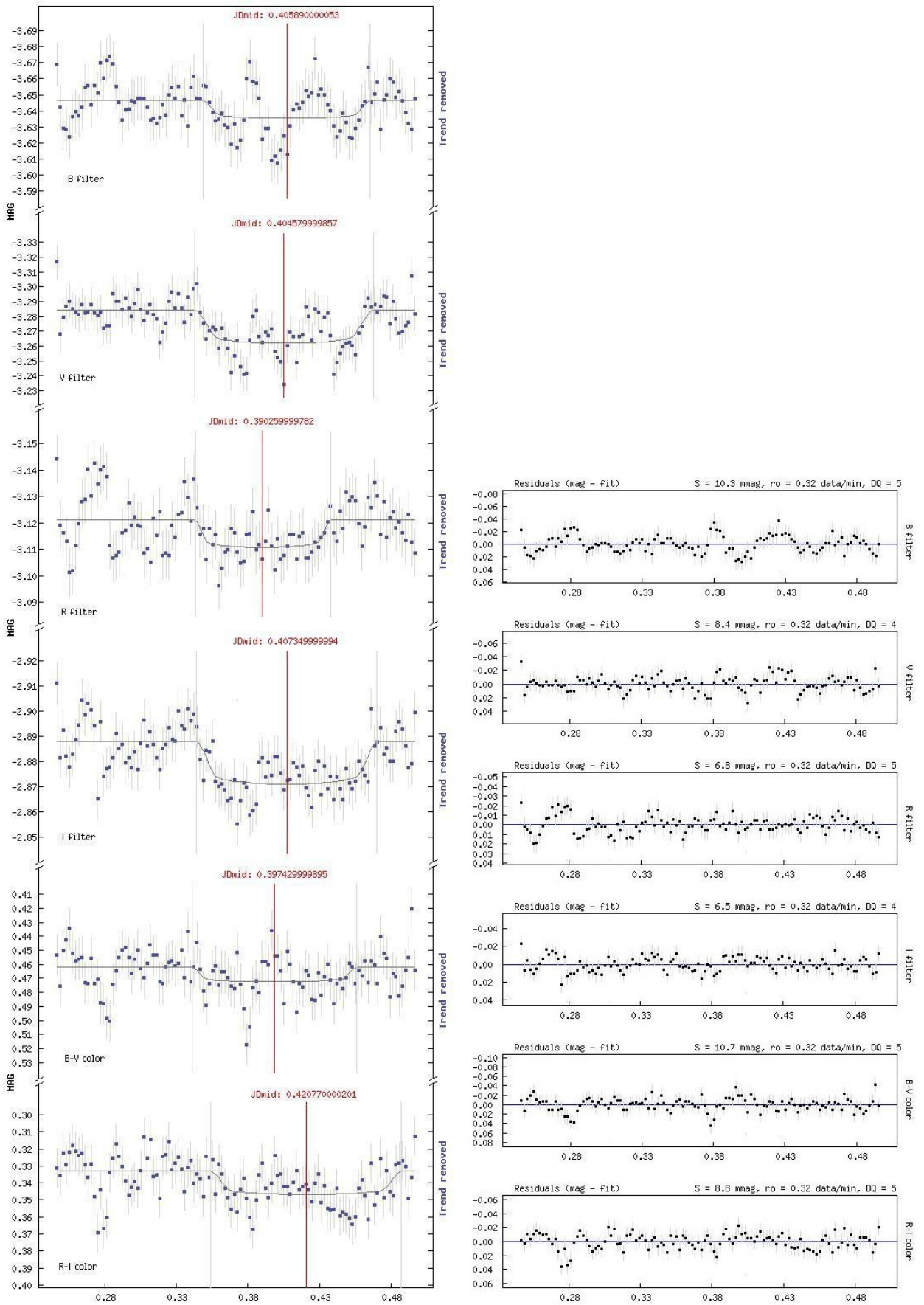
Depth diagram of HAT-P-10b based on all of the available measurements



A.4. WASP-33b (2010. november 6. és november 11.)

