

## УДАЉЕЊЕ ЗЕМЉЕ И МЕСЕЦА КРОЗ ГЕОЛОШКО ВРЕМЕ

ВЛАДО МИЛИЋЕВИЋ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*3VM Geo Ltd., Calgary*

<sup>2</sup>*Удружење Милутин Миланковић, Београд*

E-mail: vladomilicevic@shaw.ca

**Резиме:** Кроз део протерозоика и читав фанерозоик (око  $1,4 \cdot 10^6$  година у развоју Земље као планете) удаљење Земље и Месеца мењало се са око 55 Земљиних екваторијалних пречника до нешто више од 60 у данашње време. Користећи модел океана Мејерса и Малинверна (2018) у овом раду је представљено активно растојање Земља-Месец кроз читав фанерозоик. Посебно место дато је К-Т граници, Ј-К граници, П-Т граници и граници протерозоик-фанерозоик, као и савременом перигеју и апогеју. Нађено је да се за  $545 \cdot 10^6$  година растојање константно увећавало до садашњих  $22,72 \cdot 10^6$  m, па се самим тим плимски ефекат смањивао, а само за креду годишње се мењао за 4,38 cm или 0,1 mm дневно. Далеко изазовније и комплексније биће одређивање удаљења Земље и Месеца током протерозоика, јер је за тако нешто потребно пронаћи квалитетно очуване слојеве у кратонима, као што је то у случају Ксиамалинг формације у северној Кини. Ипак, само на тај начин може да се унапреди млада и скоро настала метода одређивања старости *астрохронологија*, као и Миланковићеви циклуси осунчавања из времена пре фанерозоика.

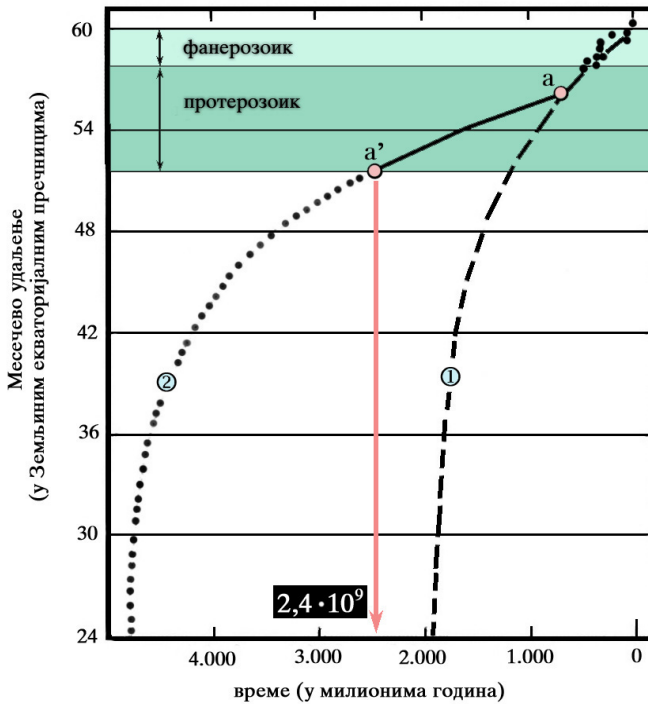
**Кључне речи:** Систем Земља-Месец, Миланковићеви циклуси

### 1. УВОД

Данашње растојање од Земље до Месеца (или средње удаљење Месечевог центра од Земље-Месец барицентра) износи  $3,844 \cdot 10^8$  m (или незнатно више од 60 Земљиних екваторијалних пречника, с тим што се узима да је Земљин средњи екваторијални пречник 6,378.137 m) суштински је одраз затеченог стања у антропогеном времену као представе краткопериодичне орбиталне интеракције једне планете и њеног природног сателита у Сунчевом систему. У геолошкој прошлости, међутим, посебно у делу *прекамбријског супереона* (геохронолошком периоду старијем од  $570 \cdot 10^6$  година или пре почетка периоде камбријума), највећи број резултата

истраживања указује на чињеницу да је растојање Земља-Месец било мање и да се оно током протеклих геолошких еона (протерозоик-фанерозоик) непрестано увећавало до садашњег положаја (Walker and Zahnle, 1986; Meyers and Malinverno, 2018). Месечеви плимски циклуси (или климатски ефекти), утврђени као 20-годишњи или, тачније, 18,6-годишњи, помоћу: (а) температуре ваздуха на 30 станица у источном (Currie, 1981; 1984; Currie and Fairbridge, 1985) и количине падавина; (б) западном делу Северне Америке (Vines, 1982); (в) путем података добијених из година дрвећа из западног дела Северне Америке и Патагоније (Currie, 1983; 1984а); (г) индијских монсуна (Campbell et al., 1983; Currie, 1984б); (д) периодичних поплава које је изазивао Нил (Hameed, 1984), као и других резултата истраживања, примењени су како би се дошло до податка о удаљењу Земље и Месеца, посматрано кроз геолошко време. Користећи податке Scrutton-а (1978), односно плимску фриkcију и Земљину ротацију, Walker и Zahnle (1986) добили су дијаграм Месечевог удаљења за фанерозоик, а затим је тај однос продужен на прекамбријумски супереон на основу цикличности „варви” са расположивим периодом од  $23,3 \pm 0,3$  годишње у Вили Воли усложеној гвожђевитој формацији Хамерсли групе у Западној Аустралији, старости  $2,4 \cdot 10^9$  година (Trendall, 1983), па је све то допуњено палеонтолошким подацима и датумима из исте формације (сл. 1).

