

ANALÝZA KONTINUÁLNÍHO MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI V AREÁLU VŠB - TU OSTRAVA

ANALYSIS OF THE CONTINUAL ILLUMINATION MEASUREMENT IN THE AREA OF VSB-TECHNICAL UNIVERSITY IN OSTRAVA

Zdeněk MIKULÁŠEK¹, Tomáš GRÁF²

¹ Doc., RNDr., CSc., Observatory and Planetarium of J. Palisa, Faculty of Mining and Geology, VŠB-Technical University of Ostrava, 17.listopadu 15, Ostrava and Department of Theoretical Physics and Astrophysics, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlářská 2, Brno, tel. (+420) 54 949 5880
e-mail: mikulas@ics.muni.cz

² RNDr., Ph.D., Observatory and Planetarium of J. Palisa, Faculty of Mining and Geology, VŠB-Technical University of Ostrava, 17.listopadu 15, Ostrava, tel. (+420) 59 732 4951
e-mail: tomas.graf@vsb.cz

Abstract

We present the results of a deep statistical analysis of the continual measurement of the mean illumination at night in the area of VSB-Technical University in Ostrava. The illumination during 509 nights between the years 2006 to 2009 was studied in detail in relation to the characteristics of a particular night. Using a sophisticated linear model applied to the logarithm of the mean night illumination, we determined the dependence of the night illumination on cloudiness, moon phases, and seasons as well as on snow cover. The model is able to predict the night illumination with quasi-random uncertainty of 0.21 dex. This uncertainty can be caused by hardly quantifiable events like rainfall, snowfall, fog or clouds with different albedo. It can also be a consequence of various human activities that may influence the illumination of sky at night.

Abstrakt

Prezentujeme výsledky hloubkové statistické analýzy kontinuálního měření střední osvětlenosti v nočních hodinách vlastních měření v areálu Technické univerzity Vysoké školy báňské v Ostravě. Podrobně byla studována střední osvětlenost v 509 nocích v letech 2006 až 2009 ve vztahu k charakteristikám příslušné noci. Prostřednictvím sofistikovaného lineárního modelu aplikovaného na logaritmus střední noční osvětlenosti byla jednoznačně prokázána závislost noční osvětlenosti na oblačnosti, dále pak na fázi Měsíce, na ročním období a přítomnosti čerstvé sněhové pokrývky. Model je schopen předpovědět noční osvětlenost, ovšem s kvazináhodnou neurčitostí 0,21 dex. Zmíněnou neurčitost lze přičíst vlivu obtížně kvantifikovatelných meteorů jako jsou srážky všeho druhu, mlha, či výskyt mraků s velmi odlišným albedem, může být ovšem i důsledkem nejružnějších lidských aktivit, které mohou osvětlenost noční oblohy ovlivnit.

Key words: illumination, linear model

1 ILLUMINATION OBSERVATION

The main aim of our night illumination monitoring project is to detect properties and changes in the level of the invading light in the modern agglomeration and to search its causes. We used a special constructed device which enables almost continuous measurement of the radiative flux coming from the upper half-space during the nautical night (the period when the centre of the sun disk is more than 12° under the horizon). The calibrated photometer placed on the fixed site (the roof of the library of VSB-TU Ostrava) has already been in operation for a number of years. The measurements were carried out every 30 seconds. For technical parameters of the measurement set see Novák (2006). The information about the cloudiness we got from the branch office of Czech Hydrometeorological Institute in Ostrava-Poruba. We used the data from the Weather Station in Mošnov.