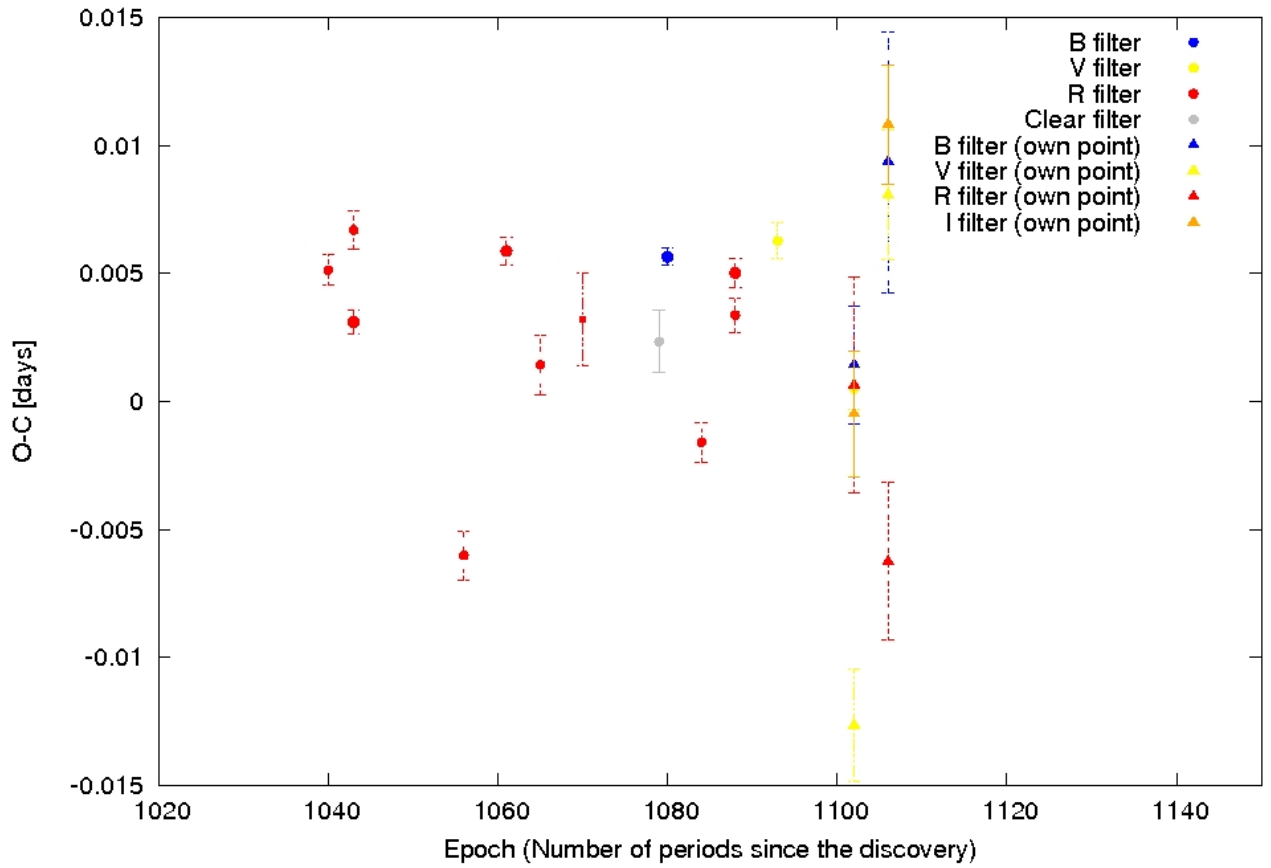


7. ábra: A WASP-33b november 6-i méréséből kapott fénygörbék

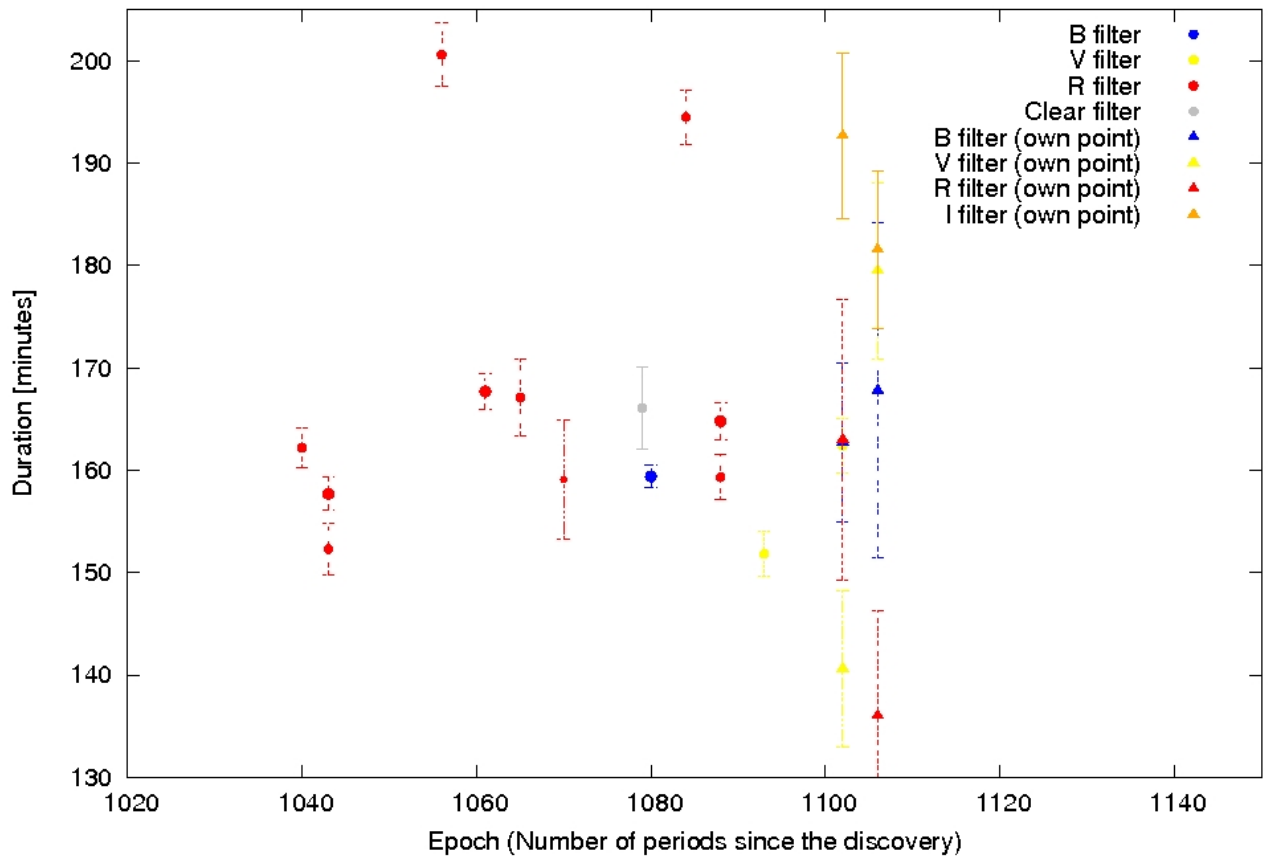


8. ábra: A WASP-33b november 11-i méréséből kapott fénygörbék

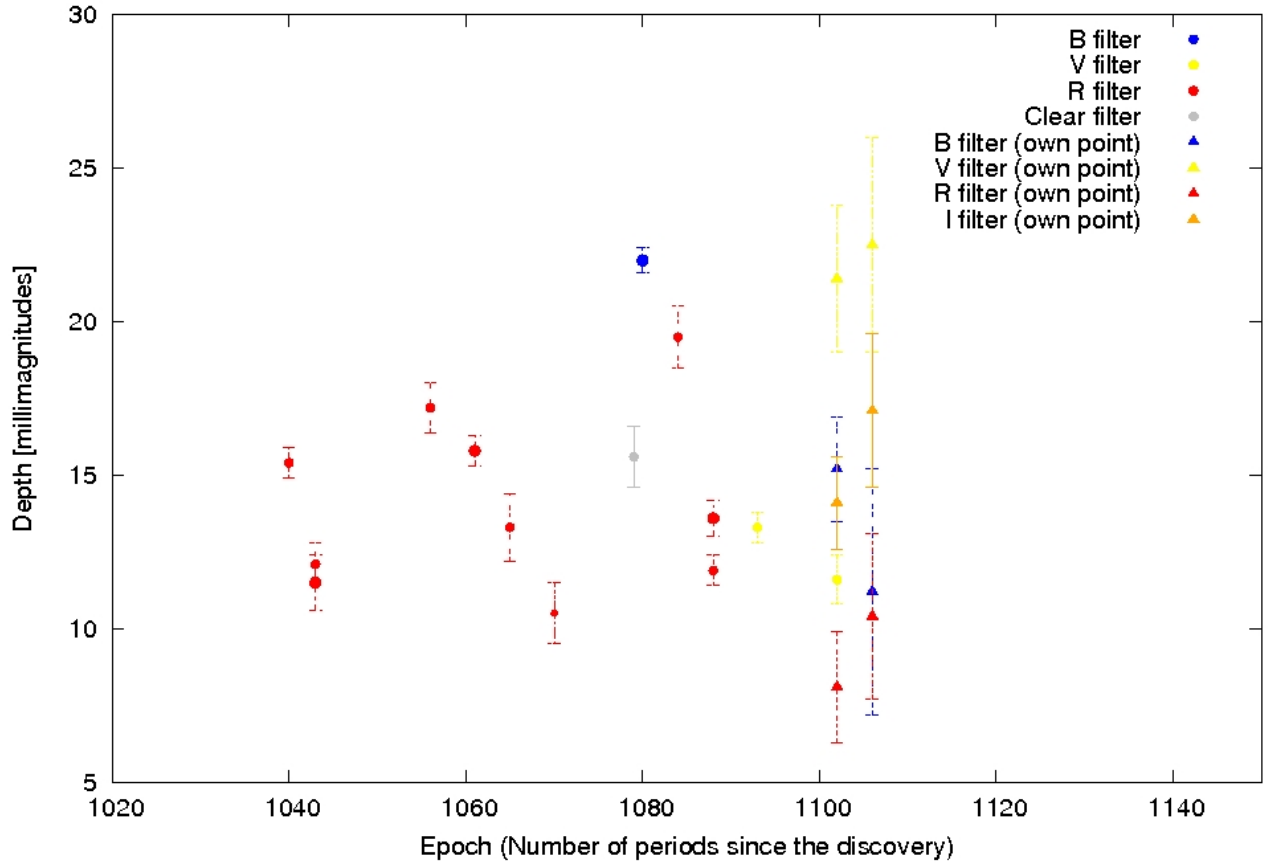
O-C diagram of WASP-33b based on all of the available measurements