Ови резултати недвосмислено упућују на неминовну примену Миланковићевих цикличних промена, иако су они иницијално били коришћени за прорачун далеко скромнијих кварталних 600.000 година (Milankovitch, 1941) и касније потврђени у временским скалама прецесије 19-23 (све у хиљадама година), нагиба осе ротације 43 и ексцентричности 100 и 405 (Hays et al., 1976; Petit et al., 1999; Hinnov and Hilgen, 2012). Очигледно је да Миланковићев механизам цикличних промена има: (а) универзални карактер и (б) помоћу њега може не само да се трага за климатским променама у току геолошке прошлости (Zhang et al., 2015), већ и о односима планета и сателита у Сунчевом систему (Meyers and Malinverno, 2018). Како је у току прве две декаде XXI века начињен читав низ корисних истраживања у области астрогеологије (с тим у вези и астрофизике, седиментологије, палеоокеанографије, астрохронологије) и уопште детаљнијег упознавања астрономског сигнала и његове везе са ритмичким променама израженим на протерозојским седиментима (Laskar et al., 2004; Waltham, 2015; Meyers, 2015), намера је овог саопштења да се укаже на један реалан, али и даље недовољано истражен правац примене Миланковићевих циклуса осунчавања чија су врата тек бојажљиво одшкринута.



**Слика 1:** Удаљење Земље и Месеца током геолошке историје. Подаци за фанерозоик представљени су на основу рада Scrutton-a (1978), док је за прекамбријски супереон (претежно протерозоик) коришћена цикличност од 23,3 годишње (објашњено као Месечев плимски утицај) из гвожђевите формације Вили Воли у Западној Аустралији. Крива ① добијена је екстраполацијом једначине (1), као и на основу детаљнијих фанерозојских података; крива ② одређена је из једначине (2)<sup>1</sup> и осредњених прекамбријских плимских променљивих садржаја или палеонтолошких података као и података из Вили Воли формације (означено као дуж a-a').

<sup>1</sup> Једначина (1) о којој је реч има следећи облик:

$$\frac{a}{a_0} = \left[ 1 - \frac{13}{2} T \frac{\langle a_0 \rangle}{a_0} \right]^{2/13}$$

Једначина (2) има следећи облик:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{a_1}{a_0} \left[ 1 - \frac{13}{2} (T - T_1) \frac{\langle a_1 \rangle}{a_1} \right]^{2/13}$$

где су:  $a/a_0 = 0,86 \pm 0,01$  – 23,3 годишњи Месечев циклус;  $a \cong 1,3 \cdot 10^{-7}$  cm/s – рецесиона брзина у дужем временском периоду (милионском);  $a_0 = 3,84 \cdot 10^{10}$  cm – садашње удаљење Земља-Месец;  $T$  – време од садашњости до тражене старости;  $\langle a_0 \rangle$  - средња брзина Месечеве рецесије када је  $a = a_0$ ;  $\langle a_1 \rangle$  - средња брзина Месечеве рецесије када је  $a = a_1$ ;  $a_1$  – тражено удаљење за одређен временски период  $T$ ;  $T_1$  – време на граници прекамбријум – фанерозоик (пре око  $570 \cdot 10^6$  година).

## 2. УДАЉЕЊЕ ЗЕМЉА-МЕСЕЦ

Да би се квалитетно решили проблеми астрохронологије, први је услов да се на Земљи пронађу ритмички седиментолошки слојеви (најпожељније је да буду што старији), а затим поуздано датирају и онда изведу реконструкције, специјално нађу протерозојски астрономски циклуси. Такав један мултидисциплинарни задатак решен је у добро очуваној формацији Ксиамалинг у Кини  $\sim 1,4 \cdot 10^9$  година старости на северокинеском кратону (Zhang et al., 2015) где су откривене: (а) дугопериодичне промене у геохемијском саставу и (б) краткопериодичне у седиментима са цикличном геохемијском динамиком која је строго контролисана орбиталним утицајима са додатним одразима на ветрове, океанску циркулацију, органски карбонатни флуks, трагове акумулације метала, количину детритичних честица у седиментима итд.