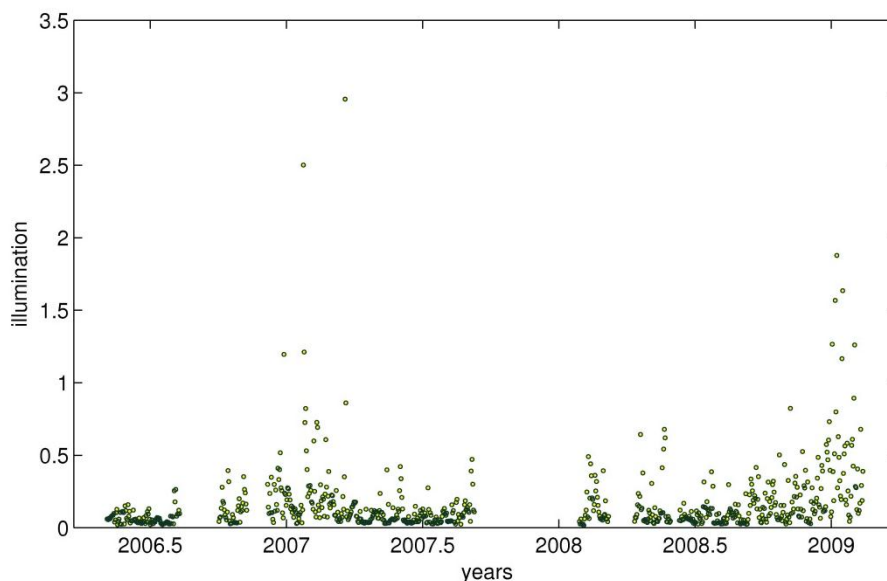


Fig. 1 Illumination

2 THE CAUSES OF ILLUMINATION CHANGES

For further analysis we have used just nights for which also the cloudiness had been measured at the Weather Station in Ostrava-Mošnov from 10:00 p.m. to 2:00 a.m. CET. Altogether, we therefore obtained the median of the night illumination and the average value of cloudiness for 509 nights (that represents around 300,000 illumination measurements) well-covering phases of the moon and particular months of year. The highest mean night illumination was registered on 20/21 March 2008 – 2.956 units, the lowest value was registered on 3/4 February 2007 – 0.017 units. The mean value of illumination was therefore changing within the relative range of 1:174 that is within the limits of more than two orders! The accuracy of illumination measurements is relatively high so we can neglect the errors of the quantity E .

The arithmetic average of such a chosen data file of night illumination is 0.137 units and the median is only 0.081! The histogram of the illumination distribution is thus strongly asymmetric. Hence it is not eligible to apply standard statistical methods assuming more or less normal distribution on such a data. That was also the reason why we decided to use in the further analysis the decadic logarithm of illumination E (see histogram in Fig. 2).

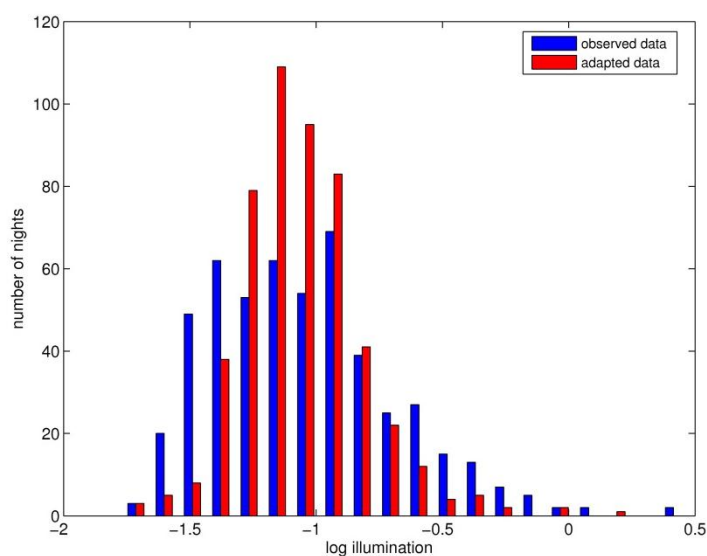


Fig. 2 Histogram

Although it is still asymmetric, this asymmetry is tolerable (the median and the average of logarithm of night illumination are -1.09 and -1.05 respectively) and it is possible in some case to get it under control by the use of robust regression. The negative kurtosis excess of the file is undoubtedly related to the fact that the observed spread of the values around the median is not primarily identified by observational scatter but by the influences that can be described by the model.