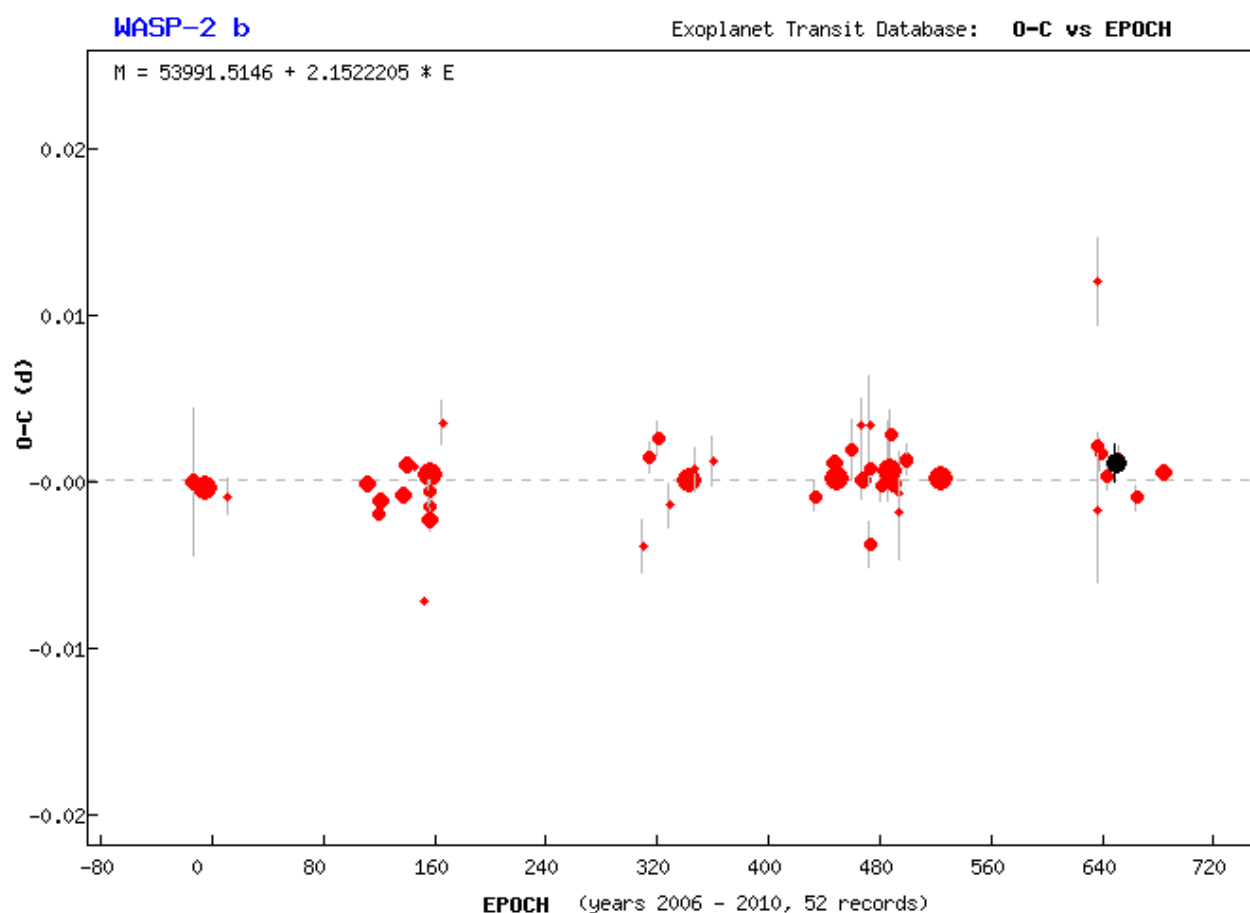
Duration diagram of WASP-33b based on all of the available measurements



Depth diagram of WASP-33b based on all of the available measurements



B. A WASP-2b exobolygó új keringési periódussal kapott O-C diagramja



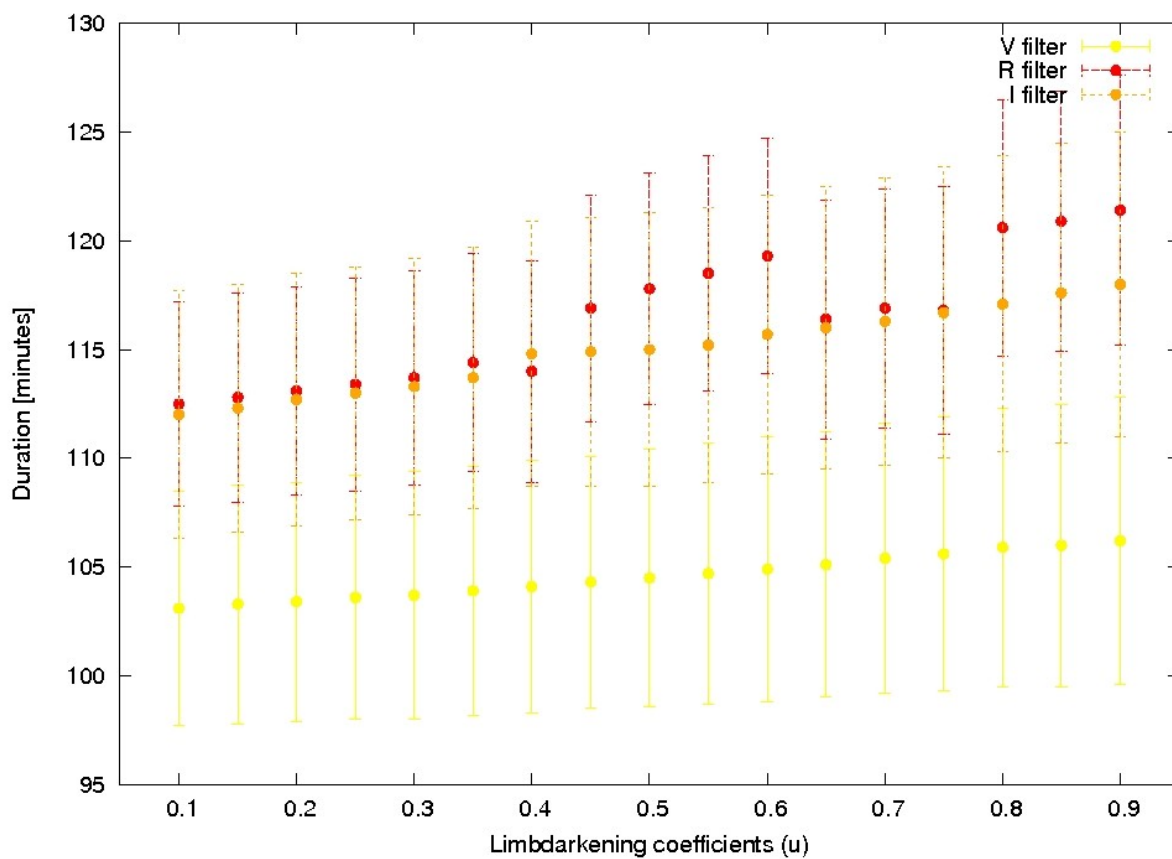
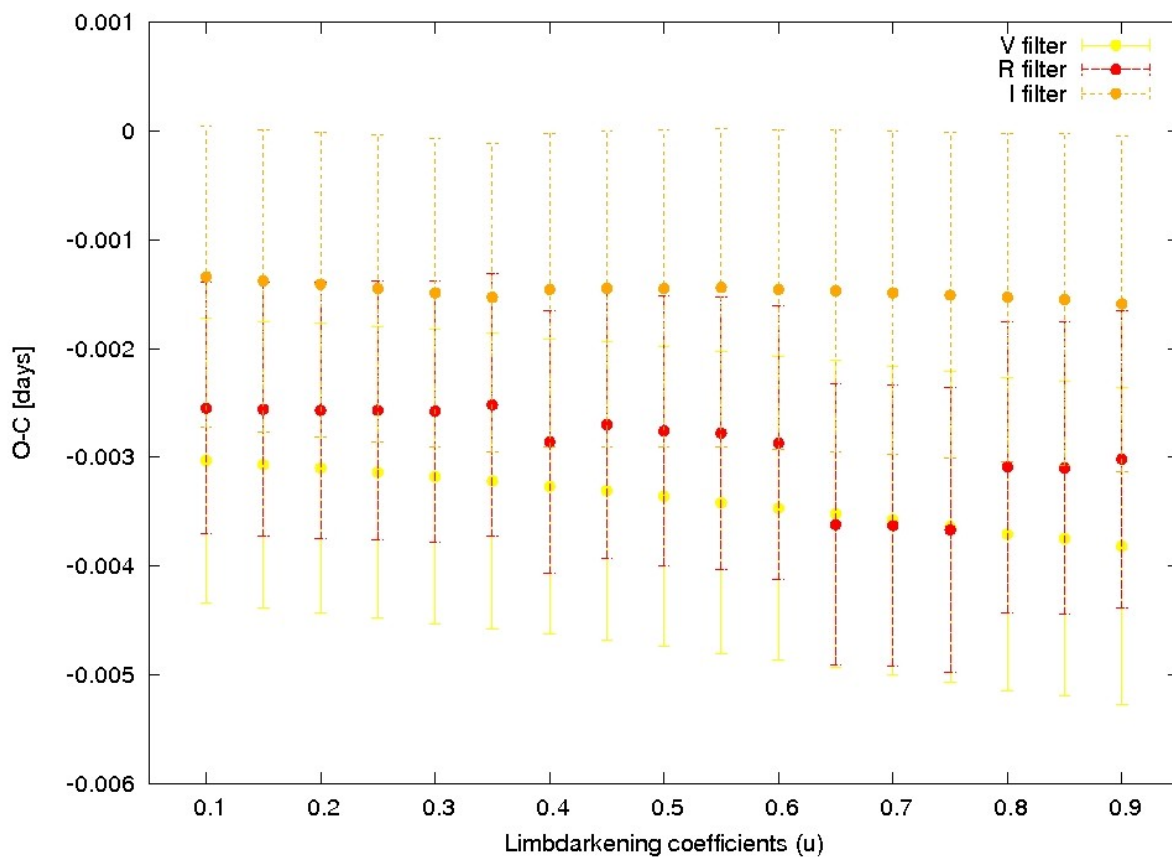
C. A színindex-görbék illesztésekor kapott paraméterek