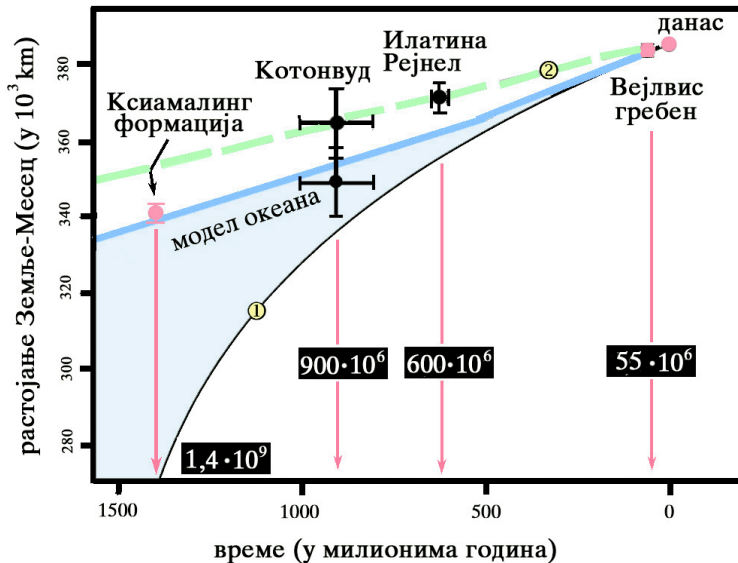
За разлику од Zhang-a et al. (2015), Meyers and Malinverno (2018) развили су посебан метод *TimeOptMCMC* који им је омогућио да се из ритмичких стратиграфских секвенци утврде да је прецесиона константа износила  $85,79 \pm 2,72$  лучне секунде/годину, удаљење Земља-Месец  $3,409 \cdot 10^8$  m  $\pm 2,6 \cdot 10^6$  m, дужина дана  $18,68 \pm 0,25$  сата, а доминантни климатски циклуси били су следећи: прецесија  $\sim 14$  и ексцентричност  $\sim 131$  (све изражено у хиљадама година). Увећање растојања Земље и Месеца за око 11,3% или  $4,35 \cdot 10^7$  m за период од  $\sim 1,4 \cdot 10^9$  година (или 6,8 Земљиних екваторијалних пречника) дало је једну реперну (упоришну) представу која је у много чему поправила поприлично несигурну одредбу растојања Земља-Месец добијену из америчке формације Велики Котонвуд у Јути, САД (старости око  $900 \cdot 10^6$  година) на  $3,64192 \cdot 10^8$  m (Sonett and Chan, 1998), а дужина дана модификована на 18,9 сати.

Осредњен или линеарни распоред на дијаграму времена (апсциса) и растојања Земља-Месец (ордината) добијен је искључиво на основу три поузданија стања:

- (а) садашњег удаљења Земље и њеног сателита;
- (б) резултата из еоценског Вејлвис гребена, старости око  $55 \cdot 10^6$  година, добијеног током пројекта дубокоморског бушења (тачније DSDP пројекат, крак 75, локације 350, 351 и 352, Ангола басена, западни део Африке, DSDP, 2007), где је нађено да је удаљење Земља-Месец износило  $3,8311 \cdot 10^8$  m и
- (в) већ поменутог Meyers and Malinverno (2018) саопштења из  $\sim 1,4 \cdot 10^9$  година старости кинеске формације Ксиамалинг (сл. 2).

Са дијаграма растојања Земље-Месеца у функцији времена (у милионима година) јасно се запажа да су аутори Meyers and Malinverno (2018) у свом моделу океана предност дали северокинеској формацији Ксиамалинг и одредби историје Земља-Месец у дубљој геолошкој прошлости

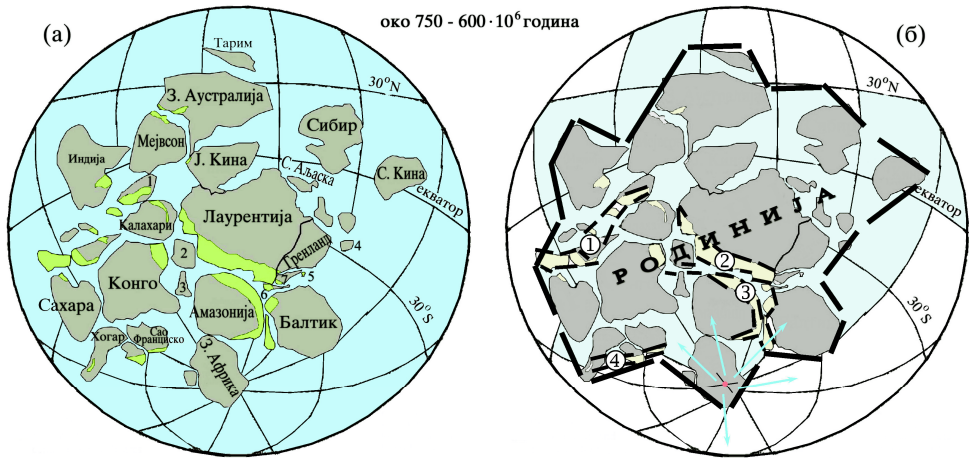
(протерозоику) него што је то био случај са прекамбријским (неопротерозојским) Илатина формацијом (Williams, 1989 and 2000) и Котонвуд формацијом из Јуте. У линеарном распореду Котонвуд-Илатина-Вејлвис гребен-данашњица за Ксиамалинг формацију растојање Земља-Месец у том случају требало би да износи  $\sim 3,500 \cdot 10^8$  m (уместо  $3,409 \cdot 10^8$  m  $\pm 2,6 \cdot 10^6$  m) са дужином дана од 20 сати. Модел океана више се приближава криви расејавања (ознака ① на сл. 2), као и доња одредба из Котонвуд формације где је већ за старост од око  $900 \cdot 10^6$  година нађено да је удаљење Земља-Месец износило приближно исто као за Ксиамалинг формацију, иначе старију за око  $500 \cdot 10^6$  година (види сл. 2).



**Слика 2:** Реконструкција удаљења Земља-Месец на основу две плимске процене и два модела *TimeOptMCMC*. Уочљиво је да су три реперне позиције усклађене са моделом океана (протерозојска Ксиамалинг формација - еоценска Вејлвис гребен-данашњица), а прекамбријска Илатина формација и Рејнел глиници (старости  $\sim 620$  милиона година) и прекамбријски Велики Котонвуд одударaju од истог модела за скоро  $13 \cdot 10^3$  m. Под ① назначено је садашње стање дисперзије резултата истраживања, што сведочи о нивоу достигнућа и поузданости резултата истраживања; ознака ② представља линеарни распоред формација Котонвуд-Илатина-Вејлвис гребена-данашњице назначено од стране Bills-a и Ray-a (1999), који је првобитно послужио као модел океана, али је и допуњен од стране аутора овог саопштења.