3 FORMULATION AND APPLICATION OF THE LINEAR MODEL

For the description of the properties of the measured data file, a number of various sophisticated models have been tested. Finally the linear model was chosen as the best and simultaneously the simplest one. It describes the influence of the relative cloudiness C within the limits 0 and 1, moon phases in units of their synodic period f and the season a in units of tropical year in the following form:

$$E \cong A_0 + A_1 C^q + A_2 \left[\frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos(2\pi f) + \frac{1}{8} \cos(4\pi f) \right] + \frac{1}{2} A_3 \sin(2\pi a) + \frac{1}{2} A_4 \cos(2\pi a).$$

The model is described by 6 parameters which can be calculated using the linear regression or even better by the method of robust regression (see e.g. Mikulášek et al. 2008) that eliminates outliers which are not compatible with the chosen model.

The variance in logarithmic scale is 0.21 (hereafter 0.21 dex), which implies the mean relative error in the illumination roughly 50 %. The following values have been found: $A_0 = -1.335 \pm 0.018$; $A_1 = 0.51 \pm 0.03$; $q = 2,0$; $A_2 = 0.259 \pm 0.025$; $A_3 = 0.00 \pm 0.03$ a $A_4 = 0.29 \pm 0.03$. In every case with the exception of A_3 , the value of the parameter is much bigger than the estimation of its uncertainty. It signifies that we can think of all the considered influences as proven.

4 DISCUSSION OF THE MODEL RESULTS

The absolute term A_0 numerically corresponds to the logarithm of night illumination E at perfectly cloudless and moonless night in spring or autumn. Further terms in the model describe observed illumination variations at particular nights. It arises from the analysis that the cloudiness and the moonshine have the determinative influence on these changes of all the studied mechanisms. The annual variation which is for the present indefinite causes changes of approximately a half amplitude.

The first, slightly surprising finding is the fact that the night illumination is not directly proportional to the relative coverage C of the sky by clouds. In reality, this dependence increases more rapidly. To the first approximation, the logarithm of illumination is proportional to the second power of cloudiness. Specially, in average, the cloudless nights are about 1.3-times darker than half-cloudy and 3.2-times darker than completely overcast nights. See Fig. 2 where the influence of annual variations and the influence of the moonshine are eliminated.

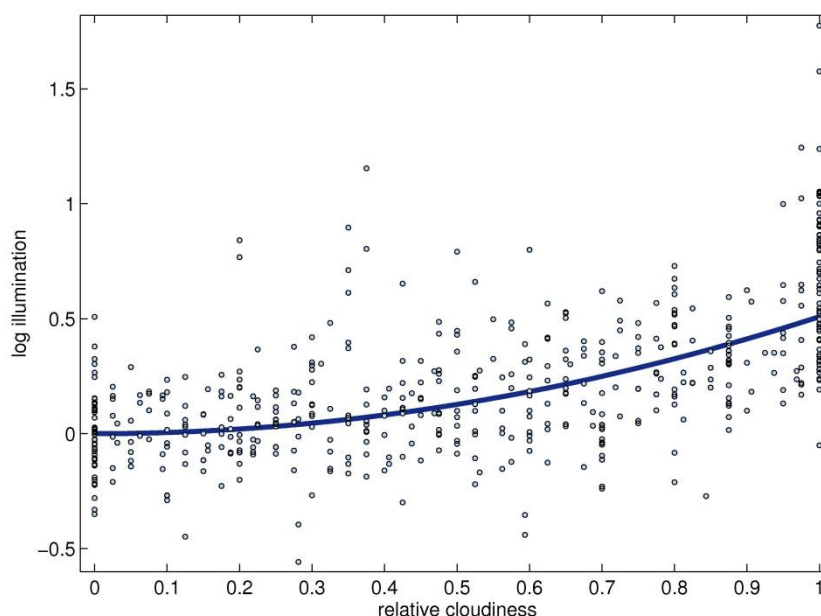


Fig. 3 Cloudiness

The influence of the direct and also the scattered moonshine could be calculated directly, however, it would be very complicated. The relation used in the model is empirical and it describes realistically the fact that the moonshine influences the illumination especially in the period around the full moon when the Moon culminates and simultaneously it shines the most – see Fig. 3. The moonshine of the full moon increases the night illumination up to 82 %.

