

# CONSIDERAȚII PRIVIND PROBLEMA CÂMPULUI ELECTRIC AL GLOBULUI PĂMÂNTESC

Tudor Grosu, Mircea Bologna

Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe din Republica Moldova  
str. Academiei 5, Chișinău, MD-2028,  
[mbologna@phys.asm.md](mailto:mbologna@phys.asm.md)

**Abstract:** The problem of the nature of electric field in the atmosphere of the Earth is discussed. To answer the question whether clouds are the main cause of existence of the electric field on the Earth, we consider the case without the clouds in the atmosphere. Three possible mechanisms for electric field existence on the Earth and other celestial bodies are discussed: a mechanism based on the solar wind phenomenon, a mechanism based on the energy considerations, and a mechanism based on the hypothesis of interaction between electric charges near the Earth and their electric images. The main attention is paid to the last hypothesis, which is, by author's opinion, the most adequate and perspective for determining the nature of the electric field in the atmosphere.

## 1. Introducere

E bine cunoscut faptul că în atmosfera terestră în timp favorabil („frumos”, fără nori, precipitații, fulgere etc.), în preajma suprafeței pământului se constată un câmp stabil electrostatic, orientat vertical în jos, cu o intensitate de  $E \sim (120 \div 130) \text{ V/m}$ . Această mărime foarte rapid descrește cu înălțimea de la suprafața terestră  $h$ , astfel, încât la înălțimea  $h \sim 1 \text{ km}$  este egală cu  $\sim 40 \text{ V/m}$ , iar la  $h \sim (30-50) \text{ km}$ , practic, devine neglijabilă. Concomitent, se înregistrează și un curent electric corespunzător, vertical, din straturile superioare atmosferice (ionosferă), de o intensitate destul de stabilă,  $j_s \approx 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$ . În zonele de furtună situația diferă: atât intensitatea câmpului, cât și a celui de curent electric, în vecinătatea norilor considerabil variază, până la mărimi contrare (după semn), ceea ce se explică prin turbulența atmosferică. Actualmente câmpul electric terestru este modelat prin câmpul condensatorului sferic, una din armaturile căruia, conductoare de curent electric, o prezintă suprafața globului terestru, iar alta – straturile superioare atmosferice (la înălțimea de  $\sim 50 \text{ km}$ ), de asemenea de o conductibilitate electrică mare. În troposferă, i – au naștere norii, inclusiv, cei de furtună, care conform teoriilor existente, se încarcă electric: în partea inferioară negativ, iar în cea superioară – pozitiv. Prin urmare la descărcarea electrică a norului, de regulă, prin fulger, sarcinile negative sunt transportate la pământ, iar cele pozitive – în straturile atmosferice superioare. Astfel, se produce încărcarea condensatorului. Descărcarea are loc în zonele cu timp „frumos”. În rezultatul echilibrului dinamic dintre descărcările „fulger” în zonele cu timp nefavorabil, și celor „lente” în zonele favorabile, intensitatea câmpului electric global se menține staționară [1–3]. Această teorie, este în concordanță satisfăcătoare cu datele experimentale, dar totuși nu este acceptată unanim, există alternative. Ne vom referi la unele din ele. Conform teoriei menționate, dacă n-ar fi existat norii în atmosferă n-ar fi existat nici câmpul electric atmosferic. Există puncte de vedere contrarii, spre exemplu [4] se menționează posibilitatea de apariție a câmpului electric în rezultatul altor fenomene, cum or fi vântul solar (VS), sau formarea unei noi centuri electronice de radiație, la înălțimi  $\sim (10 \div 15) \text{ km}$  [4]. O astfel de abordare a

problemei, evident, are sens, însă vom adăuga încă: una energetică, și alta – ce ține de metoda imaginilor electrice. La început să ne referim pe scurt la mecanismul vântului solar (VS).