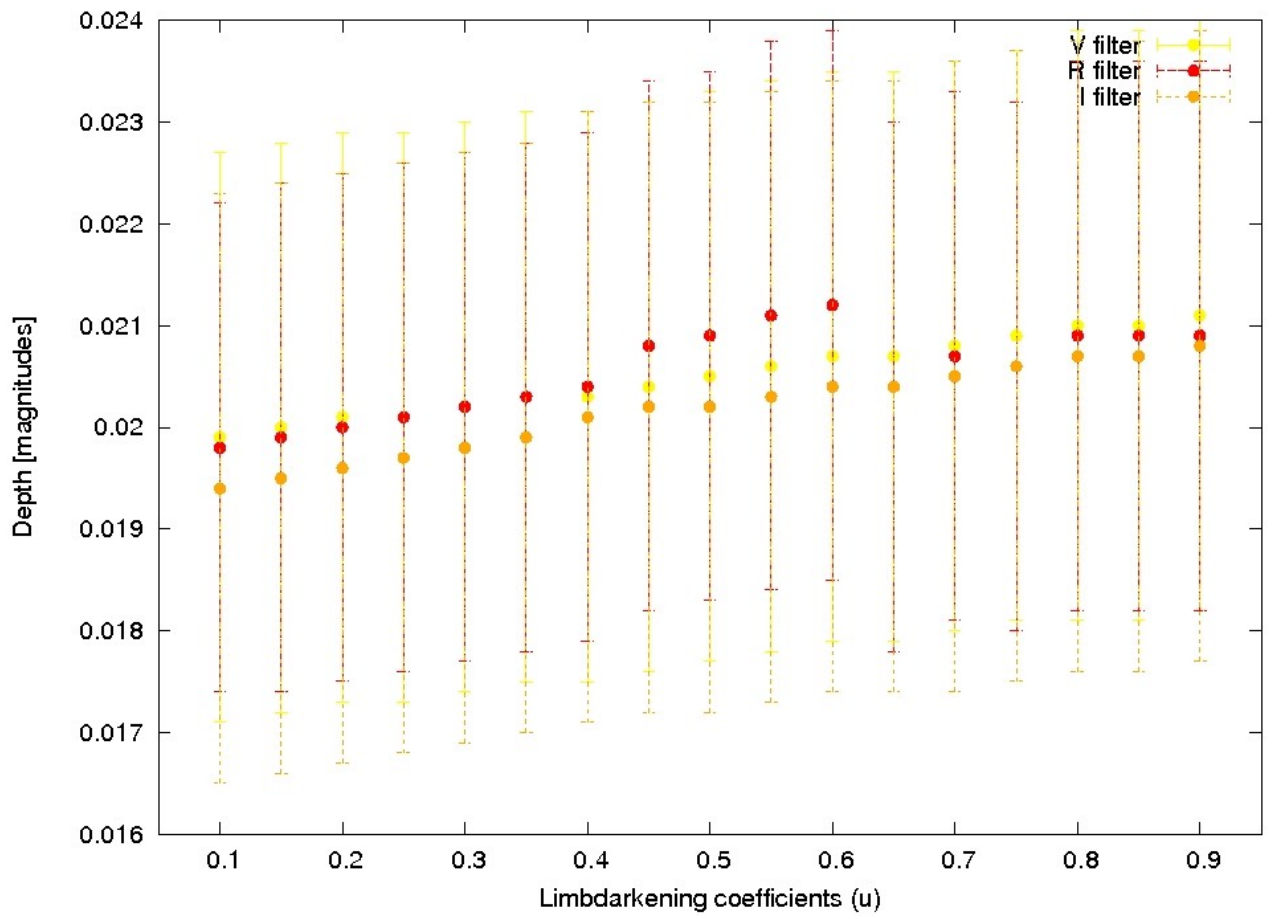
Objektum neve	Szín-index	A fedés középideje [HJD]	Fedés hossza [perc]	A fedés mélysége [m]	Szél-sötétedési paraméter	Átlagos eltérés [m]
WASP-2b	R-I	2455418,45258±0,00495	118,0±18,9	0,0079±0,0046	0,7	0,0062
TrES-2b	R-I	2455442,47471±0,01280	134,0±63,1	0,0101±0,0090	0,5	0,0126
HAT-P-10b	B-V	2455500,45475±0,00662	194,0±23,8	0,0280±0,0069	0,55	0,0178
	R-I	2455500,46591±0,00656	125,7±22,2	0,0104±0,0052	0,5	0,0101
WASP-33b (november 6.)	B-V	2455507,54533±0,00666	180,6±23,3	0,0204±0,0064	0,55	0,0203
	R-I	2455507,50779±0,00834	163,6±27,6	0,0108±0,0044	0,6	0,0142
WASP-33b (november 11.)	B-V	2455512,39743±0,00579	165,4±18,9	0,0101±0,0045	0,5	0,0107
	R-I	2455512,42077±0,00427	191,7±13,3	0,0137±0,0036	0,5	0,0088

A HAT-P-10b R-I színindex-görbéjének jobb illeszkedése az objektum többi fény- és színgörbéjével ellentétben megkívánta a parabolikus szisztematikus hibák levonását is.