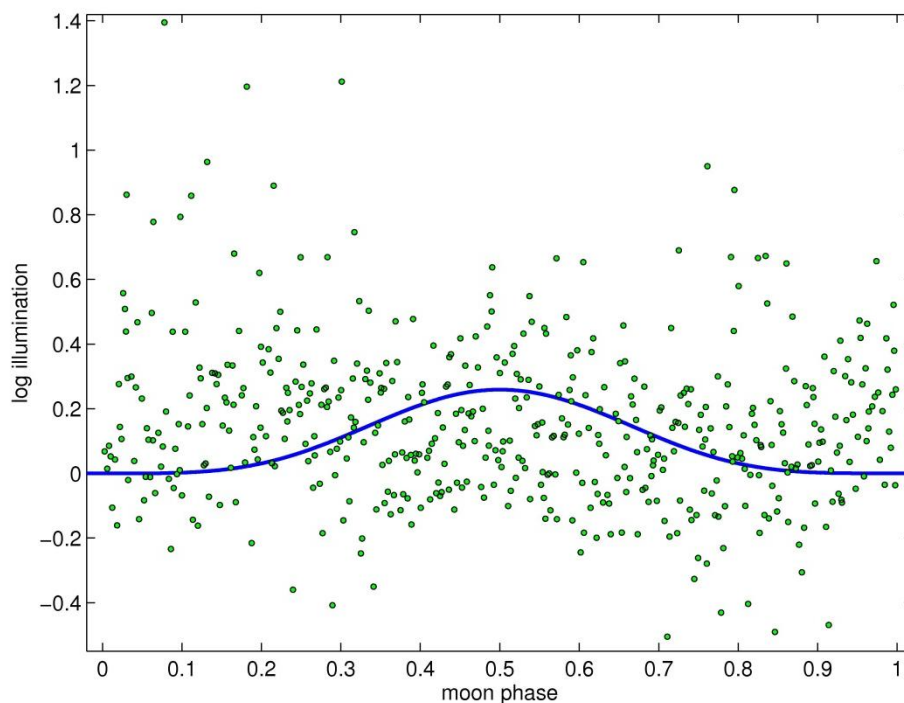


Fig. 4 Moon phase

The annual variation is probably connected with the increased reflectivity of the Earth surface during the winter season and also with bigger reflectivity and lower average height of clouds during that season. The winter nights are up to twice as bright as the summer ones. It would be possible to take this fact into account and to reduce the number of street illuminators in winter. It would imply considerable savings, especially with respect to longer nights. Absolutely extreme illumination of the sky is than probably related to the situation when it is overcast and simultaneously there is new, very reflective snowfall.