## 2. Rolul vântului solar în electrizarea Terrei

După cum s-a menționat în atmosferă circulă curentul vertical, orientat de sus în jos, care în cele din urmă, probabil, stă la baza tuturor fenomenelor electrice atmosferice. La rândul său, acest curent, aproape cu siguranță, este de natură solară. Un argument în favoarea acestei ipoteze ar fi cunoașterea densității totale („potențialului” de încărcare electrică) a curentului în VS, condiționat de protoni, estimată prin simpla formulă

$$j = env.$$

Substituind în ea sarcina electrică a protonilor  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ; concentrația  $n \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ ;  $v \approx 3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ , obținem:  $j \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ A/m}^2$ , ceea ce cu 5 ordine depășește densitatea terestră. Cu un astfel de „potențial” de încărcare, pare incontestabil: curentul electric atmosferic este de natură solară, ceea ce se menționează și alți autori [4, 5]. Observăm că majoritatea sarcinilor electrice din VS sunt acaparate de câmpul magnetic terestru, dar totuși, concomitent cu alte particule din plasma cosmică, a suta miime parte din ele, probabil, pătrund în spațiul terestru, creând curentul atmosferic existent.

## 3. Considerente energetice

Presupunem o particulă – model, inițial neutră, de formă sferică cu raza  $R_0$ , amplasată în preajma a mai multor particule cu raza  $r_0 \ll R_0$ , încărcate electric cu sarcina  $q$ . Atunci, particula menționată, în rezultatul interacțiunilor electrostatice, va acapara sarcina

$$Q = [R_0/(2r_0)] \cdot q. \quad (1)$$

Într-adevăr, fie  $N_0$  – numărul inițial de particule „mici”(ioni, praf etc.) dintre care  $N$  au efectuat transferul către particula majoră. Atunci, energia totală a sistemului la momentul dat este

$$U(N) = (N_0 - N) \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r_0} + \frac{(Nq)^2}{8\pi\epsilon_0 R}. \quad (2)$$

Numărul  $N$ , ce determină valoarea minimă a acestei funcții, și este numărul căutat, dat de relația (1), care la

înmulțirea cu sarcina  $q$ , a condus la mărimea  $Q$ . Dacă în relația (1) substituim  $q = e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  C,  $r_0 \sim 3 \cdot 10^{-15}$  m – sarcina și raza electronului, respectiv, iar  $R_0 \approx 6,4 \cdot 10^6$  m – raza Pământului, obținem  $Q \sim 10^3$  C, pe când această mărime se estimează cu un număr mult mai mare  $\sim 5 \cdot 10^5$  C. De comentat acest rezultat este greu rămâne doar de menționat valorile numerice sunt comensurabile, și nici n-ar fi fost de așteptat, ca rezultatele să coincidă. Poate la o anumită etapă de dezvoltare a Terrei, ca corp ceresc, ar fi fost posibil un astfel de scenariu de încărcare electrică prin electroni, sau alte particule, descrisă schematic cu formulele (1) și (2). Totuși constatăm că, în principiu, corpurile cerești, lipsite de atmosferă, spre exemplu, Luna, bolizii, ar fi fost posibil de a se încărca prin mecanismul în cauză. Ar fi interesant de verificat formula (1) pentru Lună.

Examinăm a treia ipoteză – natura „imaginată” a câmpului electric terestru, conform căreia câmpurile electrice ale planetelor, prezintă nu altceva decât câmpul sarcinilor, ce înconjoară planeta în ansamblu cu „sarcinile – imagine electrice” ale acestora în planete. Apropos, ulterior în acest model pot fi incluși și norii, însă în această comunicare ne vom limita cu cazul ipotetic de absență a lor.

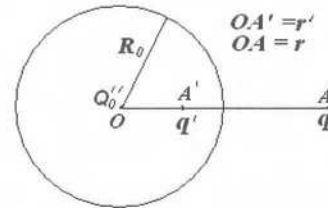
#### 4. Metoda imaginilor electrice

Dacă în preajma unei suprafețe sferice, conductoare de curent electric, este situată o sarcină electrică punctiformă  $q$  la distanța  $r$  de la centrul sferei, atunci problema câmpului electric din jur se soluționează prin metoda imaginilor electrice [2]. Abordarea problemei depinde de aceea, este izolată sau nu sfera de pământ. Cum de răspuns la această întrebare, dacă însăși sfera este Pământul? În opinia autorilor această sferă trebuie considerată unită la „pământ”, unde sub termenul „pământ” trebuie de subînțeles spațiul cosmic din preajma Terrei. Într-adevăr, nu poate fi vorba de izolație electrică a globului, dacă din straturile superioare atmosferice către pământ circulă curent, deja menționat ( $\sim 10^{-12}$  A/m<sup>2</sup>). Atunci, s-ar părea, că globului terestru i se poate atribui potențialul zero și de limitat cu o singură sarcină fictivă  $q'$ , care în cuplu cu cea dată  $q$ , creează potențialul necesar nul pe suprafața sferei. Însă, limitându-ne numai cu o singură sarcină fictivă, nu vom putea satisface unica condiție dată în cazul câmpului electric terestru: intensitatea lui la suprafața Terrei. De aceea va fi necesară o sarcină suplimentară centrală fictivă  $Q''$ . Atunci abordarea problemei este cea ilustrată în figură. După cum se știe [6] „sarcina – imaginată”  $q'$  și distanța ei  $r'$  de la centrul sferei se dau prin formulele:

$$q' = -(R_0/r)q; r' = R_0^2/r, \quad (3)$$

din care rezultă, că cu cât sarcina reală din jurul Pământului este mai îndepărtată, cu atât mai aproape de centrul lui este situată imaginea sarcinii. Pentru sarcinile din infinit imaginile sunt focusate în centrul pământului, însă ele tind spre zero:  $q' \rightarrow 0$ , dacă  $r \rightarrow \infty$ . Dar dacă în (3) admitem, spre exemplu,  $r = 3R_0$ , adică trei raze terestre, găsim  $q' = -0,33q$ , iar  $r' = R_0/3$ . Prin urmare, toată sarcina electrică, ce se conține în stratul atmosferic cu grosimea

$\sim 2R_0 \approx 13000$  km, care cuprinde și centurile de radiație, sunt reflectate într-un strat sferic virtual subteran de  $\approx (2/3)R_0$ . În realitate, însă sarcinile (induse) se conțin în stratul superficial a scoarței terestre. În el sunt reflectate nu numai sarcinile electrice în statică, dar și procesele cu caracter dinamic, ce se petrec cu aceste sarcini, inclusiv, curenții electrice atmosferici, descărcările electrice fulger, spraiturile etc. Prin urmare, „descifrând” fenomenele electrice în scoarța terestră, am putea să ne imaginăm, și chiar prognoza, referitor la fenomenele electrice din straturile atmosferice, și viceversa. Se intuiește o interacțiune și o corelare puternică dintre procesele electrice atmosferice și cele telurice [5].



#### Metoda imaginilor

Întru-cât, lungimea drumului liber parcurs de ioni în atmosferă este incomparabil mai mic decât diametrul Pământului, putem considera sarcinile electrice din atmosferă repartizate continuu cu o densitate oarecare  $\rho(\mathbf{r}, t)$ , iar cele imaginare (fictive)  $\rho'(\mathbf{r}', t)$  și în baza primei egalități (3) putem scrie:

$$dq' = -(R_0/r) \cdot dq \Rightarrow \rho' \cdot dV' = -(R_0/r) \cdot \rho dV. \quad (4)$$

Sarcina punctiformă fictivă  $Q''$  (figura) se va determina din condiția că este cunoscută intensitatea câmpului electric pe suprafața terestră (vezi **Introducerea**):

$$E(r)|_{r=R_0} = E_s, \quad (5)$$

**4.1. Sarcina indusă pe globul pământesc.** Sarcina totală  $Q''$ , pe suprafața globului pământesc va fi egală cu suma:

$$Q'' \equiv Q' + Q'', \quad (6)$$

unde  $Q'$  – sarcina repartizată fictivă, care în baza relațiilor (4) se determină prin integrare pe stratul sferic de grosimea  $H \equiv R_* - R_0$ , unde  $R_*$  – raza exterioară a „electrosferei”, adică a sferei, ce include toată mulțimea sarcinilor electrice atmosferice. Această mărime poartă un caracter nedeterminat, ca distanța la care câmpul electric devine neglijabil, și poate fi estimată doar prin ajustarea rezultatelor teoretice la cele experimentale. Din formulele (4) avem:

$$Q' = \int_{V'} dq' = -R_0 \int_{V'} \frac{\rho}{r} \cdot dV. \quad (7)$$

Considerând repartiția  $\rho(\mathbf{r}, t)$ , pozitivă și sferic simetrică, conform datelor existente referitor la electricitatea atmosferică, vom simplifica calculul integralei (7), scoțând în baza teoremei despre medie,  $1/\bar{r}$  în fața integralei:

$$Q' = -\lambda \int_V \rho(r, t) \cdot dV; \quad (8)$$

unde s-a notat:

$$\lambda \equiv R_0 / \bar{r}; \quad \bar{r} \in (R_0; R_s), \quad (9)$$

Din (8) se observă că este prevăzută o eventuală dependență a densității sarcinii electrice de timp, cum o fi în cazul variației unitare zilnice a câmpului.