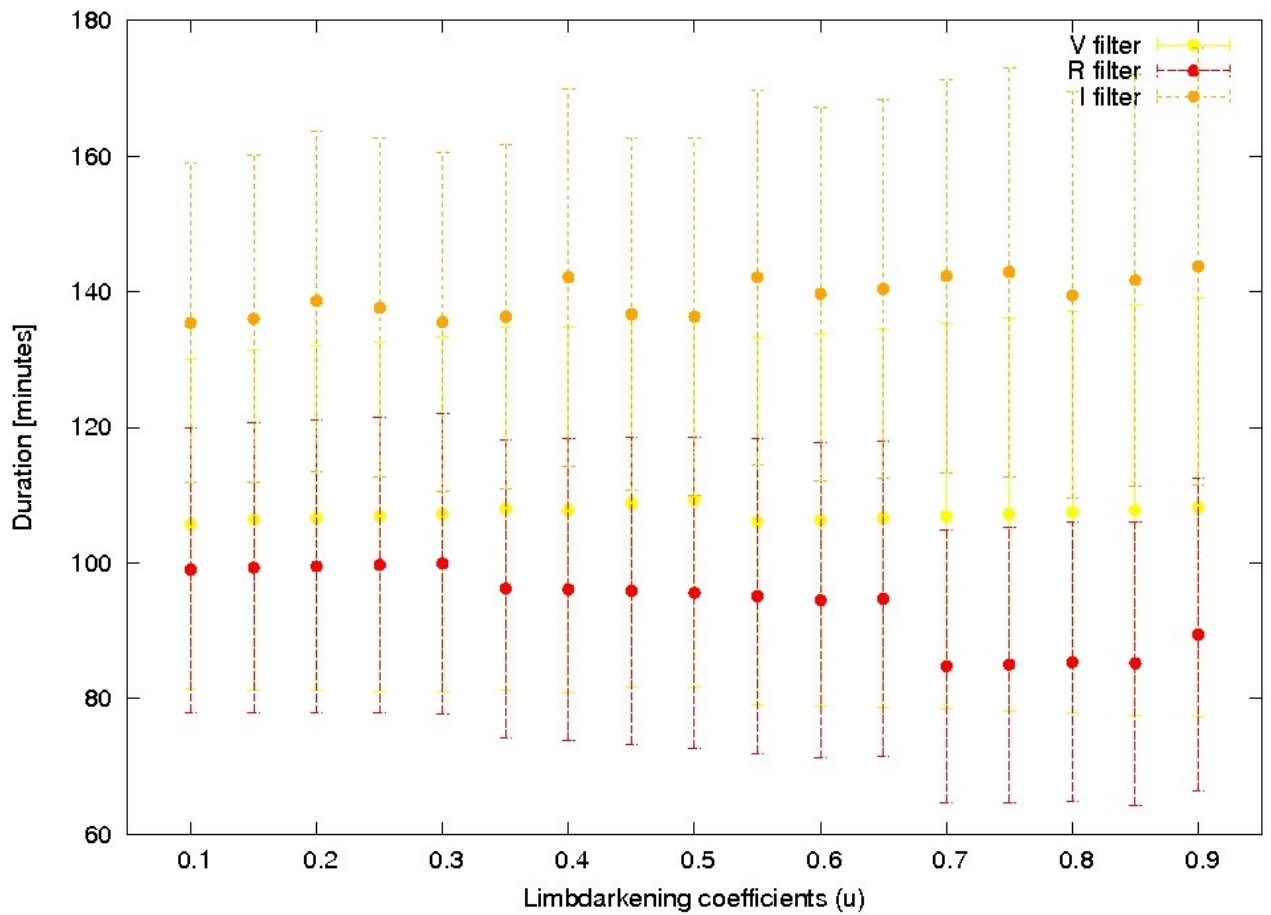
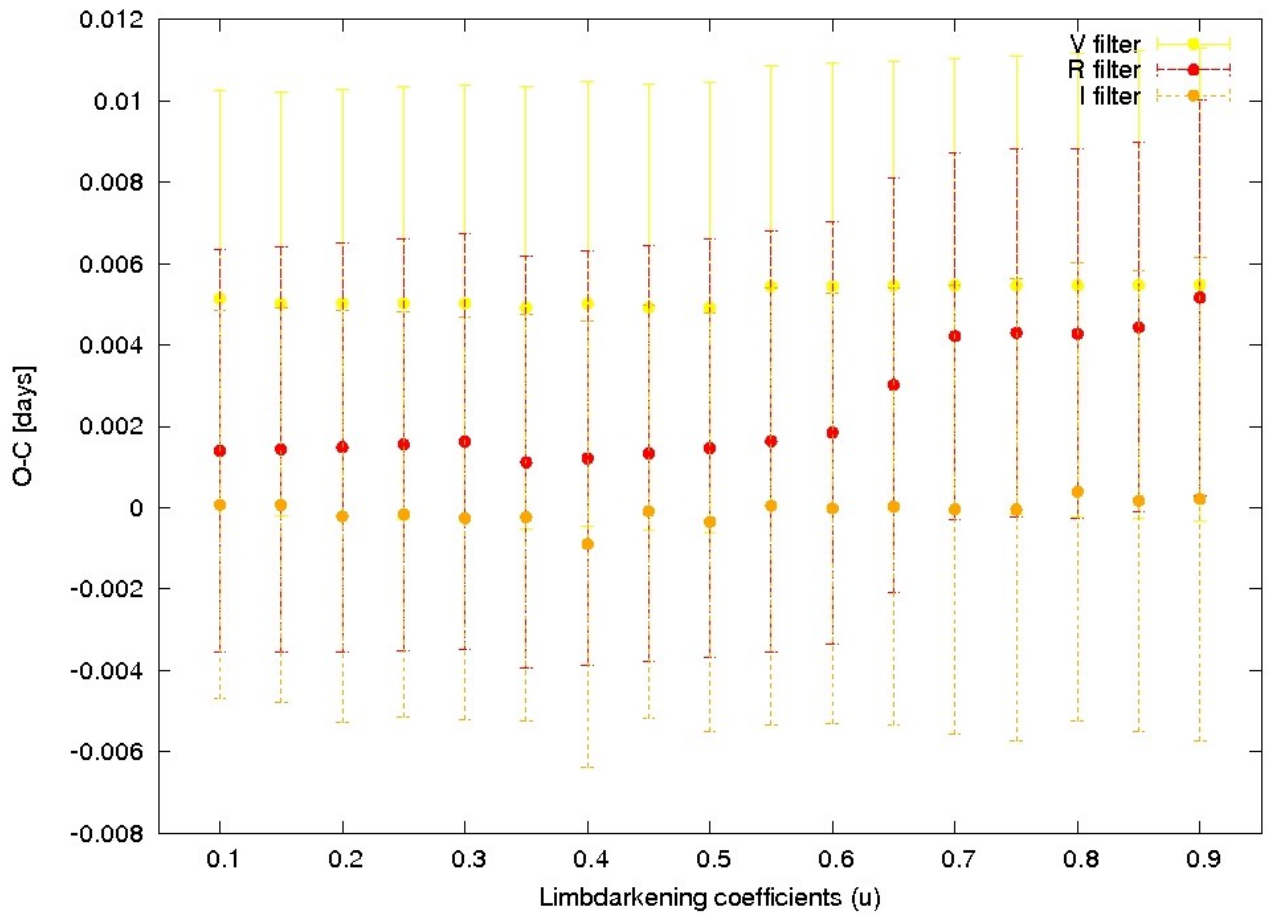
D. A fedés mélysége, a fedés hossza és az O-C értékek szélsőtévedéstől való függése