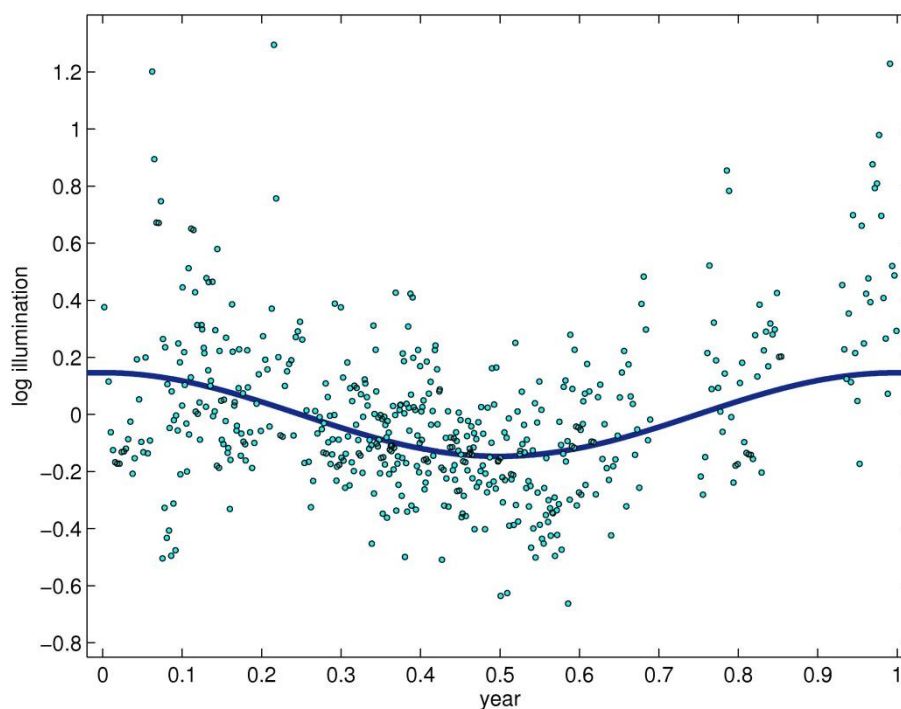


Fig. 5 Annual variations

5 FURTHER CAUSES OF ILLUMINATION VARIATIONS

The formal accuracy of the determination of the illumination mean value at a particular night is high because it is determined from 600 independent measurements with a relative uncertainty certainly smaller than 10 %. However, also with the corrections of the annual variation, moonshine influence and cloudiness, the variance still remains described by the standard weighted deviation of 0.21 dex. The histogram of this residual variance is represented by the red columns in Fig. 2. The distribution is now very similar to the Gaussian one, which reflects the fact that the illumination changes are no longer caused by more or less repeating processes but by quasi-random phenomena. It can be e.g. varying reflectivity of the clouds, rainfall, snowfall, haze or effects associated with human activity which we did not take into account. Partly it can be also caused by consequences of the influences we have considered in our model not exactly adequately.

The effects of the quasi-stochastic processes are in total comparable with the effects of all the processes which we have quantified in our linear model. Using the model we can therefore roughly predict the brightness of a particular night. We just have to take into consideration that the observed reality will differ from the predicted one by ± 0.21 dex. However, the model can still be used for more general conclusions which can have also a practical output, e.g. for adjusting the street lighting during summer and winter seasons. Such similar topics are addressed in papers [3], [4] and [5].

REFERENCES

- [1] MIKULÁŠEK, Z., KRTIČKA, J., HENRY, G. W. et al. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, 485, 585
- [2] NOVÁK, T., in „*Kurz osvětlovací techniky XXV*“, p. 166, 2006, ISBN 80-248-1178-2
- [3] NOVÁK, T., SOKANSKÝ, K., ZÁVADA, P. 2011, *Przegląd elektrotechniczny*, 87 (4), pp. 32 – 34
- [4] NOVÁK, T., SOKANSKÝ, K., ZÁVADA, P. 2011, *Przegląd elektrotechniczny*, 87 (4), pp. 55 – 58
- [5] DOSTÁL, F., SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T. 2009, in „*PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ELECTRIC POWER ENGINEERING 2009*“, pp. 60-62

RESUMÉ

Hlavním cílem našeho projektu sledování noční osvětlenosti je zjištění vlastností a změn v úrovni rušivého světla v moderních aglomeracích a hledání jeho příčin. K tomu slouží vybudované zařízení, které umožňuje prakticky kontinuální měření světelného toku, který přichází z tzv. horního poloprostoru v období nautické noci (doba, kdy je střed slunečního kotouče hlouběji než 12° pod obzorem). Kalibrovaný luxmetr je umístěn na pevném stanovišti (střecha knihovny VŠB-TU Ostrava) a je v provozu již několik let. Měření byla prováděna každých 30 sekund. Přehled o oblačnosti jsme získali z dat pro meteorologickou stanici Mošnov, jež nám poskytla pobočka Českého hydrometeorologického ústavu v Ostravě-Porubě.