Astfel, calculul sarcinii electrice totale repartizate fictive  $Q'$  cu exactitate de un factor constant adimensional  $\lambda < 1$  se reduce la calculul sarcinii electrice atmosferice totale  $Q_{at}$

$$Q' = -\lambda Q_{at}, \quad (10)$$

determinate de integrala

$$Q_{at} = \int_V \rho(r, t) dV. \quad (11)$$

Pentru a calcula această integrală găsim  $\rho(\mathbf{r}, t)$ . Conform ecuațiilor Maxwelle:

$$\rho = \nabla(\varepsilon \mathbf{E}); \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}; \quad \nabla \mathbf{j} = 0, \quad (12)$$

din care rezultă:

$$\rho = \nabla(\mathbf{j} \tau) = \mathbf{j} \cdot \nabla \tau, \quad (13)$$

unde  $\tau = \varepsilon / \sigma$  - este timpul de relaxare electrică a mediului;  $\mathbf{j}$  - densitatea curentului electric;  $\varepsilon$  - permitivitatea absolută a mediului;  $\sigma$  - conductibilitatea electrică specifică. După cum se observă în ecuația continuității s-a neglijat curentul de deplasare, adică derivata  $\partial(\varepsilon \mathbf{E}) / \partial t$  în comparație cu cel de conducție  $\sigma \mathbf{E}$ . Aceasta se justifică prin faptul că timpul de variație a câmpului electric (ore) este cu mult mai mare decât timpul de relaxare electrică a mediului  $\tau \sim 10^2$  sec., deși dependența de timp  $\mathbf{E}(t)$  rămâne (aproximație cvasi-staționară).

Ultima egalitate din (13) demonstrează, că pricina apariției sarcinilor electrice libere constă în străpungerea mediului neomogen în raport cu timpul de relaxare  $\tau$  de către curentul electric de conducție. Dacă substituim (13) în (11), găsim:

$$\begin{aligned} Q_{at} &= \int_V \nabla(\mathbf{j} \tau) \cdot dV = \int_{(S_s)} \tau_s \cdot j_s dS - \int_{(S_0)} \tau_s \cdot j_s dS = \\ &= \tau_s \int_{(S_s)} j_s dS - \tau_s \int_{(S_0)} j_s dS. \end{aligned} \quad (14)$$

Ținând cont, că integralele, ca consecință a ecuației continuității, coincid cu valoarea totală a curentului electric atmosferic  $I$  și notând:

$$\tau_s \equiv \tau(R_0, t); \quad \tau_* \equiv \tau(R_s, t),$$

din (14) pentru sarcina totală atmosferică găsim o relație foarte simplă (s-a ținut cont, că  $j_s < 0$ )

$$Q_{at} = (\tau_s - \tau_*) \cdot I > 0, \quad (15)$$

unde

$$I \equiv \int_{(S_0)} j_s \cdot dS = 4\pi R_0^2 \cdot j_s, \quad (16)$$

$I$  și  $j_s$  fiind valorile absolute ale curentului total și densității lui pe suprafața terestră, care, după cum se știe, ca direcție sunt orientați radial, iar relația cu intensitatea câmpului electric se dă prin formula

$$E_s = -j_s / \sigma_s; \quad (17)$$

indicii "s" pretutindeni simbolizează suprafața terestră. Densitatea de curent la distanța  $r$  de la centrul Pământului, conform ecuației continuității (12) în coordonate sferice se prezintă prin expresia:

$$j(r, t) = -j_s(t) \cdot \frac{R_0^2}{r^2} \quad (18)$$

Astfel, pentru sarcina totală fictivă repartizată obținem

$$Q' = -\lambda(\tau_s - \tau_*) \cdot I < 0. \quad (19)$$

Să revenim la al doilea termen în formula (6). Pentru determinarea sarcinii fictive  $Q_0''$  vom reieși din condiția (5), substituind în ea intensitatea câmpului electric:

$$\frac{Q' + Q_0''}{4\pi \varepsilon_s \cdot R_0^2} = E_s = -\frac{j_s}{\sigma_s}, \quad (20)$$

de unde rezultă

$$Q_0'' = -[\tau_s - \lambda(\tau_s - \tau_*)] \cdot I, \quad (21)$$

astfel, încât sarcina totală fictivă (6) devine egală cu

$$Q'' = -I \cdot \tau_s. \quad (22)$$

Această sarcină o posedă suprafața terestră. Substituind datele:  $\tau_s \approx 300$  s,  $I = 1800$  A [2, 3], găsim  $Q'' \approx 5,4 \cdot 10^5$  C - mărime cunoscută. Sarcina Terrei împreună cu cea a atmosferei este:

$$Q = Q'' + Q_{at} = -I \cdot \tau_s + (\tau_s - \tau_*) \cdot I \Leftrightarrow Q = -I \cdot \tau_*. \quad (23)$$

În straturile superioare atmosferice conductibilitatea electrică constituie mărimi de sute și mii ori mai mari decât la suprafața terestră, de aceea este de așteptat, că sarcina totală terestră împreună cu cea a atmosferei până la înălțimi  $\sim 10^2$  km poate constitui doar  $Q \sim -10^2$  C. La înălțimi mai mari conform formulei (22)  $Q \sim 0$ , de aceea Terra împreună cu atmosfera practic este electric neutră, pe când fără atmosferă sarcina e foarte mare:  $Q'' \approx 5,4 \cdot 10^5$  C. Potențialul respectiv e de

$$\phi'' = Q'' / (4\pi \varepsilon R_0) = 7,5 \cdot 10^8 \text{ V} = 750 \text{ MV}.$$

Rămâne de meditat, cum se repartizează acest enorm potențial, și pe cât este de real? Răspunsurile, sperăm să urmeze, probabil, după se va ține cont de nori și descărcările electrice, fulgere și spraituri.

**4.2 Câmpul electric atmosferic.** Acest câmp de asemenea se determină prin teorema Gauss

$$E(r) = \frac{Q'' + \tilde{Q}_{at}(r)}{4\pi \varepsilon r^2}, \quad (24)$$

$\tilde{Q}_{at}$  - sarcina cuprinsă în stratul cu grosimea variabilă  $h \equiv r - R_0$  și egală cu expresia (15), în care în loc de  $\tau_s$  va figura  $\tau(r, t)$ :

$$\tilde{Q}_{at} = [\tau_s - \tau(r, t)] \cdot I > 0.$$

Întrucât  $\tau$  descrește cu distanța  $r$ , atunci  $\tilde{Q}_{at}$  crește. Substituind (22) și această expresie în (24), găsim dependența intensității câmpului electric de conductibilitatea specifică  $\sigma(r, t)$  a aerului atmosferic:

$$E(r, t) = -\frac{j_s}{\sigma(r, t)} \cdot \frac{R_0^2}{r^2}, \quad (25)$$

unde s-a ținut cont de (18). În preajma scoarței terestre avem o dependență explicită de  $r$  foarte slabă, deoarece  $r \sim R_0$  și dependența de  $r$  se manifestă prin  $\sigma(r, t)$ :

$$E(r, t) \approx -\frac{j_s}{\sigma(r, t)}. \quad (26)$$

Se știe, conductibilitatea specifică crește cu înălțimea  $h$  după legea exponențială [1, 3]:

$$\sigma \approx \sigma_0(t) \cdot \exp(\alpha h), \quad (27)$$

de unde rezultă descreșterea conform exponentei a intensității câmpului electric:

$$E(h, t) = E_s(t) \cdot \exp(-\alpha h), \quad (28)$$

unde

$$E_s(t) \equiv j_s(t) / \sigma_0(t). \quad (29)$$

Dependențele (28), (29) sunt în concordanță cu datele experimentale, din care se determină și mărimea  $\alpha$ .