Модел океана, који су користили Bills and Ray (1999), а касније Meyers and Malinverno (2018), требало је да умањи висок степен расејавања резултата истраживања путем успоравања ротације, смањивањем плимске дисперзије и споријом брзином удаљавања Земље и Месеца. Наведени модел, међутим, нема поуздану основу, већ је резултат компилационе процене и примене резултата са већег броја различитих извора (Sonett et al., 1996a and 1996b; Sonett and Chan, 1998; Trendall, 1973; Walker and Zahnle, 1986) уз апроксимациону одредбу удаљења Земља-Месец од  $3,3 \cdot 10^8$  m за време од  $2,5 \cdot 10^9$  година (Williams, 1989). Треба напоменути да је историја настанка океанских модела тесно повезана са Месечевом орбиталном еволуцијом и решавањем проблема динамичког израза кроз тзв. „временску скалу”, што је све скупа дало за повод да се првобитно реше различите форме Лапласових хидродинамичких једначина (Hansen, 1982; Webb, 1982; Ooe et al, 1990; Kagan and Maslova, 1994). Колико год да је тај проблем из математичко-физичког домена и моделирања релативно задовољавајуће окончан [у протерозојској геолошкој прошлости ротација Земље била је бржа од данашње, растојање Земља-Месец краће, фреквентни плимски утицај израженији, премда Webb (1982) овај последњи утицај не истиче посебно, иако га наводи као значајан], толико су теренски услови били тежа енигма, нарочито протерозојски, јер је требало пронаћи најпоузданије ритмичке секвенце (циклостратиграфски репери) и у њима најквалитетнији астрономски сигнали за успостављање основе *астрохронологије*. Не можемо поуздано тврдити да је то успешно успостављено код Менсфилд формације (старости  $310 \cdot 10^6$  m  $\pm$  5 година, удаљење Земља-Месец  $3,753 \cdot 10^8$  m  $\pm$  1,9), а још мање Котонвуд формације (старости  $900 \cdot 10^6$  m  $\pm$  100, удаљење Земља-Месец  $3,509 \cdot 10^8$  m  $\pm$  4,6) код које је расипање података посебно изражено (сл. 2).

Захваљујући новијим истраживањима у Ксиамалинг формацији линеарни модел океана (Meyers and Malinverno, 2018) померен је ка криви савремене брзине расипања (сл. 2, крива ①), односно за одстојање  $\delta = 1,5 \cdot 10^7$  m, према резултатима Webb-а (1982). Ово само додатно доказује да су за квалитетнији и поузданији модел океана неопходно потребна новија истраживања, посебно циклостратиграфска, али и палинспастичке реконструкције протерозојског суперконтинента Родиније, тј. за западне и источне ободне континенталне делове или шелф појединих кратона (сл. 3). Ти ободни делови морали су бити под сталним и снажним плимским утицајима не само због своје широке отворености ка тадашњем свеокеану или пра-Панталаси, већ и због младе континенталне коре и још млађе ритмички исталожених седимената и неконсолидованих формација. За даље решавање еволуције Земља-Месец (посебно оне која задире у архајски еон) од непроцењиве вредности био би проналазак ритмичке формације старије од услојене гвожђевите и недовољно развијене кварцне формације Вили Воли у западном делу Аустралије (старости око  $2,4 \cdot 10^9$  година).



**Слика 3:** Распоред континената пре око 750 до  $600 \cdot 10^6$  година када је постојало једно свекопно или суперконтинент Родинија (име дато по руском изразу *родина* = земља, отаџбина) са највећом концентрацијом архипелашких екваторијалних копнених простора и јужнохемисферским пространством све до јужног пола. Посебно су интересантни орогени појасеви и континентални маргинални лукови где би могло да се трага за некадашњим и израженијим плимским ефектима. Ознаке на слици под (а): 1 - копно Дронинг Мауд, 2 - Рокол, 3 - Парана, 4 - Источни Свалбард, 5 - Северозападна Шкотска, 6 - Хортис, 7 - Рио де ла Плата; ознаке на слици под (б): ①, ②, ③ и ④ - орогени појасеви и континентални маргинални лукови.

Приказ континената дат је на основу рада Li at al., 2009. Јужни делови Родиније (посебно делови Западне Африке, Амазоније и Балтика) сматрају се круцијалним доказом за хипотезу „снежне лопте” (са центром глацијације на јужном полу, назначено стрелицама) која претпоставља постојање планете са комплетно замрзнутим свеокеаном и плаштом угљен-диоксида испод кога није био могућ продор Сунчевих зрака (слично Јупитеровим сателитима Европа у данашње време или делимично Ганимедом).

Модел океана, којим се суштински одређује растојање Земља-Месец у геолошкој прошлости, није ништа друго до релативно скроман избор линеарног распореда положаја протерозојских формација на дијаграмима (практично две или три код већине аутора) уз додатак једне фанерозојске и садашње као почетне. Наравно, било би претенциозно не рећи да је то недовољно када су у питању астрохронолошке непоузданости, корелације, калибрације са седиментолошким брзинама ритмичких смена, различитим апликацијама и моделима, применом методологије седиментолошких записа итд. На крају крајева, већина аутора то и признаје као неопходност ка бољем познавању еволуције система Земља-Месец.