V období, kdy měření probíhala, nedošlo v okolí měřicí soupravy k žádné výrazné změně světelného výkonu ani konfigurace osvětlovacích těles, takže je můžeme považovat za konstantní. K tomu, abychom zmapovali pozorované změny noční osvětlenosti a signifikace různých předpokládaných vlivů na ní, jsme se rozhodli nejprve prostudovat variace mediánu měřené osvětlenosti v průběhu 5 hodin od 21 h 30 min do 2h 30 min SEČ založených na 600 jednotlivých měření během noci. Tento výchozí soubor tak představuje 450 tisíc jednotlivých měření noční osvětlenosti uskutečněných během 750 nocí v období od 5.5.2006 do 12.2.2009. Přehled středních osvětleností v jednotlivých nocích přináší obr. 1. Ve smyslu našeho dělení nocí do pěti stejně populovaných skupin jsme našli následující empirické dělicí hodnoty: 0,043; 0,073; 0,116 a 0,215.

Pro další analýzu jsme dále použili pouze ty noci, pro něž byla současně měřena oblačnost na stanici Ostrava-Mošnov v intervalu od 22 do 2 hodin SEČ. Celkem jsme tak získali dvojici údajů medián noční osvětlenosti a průměrnou hodnotu oblačnosti pro 509 nocí (to reprezentuje cca 300 tisíc jednotlivých měření osvětlenosti) dobře pokrývajících veškeré fáze Měsíce a jednotlivé měsíce v roce. Nejvyšší střední noční osvětlenost byla zaznamenána v noci 20/21 3. 2008 – 2.956 jednotek, nejnižší pak 3/4 2. 2007 – 0.017. Střední osvětlenosti se tak měnily v rozsahu 1: 174, tedy v rozmezí více než dvou řádů!

Aritmetický průměr takto vybraného souboru nočního osvětlení je 0,137 jednotek a medián jen 0,081! Histogram rozložení osvětlenosti je silně asymetrický, takže na takový soubor nelze aplikovat standardní statistické metody zpracování. To byl též důvod, proč jsme se rozhodli v další analýze pracovat s dekadickým logaritmem osvětlenosti E . Jakkoli i nyní je asymetrický, jde o únosnou asymetrii (medián a průměr logaritmu noční osvětlenosti jsou postupně -1,09 a -1,05), kterou lze případně zvládnout např. použitím robustní regrese. Malá špičatost souboru (kurtosis) nepochybně souvisí s tím, že pozorovaný rozptyl hodnot kolem mediánu primárně není určen pozorovacími chybami, ale vlivy, které lze popsat pomocí modelu. Chyby stanovení veličiny E jsou vzhledem k její velikosti zanedbat,

Pro popis vlastností měřeného souboru byla vyzkoušena řada modelů různého stupně složitosti. Jako nejlepší a současně nejjednodušší model byl nakonec zvolen lineární model popisující vliv oblačnosti C v intervalu 0 až 1, fáze Měsíce v jednotkách synodické periody f a ročního období a v jednotkách tropického roku, v následující formě:

$$E \cong A_0 + A_1 C^q + A_2 \left[\frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos(2\pi f) + \frac{1}{8} \cos(4\pi f) \right] + \frac{1}{2} A_3 \sin(2\pi a) + \frac{1}{2} A_4 \cos(2\pi a)$$

Model je popsán celkem 6 parametry, které lze vypočítat lineární regrese nebo ještě lépe metodou robustní regrese, která eliminuje odlehlé body zjevně se vymykající zvolenému modelu.