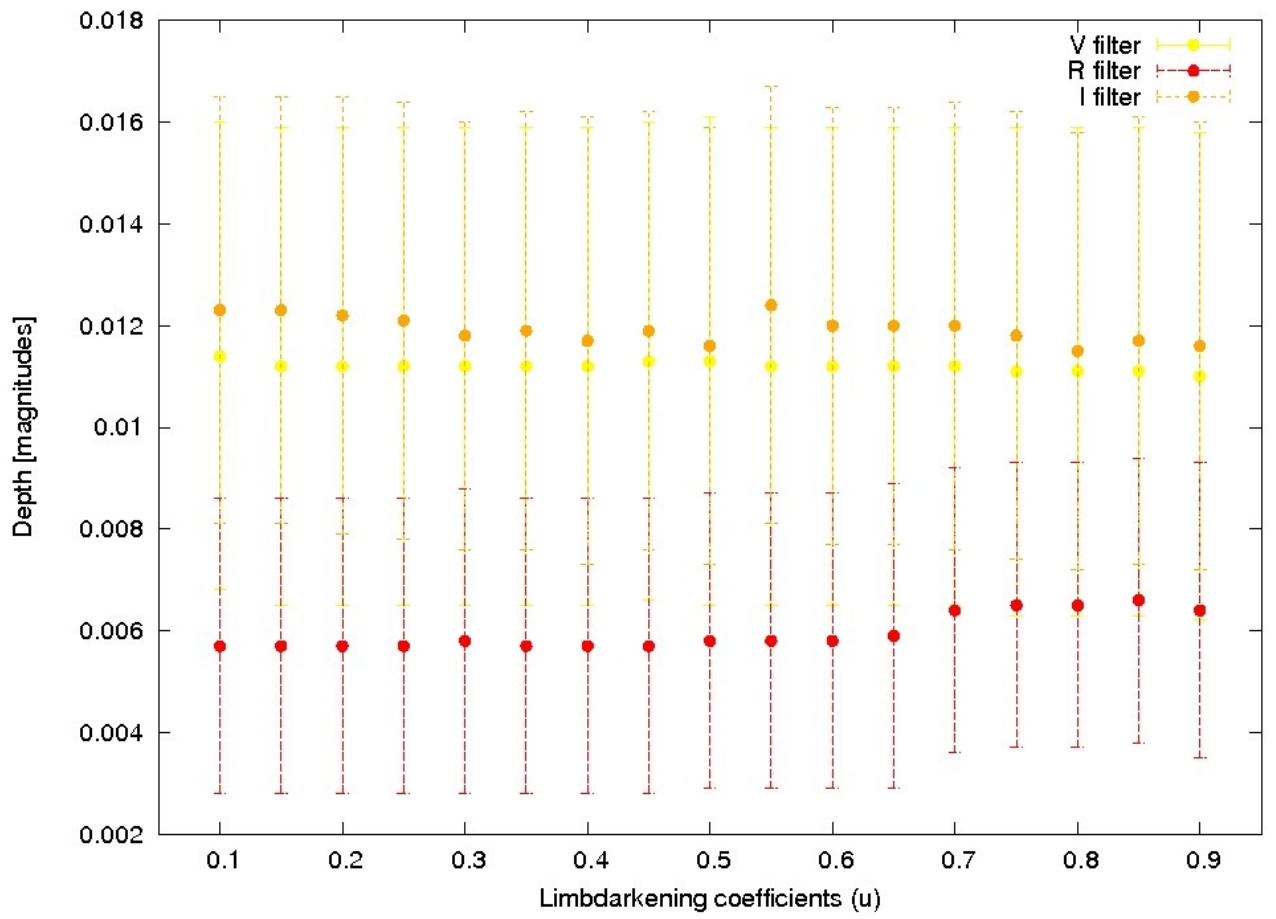
D.1. WASP-2b (2010. augusztus 9.)



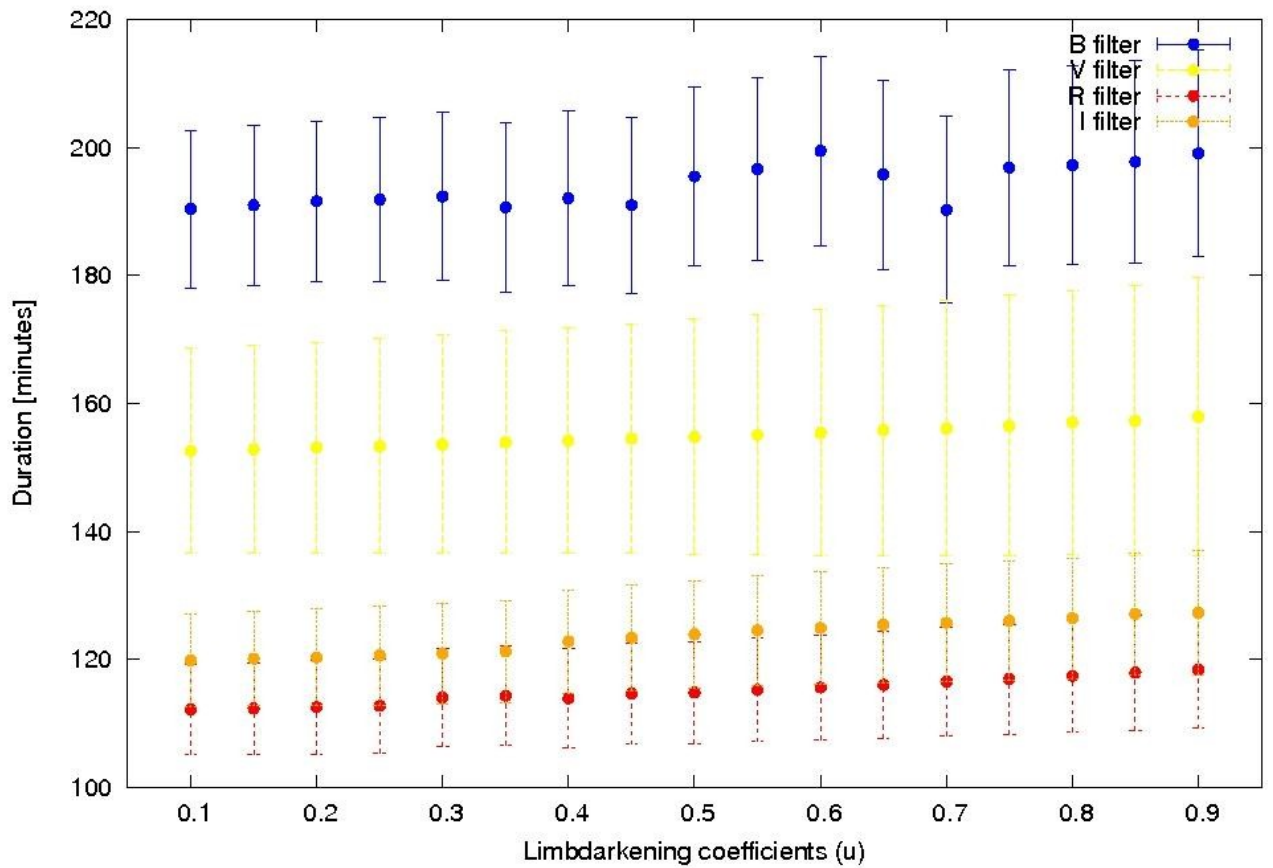
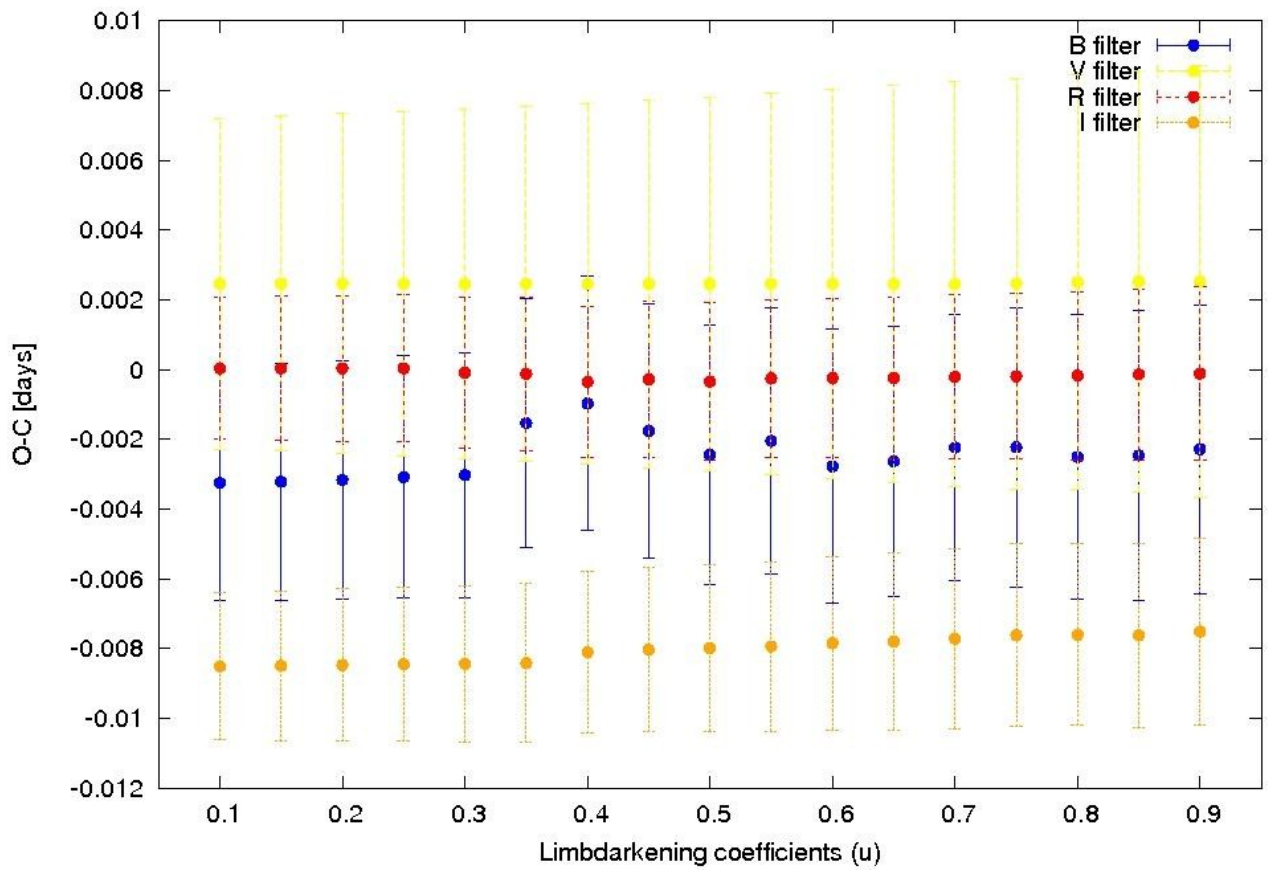