### 3. УДАЉЕЊЕ ЗЕМЉА-МЕСЕЦ КРОЗ ГЕОЛОШКУ ЕВОЛУЦИЈУ

Ма колико да се продрло у дубоку геолошку или лунарну прошлост Земље и Месеца, посебно питање њиховог међусобног удаљења и свих других утицаја у вези с тим, неће се решити адекватно уколико се не примене фундаментални принципи Миланковићевих циклуса осунчавања, посебно прецесија и ексцентричност. Савремена прецесија (параметри  $p_1, p_2 \dots p_5$ , изражено у хиљадама година) варирају од 18.951 до 23.678, док је за Ксиамалинг формацију од 12.569 до 14.392 (Laskar et al., 2004). За разлику од прецесије, ексцентрична путања Земље око Сунца имала је скоро безначајне промене, па је, рецимо за  $e_1$  или савремену вредност од 405.091 година пре  $\sim 1,4 \cdot 10^9$  година износила 405.077 или за  $e_5$  данас је 130.781 година, а у протерозоику била је 131.392. Промене ексцентрицитета од 0,00346% за  $e_1$  и 0,46503% за  $e_5$  јасно упућују на већу пажњу ка краћим циклусима, али и поред тога остаје чињеница да су прецесионе промене за време од протерозоика до данас далеко израженије (скоро 61%), посебно климатски прецесиони циклус од  $23,678 \cdot 10^3$  година у кенозоику (Meuys and Malinverno, 2018). Према томе, када се у ритмичким геолошким сменама или секвенцама одреди пет доминантних ексцентричних циклуса ( $e_1, e_2 \dots e_5$ ) и пет доминантних прецесионих циклуса ( $p_1, p_2 \dots p_5$ ), рачунање одстојања Земља-Месец постаје проблем успостављања средњег нумеричког модела океана за који Bills and Ray (1999) сматрају да је геометријски прихватљив и да његово „аномално” расипање израженије тек пре око  $1 \cdot 10^9$  година.

Ако се прихвати чињеница да је од једне милијарде година старости модел океана са релативно „задовољавајућим” расипањем резултата прорачуна, тада се за део прекамбријума и фанерозоик може представити један астрохронолошки модел базиран на финозрним седиментима који садрже плимске ламинације и поуздано очуване астрономске сигнале у њима који су у функцији квазипериодичних циклуса инсолације или Миланковићевих циклуса осунчавања. Таква основа даје дугопериодичну еволуцију система Земља-Месец и показују да је главну улогу имала плимска промена угловног момента између Земљине ротације и Месечеве орбите (Bills and Ray, 1999).

Овом приликом, међутим, задржаћемо се само на растојању Земље и Месеца кроз геолошко време да бисмо показали да овакав начин представља један релативно континуиран и еволуционистички развој историје једне планете и природног сателита. Наиме, користећи само два положаја у геолошкој прошлости (Илатина,  $650 \cdot 10^6$  година; Вејлвис гребен,  $55 \cdot 10^6$  година) и садашњи, добија се оквир за фанерозојска удаљења Земља-Месец уз додатак за перигеј и апогеј (Табела 1).



**Табела 1:** Прорачун удаљења Земља-Месец у току фанерозоика (време од  $545 \cdot 10^6$  година до данас) и дела протерозоика на основу резултата истраживања Вејлвис гребена (старости  $55 \cdot 10^6$  година) и Илатине (старости  $650 \cdot 10^6$  година) и прорачуни растојања Земља-Месец на основу данашњег перигеја и апогеја у геолошкој прошлости и будућности.

Период	Удаљење Земља- Месец (у $m \cdot 10^8$ )	Време (у $10^6$ )	Коефицијент удаљења	Догађаји
1	2	3	4	5
холоцен	3,8399	0	1	данашњица
фанерозоик	3,8311	55	0,9977	Вејлвис гребен
	3,8267	65	0,9965	К-Т (креда-терцијар) граница, изумирање диносауруса
	3,7921	144	0,9875	Ј-К (јура-креда) граница
	3,7480	245	0,9761	П-Т (перм-тријас) граница, изумирање 90% врста у океанима
	3,6168	545	0,9419	Протерозоик-фанерозоик граница
протерозоик	3,5710	650	0,9299	Илатина
данашњи перигеј	3,63295	501	0,9461	ордовицијум, миалонгијан, епоха драмијан, настанак рифова и сунђера археоцијата (Archaeocyatha)
данашњи апогеј	4,0550	482 (у будућности)	1,0560	?