### 5. Variațiile unitare ale câmpului electric terestru

E cunoscut faptul [2] că intensitatea câmpului electric terestru atinge valoarea minimă la orele 4<sup>00</sup> și maximă – la 19<sup>00</sup> după Greenwich (ora Londrei). Analog, pe suprafața oceanică  $E_s$  este mai mare, decât pe continente. Iarna  $E_s$  este mai mare decât vara, iar noaptea – mai mare decât ziua. Aceste variații se numesc unitare, deoarece au loc simultan pe întregul glob [5]. Pare logic de presupus, că curentul total global (16) (vezi de asemenea și (14)) nu ar trebui să depindă esențial de mișcarea diurnă, sau cea planetară a Terrei. Doar curentul  $I$  conform formulelor (14), deduse în baza ecuații continuității, este același și în straturile superioare ale atmosferei, și la suprafața terestră (în modelul abordat, fără nori).

Atunci, și  $j_s$  trebuie să fie o mărime aproximativ fixă. Prin urmare, după cum reiese din formula (29), variațiile unitare, ce țin de mișcările menționate, ale globului terestru, necesită a fi explicate prin conductibilitatea specifică a aerului atmosferic. Și anume, în cazurile de creștere a intensității câmpului electric are loc micșorarea conductibilității aerului și invers.

A rămas de clarificat variațiile conductibilității electrice: la temperaturi mai joase și conductibilitatea este mai mică, ceea ce are loc noaptea și iarna. Bineînțeles, în realitate situația ține de mai mulți factori, mai cu seamă de umiditatea aerului. E știut că prezența vaporilor în aer diminuează conductibilitatea electrică (din cauza solvării ionilor cu molecule de vapori). Prin aceasta, probabil, se explică și faptul că deasupra oceanului intensitatea câmpului electric este mai sporită, decât pe continente, dat fiind că aerul maritim conține o cantitate mai mare de vapori, decât aerul continental. De aici rezultă că la ora 19<sup>00</sup> (ora Londrei) atmosfera conține o cantitate maximă de vapori, ceea ce, la rândul său, va avea loc dacă suprafața oceanică, supusă radiației solare (cu un anumit decalaj de faze) la ora menționată, este maximă. Și viceversa – la ora 4<sup>00</sup>. Se creează impresia, că mersul de zi și noapte a dependenței  $E(t)$  corelează cu  $S(t)$ , unde  $S$  este suprafața oceanică iluminată de Soare la momentul dat  $t$ .

### 6. Despre descărcările electrice atmosferice

Începând cu valorile globale minime ale intensității câmpului electric  $E_{\min}$  (4<sup>00</sup>), când suprafața oceanică, supusă radiației solare este minimă, pe parcurs de zi are loc creșterea acestei mărimi până la valoarea maximă, când suprafața menționată devine maximă, deci și  $E = E_{\max}$  (19<sup>00</sup>, dat fiind  $\sigma = \sigma_{\min}$ ). În aceste condiții activitatea electrică atmosferică devine maximă și au loc cele mai intense descărcări electrice sub formă de fulger la pământ, iar sub formă de spraituri către ionosferă. Specificul spraiturilor se explică prin aceea, că ele, spre deosebire de fulger, au loc la presiuni mult mai joase, de aceea au și dimensiuni mult mai pronunțate. Astfel, în linii generale au fost explicate majoritatea fenomenelor referitor la electricitatea atmosferică în baza modelului atmosferei fără nori, ceea ce, pe de altă parte, servește drept argument în favoarea ipotezei că câmpul electric terestru este condiționat de sarcinile reale din preajma Terrei în ansamblu cu imaginile lor electrice, adică cu sarcinile, induse în scoarța terestră.

### 7. Bibliografie

- [1]. Frenchely I. *Teoria iavlenii atmosferного электричества*. KomKniga. Moskva. 2007, 160.
- [2]. Feynman R., Leyton R., Sānds M. *Feinmanovskie lectii po fizike*. Izd-vo «Mir», 5b, 1977, 300.
- [3]. Imenitov I., Shifrin K. *Sovremennoe sostoianie elektricestva*. *Uspehi fiz. nauk*. 76, 4, 593, 1962.
- [4]. Erashov V. (2013). *Elektriceskoe pole Zemli*. <http://www.proza.ru/2012/02/01/515>
- [5]. Kuznetsov V.V. (2013). *Atmosfernoe elektriceskoe pole: fakty, nabludeniia, korreleatsii, modeli*. IGF SO RAN Novosibirsk <http://vvkuz.ru/books/2-03.pdf>
- [6]. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnyh sred*. M., Fizmatgiz, 1959, 532.