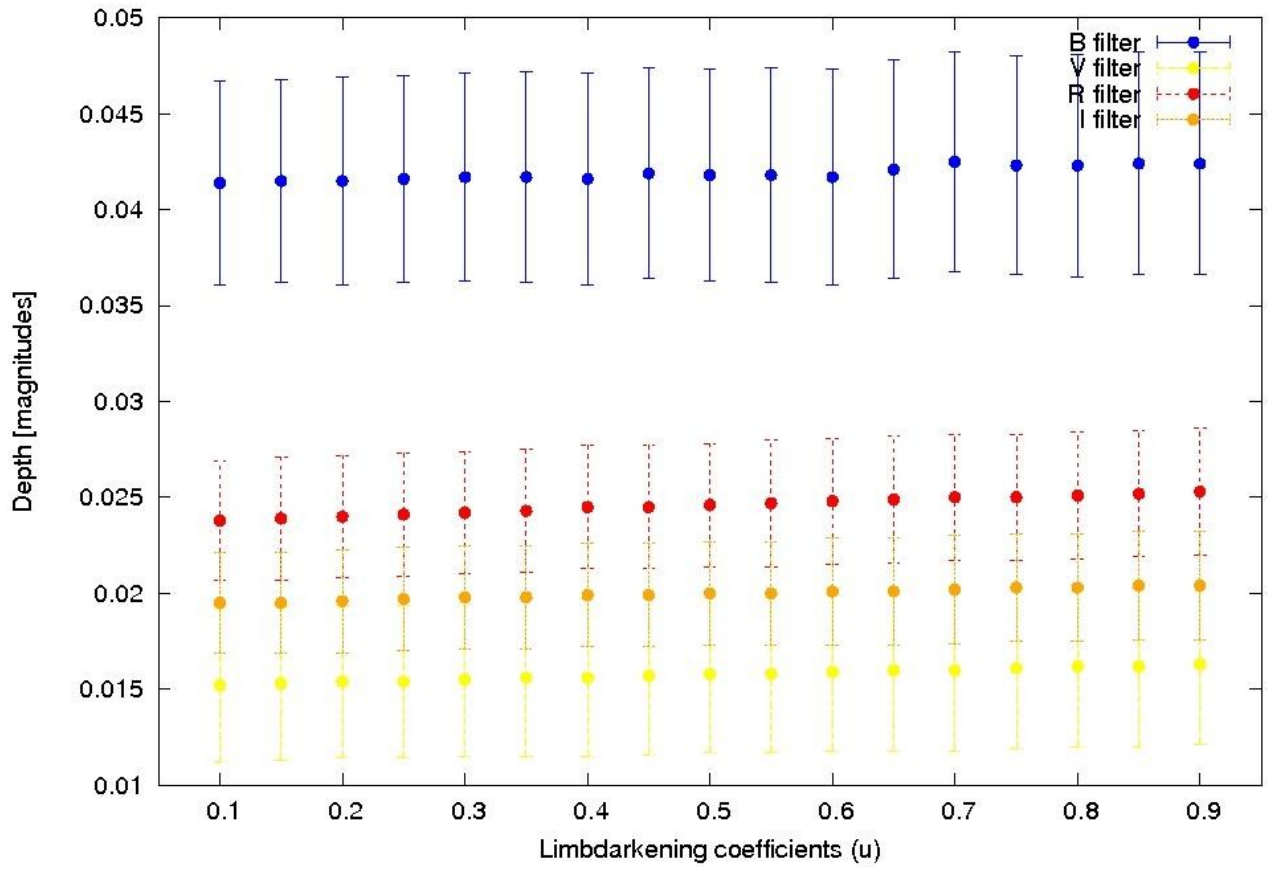
D.2. TrES-2b (2010. szeptember 2.)