За приказ удаљења Земља-Месец одабрана су четири карактеристична догађаја у еволуцији овог система, као и садашње удаљење Месеца у перигеју и апогеју. Уочљиво је, рецимо, да се на граници креда-терцијара (К-Т граница), када су изумрли диносауруси (Alvarez, 1997; McLeod et al., 1997; Lawson, 2004; Schulte et al., 2010), удаљење незнатно разликовало у односу на резултате из Вејлвис гребена, иако је старосна граница померена за  $10 \cdot 10^6$  година (разлика коефицијента удаљења само 0,0012). Растојање за границу јура-креда (Ј-К граница) представљено је зато да би се назначио комплетан и занимљив кредни период у развоју планете због изузетно топле

климе, посебно у касној креди (Wolfe and Upchurch, 1987; Huber et al., 2002; Nordth et al., 2003), дуготрајног суперхрона нормалне поларности и бимодалног геодинама (Tarduno et al., 2002; Tauхе and Staudigel, 2004; Linder and Gilder, 2011; Granot et al., 2012; Ogg and Hinnov, 2012; Lhuillier et al., 2016), карактеристичних ритмичких Миланковићевих циклуса осунчавања (Park and Ogiesby, 1991; Flögel, 2001; Ma et al., 2019) и дужине соларног дана од 370 или 375 по години, одређеног на основу палеонтолошких резултата истраживања (Berry and Barker, 1968; Pannella, 1972; Deines and Williams, 2016). На почетку креде (пре око  $144 \cdot 10^6$  година) удаљење Земља-Месец износило је  $3,7921 \cdot 10^8$  m, а на крају (пре око  $65 \cdot 10^6$  година)  $3,8267 \cdot 10^8$  m; према томе, за  $79 \cdot 10^6$  година, колико је креда трајала, на сваких милион година Земља и Месец су се међусобно удаљавали за 43,7 km, на годину дана 4,38 cm или дневно (година узета за износи 370 дана) 0,1 mm.

Сличан разлог постојао је и за границу перм-тријас (П-Т граница) пре  $245 \cdot 10^6$  година, јер је тада у морима и океанима изумрло око 90% живог света (Erwin, 1993; Benton, 2003), а граница протерозоица и фанерозоица на  $545 \cdot 10^6$  година занимљива је због експлозије живота и доказа у бројним фосилним слојевима (Gould, 1989; Butterfield, 2003; Steiner et al. 2007; Maloof et al., 2010).

Интересантни су и положаји савременог перигеја и апогеја, јер овај прорачун показује да Месец у перигеју заузима исту ону позицију коју је као средишње гравитационо привлачење имао пре око  $501 \cdot 10^6$  година или у геолошкој периоди ордовицијуму када су настајали први рифови и развијали се сунђери археоцијати. На супротној страни, данашњем апогеју одговараће средишњи положај Месеца тек за  $482 \cdot 10^6$  година у будућности, што недвосмислено говори у прилог дуготрајном одржању енергије плиме и осеке, посебно у оним приобалним областима где је изражена отвореност ка океанима и морима, али и где су повољни локални услови као што су дубина воде, висина обале или конфигурација морско-океанског дна.

#### 4. УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

Модел океана, генерално посматрано, представља линеаран развој међусобног удаљења Земље и Месеца током њиховог орбиталног односа и геолошке еволуције ова два небеска тела. Ритмички механизам седиментације и астрономски сигнали регистровани помоћу Миланковићевих циклуса осунчавања, међутим, имају сасвим други карактер и зато није предимензионисано нити прејудицирано уколико се каже да ће се њима поспешити, реалније сагледати и још боље упознати временска слика односа ова два небеска тела током дела протерозоица и фанерозоица, а посебно њихов палеоклиматолошки развој.

Досадашњи резултати истраживања доказују да су се Земља и Месец међусобно непрестано удаљавали (брзина је износила 43,71 km на милион година), али је зато опадала ротација, односно одстојање Сунце-Земља [пре

620 · 10<sup>6</sup> година Williams (2000) нашао је да је година трајала 400 ± 7 дана]. Ово је још један доказ о константности плимског ефекта, чији ће данашњи однос Месец : Сунце = 2,2 : 1 (релација дата према утицају на Земљу) у будућности износити 2 : 1, али то неће представљати посебно изражен степен умањења, јер ће се удаљавање Земље и Месеца компензовати приближавањем Земље и Сунца. Да ли ће, рецимо, у канадском басену Минас амплитуда плимског ефекта у будућности бити 19 m уместо садашњих 19,6 m значиће практично исто колико и једнострано слабење гравитационог дејства Месеца на Земљу.

Са колико се пажње и детаљности може продрети у дубљу протерозојску прошлост преко модела океана зависиће искључиво од стања на терену, тј. очуваних ритмичких секвенци и астрономског сигнала у кратонима (најстаријим деловима терена на планети). Неоспорно је да ће од изузетне важности остати одређивање Миланковићевих циклуса 23, 41 и 100 (дато у хиљадама година) и да ће то највероватније означити одређене корекције у досадашњем линеарном моделу океана.

За фанерозојски део геолошке историје могу се очекивати мањи износи расипања квалитативног фактора ( $Q$ ) и мањи ефективи Земља + океан плимског Лавовог броја ( $k$ ), што другим речима значи даље побољшање океанских модела и умањење њихових досадашњих „аномалних” вредности или приближавање „реалнијим” орбиталним односима.