Střední kvadratická odchylka v logaritmické míře je 0,21 (dále 0,21 dex), což odpovídá střední relativní chybě cca 50%. Nalezeno bylo: $A_0 = -1,335 \pm 0,018$; $A_1 = 0,51 \pm 0,03$; $q = 2,0$; $A_2 = 0,259 \pm 0,025$; $A_3 = 0,00 \pm 0,03$ a $A_4 = 0,29 \pm 0,03$. Ve všech případech s výjimkou A_3 je hodnota parametru mnohem větší než odhad její neurčitosti. Znamená to tedy, že všechny uvažované vlivy lze považovat za prokázané.

Absolutní člen v modelu A_0 číselně odpovídá logaritmu noční osvětlenosti E v dokonale bezoblačné bezměsíčné noci v jarních či podzimních měsících. Další členy v modelu popisují pozorované variace osvětlenosti v jednotlivých nocích. Z rozboru vyplývá, že ze studovaných mechanismů má na ony změny největší vliv oblačnost, vliv měsíčního světla a roční variace zatím nejasného původu způsobují změny zhruba poloviční.

Prvním, poněkud překvapivým zjištěním je fakt, že noční osvětlenost není přímo úměrná relativnímu pokrytí oblohy mračny C , ale tato závislost je mnohem prudší. Ukazuje se totiž, že logaritmus osvětlenosti je úměrný v prvním přiblížení druhé mocnině oblačnosti. Speciálně v průměru jsou bezmračné noci asi 1,3krát temnější než polooblačno a 3,2krát temnější než zcela zamračené noci. Viz obr. 2, kde je eliminován vliv roční variace a fáze Měsíce.

Vliv přímého i rozptýleného měsíčního světla by sice bylo možné vypočítat přímo, bylo by to však nesmírně komplikované. Vztah užitý v modelu je empirický a velice dobře vystihuje fakt, že nejvíce se uplatňuje měsíční světlo v období těsně kolem úplňku, kdy je Měsíc nad obzorem nejvýš a současně také nejvíce září – viz obr. 3. Světlo měsíčního úplňku zvyšuje noční osvětlenost až o 82%. Roční variace zřejmě souvisí se zvýšenou odrazivostí zemského povrchu v zimních měsících, tak i s větší odrazivostí a menší průměrnou výškou mraků

v zimních měsících. Zimní noci jsou až dvakrát jasnější, než letní. Tento fakt by bylo možno zohlednit např. zmenšením počtu činných osvětlovacích těles v zimním období. To by přineslo nemalou úsporu i vzhledem k delším zimním nocím. Zcela extrémní osvětlenost oblohy pak zřejmě souvisí se situací, kdy při zatažené obloze napadne čerstvý, vysoce odrazivý sníh.

Formální přesnost určení střední hodnoty osvětlenosti v příslušné noci je vysoká, poněvadž je určena standardně z 600 nezávislých měření s relativní chybou zaručeně menší 10%. Přesto i při opravě o roční variaci, vliv měsíčního světla a oblačnosti, zůstává rozptyl popsán standardní váhovanou odchylkou 0,21 dex. Histogram této zbytkové variace je znázorněn v obr. 1 červenými sloupci. Rozložení je nyní jež hodně podobné gaussovskému, což ukazuje na to, že příčinou již nebudou více či méně periodické děje, ale spíše náhodné či kvazináhodné jevy. Může to např. být proměnná odrazivost mraků, déšť, sněžení, mlha nebo projevy lidské aktivity, které jsme nevzali v úvahu. Zčásti se též může jednat o účinky vlivů, které jsme sice do modelu zahrnuli, ale ne zcela adekvátně.

Ve svém souhrnu jsou pak účinky těchto kvazistochastických dějů srovnatelné s účinky všech dějů, které jsme kvantifikovali v použitém lineárním modelu. Pomocí modelu tak můžeme zhruba předpovědět, jak jasná bude ta která noc, musíme však předem počítat s tím, že pozorovaná skutečnost se od předpovězené bude lišit o $\pm 0,21$ dex. Nicméně i tak lze model použít k obecnějším závěrům, které mohou mít i praktický výstup, např. v úpravě režimu veřejného osvětlení v letních a zimních měsících.