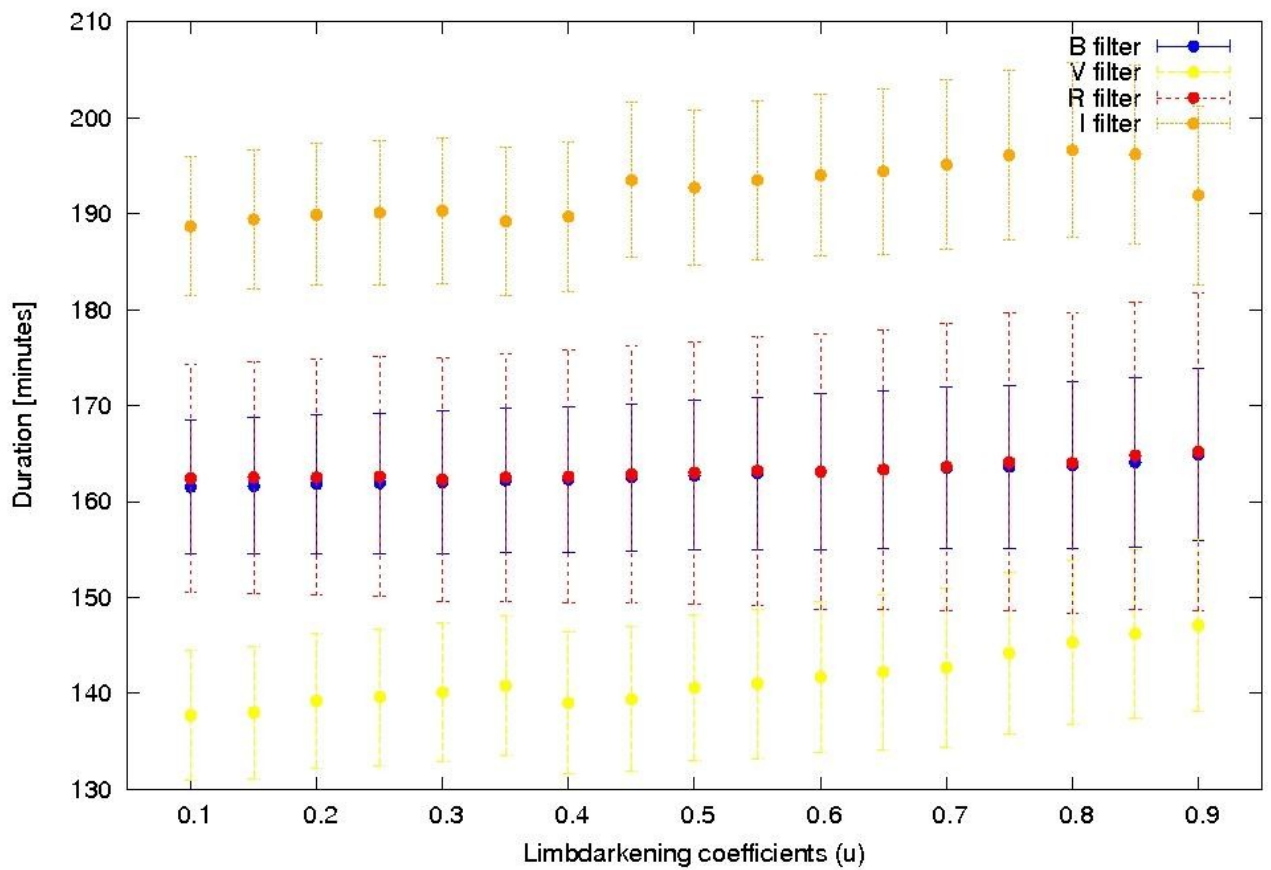
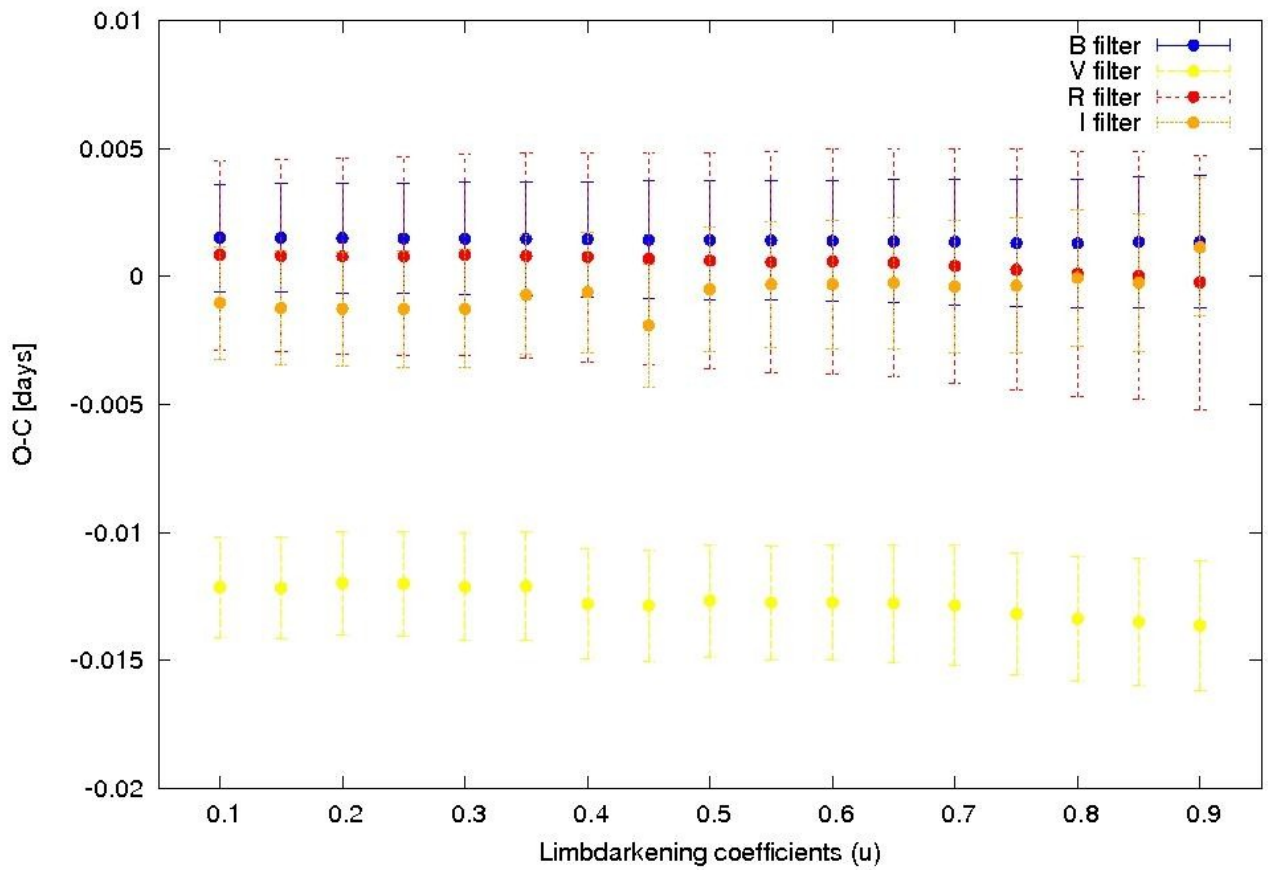


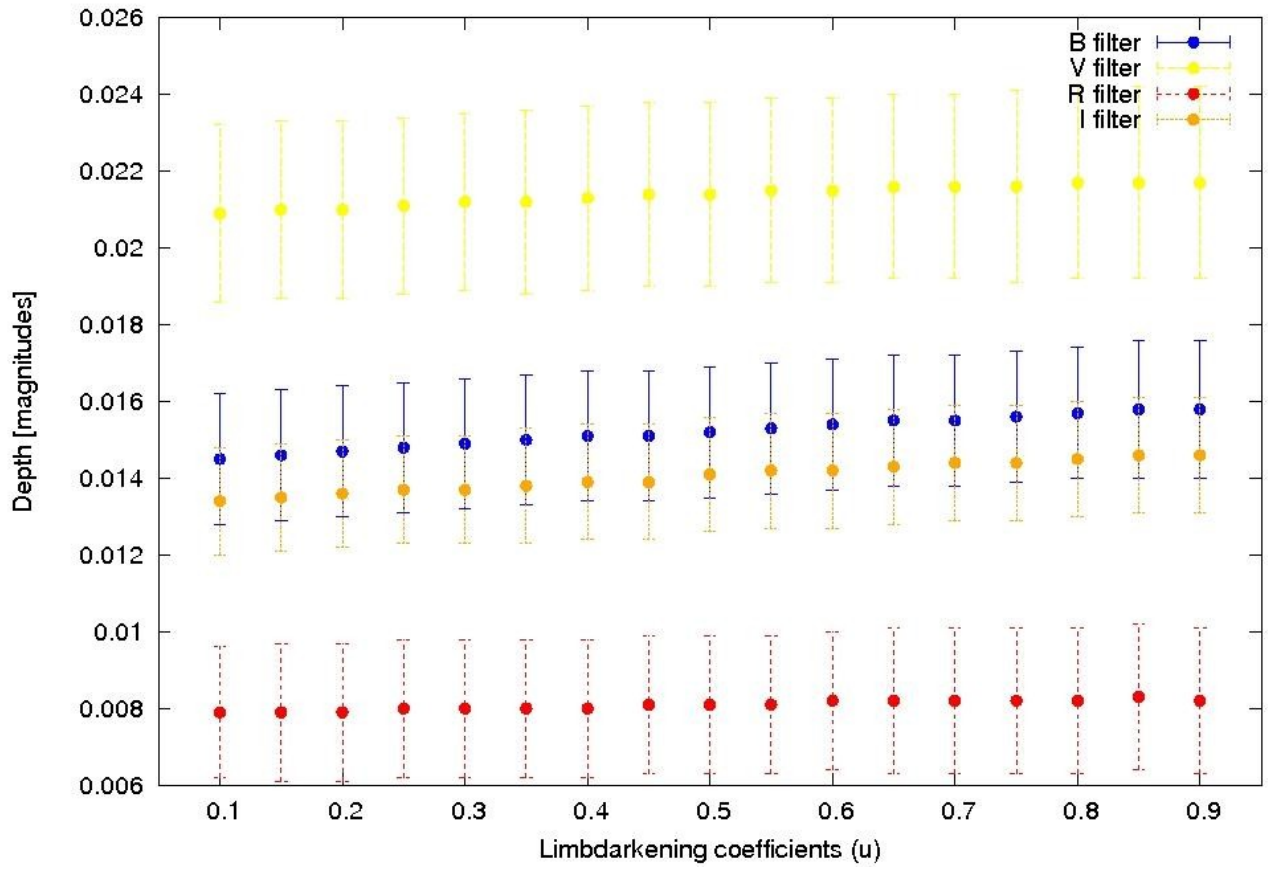
D.3. HAT-P-10b (2010. október 30.)





D.4. WASP-33b (2010. november 6.)





D.5. WASP-33b (2010. november. 11.)