### Литература

- Alvarez W.: 1997, *T. rex and the Crater of Doom*, Princeton Univ. press, 1-208.
- Benton M.: 2003, *When life Nearly Died*, Thames & Hudson, London.
- Berry W. B. N., Barker R. M.: 1968, Fossil Bivalve Shells indicate Longer Month and Year in Cretaceous than Present, *Nature*, **217**, 938-939.
- Bills B. G., Ray R. D.: 1999, Lunar Orbital Evolution: A Synthesis of Recent Results, *Geophys. Res. Lett.*, **26(19)**, 3045-3048.
- Butterfield N. J.: 2003, Exceptional Fossil Preservation and the Cambrian Explosion, *Integ. Comp. Biol.*, **43(1)**, 166-177.
- Campbell W. H., Blechman J. B., Bryson R. A.: 1983; Long period tidal forcing of Indian monsoon rainfall: an hypothesis, *J. Cli. Appl. Met.*, **22**, 289-296.
- Currie R. G.: 1981, Evidence for 18.6 year M<sub>N</sub> signal in temperature and drought conditions in North America since AD 1800, *J. Geophys. Res.*, **86**, 11055-11064.
- Currie R. G.: 1983, Detection of 18.6 year nodal induced drought in the Patagonian Andes, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 1089-1092.
- Currie R. G.: 1984a, Periodic (18.6-year) and cyclic (11-year) induced drought and flood in western North America, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7215-7230.
- Currie R. G.: 1984b, On bistable phasing of 18.6 year nodal induced flood in India, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 50-53.
- Currie R. G., Fairbridge R. W.: 1985, Periodic 18.6-year and 11-year induced drought and flood in northeastern China and some global implications, *Quarter. Sci. Rev.*, **4(2)**, 109-134.
- Deines S. D., Williams C. A.: 2016, Earth's Rotational Deceleration: Determination of Tidal Friction Independent of Timescales, *Astron. J.*, **151**, 1-12.

- DSDP: 2007, Reports & Publications, doi 10.2973.dsdp.pro.75, 1984.
- Erwin D.: 1993, *The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian*, Columbia Univ. press, New York.
- Flögel S.: 2001, *On the influence of precessional Milankovitch cycles on the Late Cretaceous climate system: comparison of GCM-results, geochemical, and sedimentary proxies for the western interior seaway of North America*, Doctoral Thesis, 1-236, Kiel.
- Granot R., Dyment J., Gallet Y.: 2012, Geomagnetic field variability during the Cretaceous normal superchron. *Nat. Geosci.*, **5(3)**, 220-223.
- Gould S. J.: 1989, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, W.W. Norton & Comp.
- Hameed S.: 1984, Fourier analysis of Nile flood levels, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 843-845.
- Hansen K. S.: 1982, Secular effects of oceanic tidal dissipation on the moon's orbit and the earth's rotation, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 457-480.
- Hays J. D., Imbrie J., Shackleton N. J.: 1976, Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages, *Science*, **129**, 1121-1132.
- Hinnov L. A., Hilgen F. J.: 2012, Cyclostratigraphy and astrochronology. In: Gradstein F. M., Ogg J. G., Schmitz M., Ogg G. M. (Eds.), *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier, Amsterdam, **1**, 63-83.
- Huber B., Norris R., McLeod K.: 2002, Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous, *Geology*, **30**, 123-126.
- Kagan B. A., Maslova N. B.: 1994, A stochastic model of the earth-moon tidal evolution accounting for cyclic variations of resonant properties of the ocean: an asymptotic solution, *Earth, Moon, Planet.*, **66**, 173-188.
- Laskar J., Robute P., Joutel F., Gastineau M., Correia A. C. M., Levrard B.: 2004, A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth, *Astron. Astrophys.*, **428**, 261-285.
- Lawson A. E.: 2004, T. rex, the Crater of Doom, and the Nature of Scientific Discovery. *Science & Education*, **13(3)**, 155-177.
- Lhuillier F., Gilder S. A., Wack M., He K., Petersen N., Singer B. S., Jicha B. R., Schaen A. J., Colon D.: 2016, More stable yet bimodal geodynamo during the Cretaceous superchron?, *Geophys. Res. Lett.*, **43(12)**, 6170-6177.
- Lii Z. X., Bogdanova S. V., Collins A. S., Davidson A., Waele B. De, Ernst R. E., Fitzsimons I. C. W., Fuck R. A., Gladkoshub D. P., Jacobs J., Kalstrom K. E., Lu S., Natapov L. M., Pease V., Pisarevsky S. A., Thrane K., Vernikovskiy V.: 2009, Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis, *Precambrian Research*, **160(1-2)**, 179-210.
- Linder J., Gilder S.: 2011, Geomagnetic secular variation recorded by sediments deposited during the Cretaceous normal superchron at low latitude, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **187(3-4)**, 245-260.
- Ma C., Meyers S., Sageman B.: 2019, Testing Late Cretaceous astronomical solutions in a 15 million year astrochronological record from North America, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **513**, 1-11.
- Maloof A. C., Porter S. M., Moore J. L., Dudas F. O., Bowring S. A., Higgins J. A., Fike D. A., Eddy M. P.: 2010, The earliest Cambrian record of animas and ocean geochemical change, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **122 (11-12)**, 1731-1774.
- McLeod N., Rawson P. F., Forey P. L. et al.: 1997, Cretaceous-Tertiary biotic transition. *J. Geol. Soc.*, **154 (2)**, 265-292.

- Meyers S. R.: 2015, The evaluation of eccentricity-related amplitude modulation and bundling in paleoclimate data: An inverse approach for astrochronologic testing and time scale optimization, *Paleoceanography*, **30**, 1625-1640.
- Meyers S. R., Malinverno A.: 2018, Proterozoic Milankovitch cycles and the history of the solar system. *PNAS*, **115(25)**, 6363-6368.
- Milankovitch M.: 1941, *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*, Königlich Serbische Akademie, Spec. Publ., 132, 132, XX + 633.
- Nordth L., Atchley S., Dworkin S.: 2003, Terrestrial Evidence for Two Greenhouse Events in the Latest Cretaceous, *GSA Today*, 4-9.
- Ogg J. G., Hinnov L. A.: 2012, Cretaceous, in: Gradstein et al. (Eds.), *The Geological Time Scale 2012*, Elsevier, **2**, 824-854, Boston.
- Ooe M., Sasaki H., Kinoshita H.: 1990, Effects of the tidal dissipation on the moon's orbit and the earth's rotation, in: McCharty D., Carter W. (Eds.), *Variations in Earth Rotation*, Amer. Geophys. Union, **59**, 51-57, Washington,
- Pannella G.: 1972, Paleontological evidence on the earth's rotational history since Early Precambrian, *Astrophys. Space Sci.*, **16**, 212-237.
- Park J., Ogiesby R. J.: 1991, Milankovitch rhythms in the Cretaceous: A GCM modelling study, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **90(4)**, 329-355.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Benders M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E. and Stievard M. 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, **399**, 429-436.
- Schulte P., Alegret L., Arenillas I., et al.: 2010, The Chicxulub Asteroid impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary, *Science*, **327**, 1214-1218.
- Scrutton A.: 1978, Periodic growth features in fossil organisms and the length of the day and month, in: Brosche P., Sündermann J. (Eds.), *Tidal Friction and the Earth's Rotation*, Springer, 154-196, New York.
- Sonett C. P., Kvale E. P., Zakharian A., Chan M. A., Demko T. M.: 1996a, Late Proterozoic and Paleozoic tides, retreat of the moon, and rotation of the Earth, *Science*, **273**, 100-104.
- Sonett C. P., Zakharian A., Kvale E. P.: 1996b, Ancient tides and length of day: correction, *Science*, **274**, 1068-1069.
- Sonett C. P., Chan M. A.: 1998, Neoproterozoic Earth-Moon dynamics: Rework of the 900 Ma Big Cottonwood Canyon tidal laminae, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 539-542.
- Steiner M., Li G., Qian Y., Zhu M., Erdtmann B. D.: 2007, Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **254(1-2)**, 67-99.
- Tarduno J. A., Cottrell R. D., Smirnov A. V.: 2002, The Cretaceous superchron geodynamo. Observations near the tangent cylinder, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **99(22)**, 14,020-14,025.
- Tauxe L., Staudigel H.: 2004, Strength of the geomagnetic field in the Cretaceous normal superchron: New data from submarine basaltic glass of the Troodos Ophiolite, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**, Q02H06.
- Trendall A. F.: 1973, Varve cycles in the Weeli Wolli Formation of the Precambrian Hammersley Group, Western Australia, *Econ. Geol.*, **68**, 1089-1097.
- Trendall A. F.: 1983, The Hammersley Basin, in: A. F. Trendall, R. C. Morris (Eds.), *Iron Formation: Facts and Problems*, Elsevier, 69-129, Amsterdam.

- Vines R. G.: 1981, Rainfall patterns in western United States, *J. Geophys. Res.*, **87(C9)**, 7303-7311.
- Walker J. C. G., Zahnle K. J.: 1986, Lunar nodal tide and distance to the Moon during the Precambrian, *Nature*, **320**, 600-602.
- Waltham D.: 2015, Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy, *J. Sediment. Res.*, **85**, 990-998.
- Webb D. J.: 1982, Tides and evolution of the Earth-Moon system, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **70**, 261-271.
- Williams G. E.: 1989, Late Precambrian tidal rhythmites in South Australia and the history of the Earth's rotation, *J. Geol. Soc. London*, **146**, 97-111.
- Williams G. E.: 2000, Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit, *Rev. Geophys.*, **38**, 37-59.
- Wolfe J., Upchurch G.: 1987, North American non-marine climate and vegetation during the Late Cretaceous, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **61**, 33-77.
- Zhang S., Wang X., Hammarlund E. U., Wang H., Costa M. M., Bjerrum C. J., Connelly J. N., Zhang B., Bian L., Canfield D. E.: 2015, Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago, *PNAS*, **112**, E1406-E1413.

## DISTANCE OF THE EARTH AND MOON THROUGH THE GEOLOGICAL TIME

The distance of the Earth and Moon changed from about 55 Earth's equatorial radius to 60 equatorial radii today through the upper part of Proterozoic Eon and Phanerozoic Eon (for approximately  $1,4 \cdot 10^6$  years). Based on ocean model of Meyers and Malinverno (2018) we shown active Earth-Moon distance through the Phanerozoic Eon, especially for K-T boundary, J-K boundary, P-T boundary, boundary of Proterozoic Eon - Phanerozoic Eon and modern perigee and apogee. Distance between the Earth and Moon is changed for  $545 \cdot 10^6$  years and was constant bigger for  $22,72 \cdot 10^6$  m, but Lunar nodal tide was smaller. In Cretaceous Period, for example, distance between the Earth and Moon changed for 4,38 cm every year or 0,1 mm daily. The most complex and challenge work will be determination of the distance between the Earth and Moon during Proterozoic Eon because we will must find very quality and very protected layers in cratons, something like Xiamaling Formation of the North China Craton. It is one way to develop young and new method for determination of age or astrochronology or like Milankovitch cycle of insolation before Phanerozoic Eon.

**Key words:** Earth-Moon system, Milanković's cycles