

PRINCIPIUL REVERSIBILITĂȚII TRASEULUI RAZELOR DE LUMINĂ ÎN PROBLEME DE OPTICĂ GEOMETRICĂ

Conf. univ. dr. Mihai MARINCIUC,
conf. univ. dr. Spiridon RUSU
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău

La baza opticii geometrice se află principiul propagării rectilinii a luminii, legile reflexiei și refracției luminii, precum și principiul independenței propagării fasciculelor de lumină. La formularea lor se admite că lumina se propagă într-un sens anumit. Care este situația în cazul în care lumina s-ar propaga în sens invers? Să analizăm fiecare lege în parte.

În conformitate cu principiul propagării rectilinii a luminii raza care s-a propagat în direcția AB (fig. 1, a) trece și prin punctul C situat pe dreapta AB. Evident, raza CB care se propagă în sens invers față de prima (fig. 1, b) trece prin punctul A situat pe aceeași dreaptă.

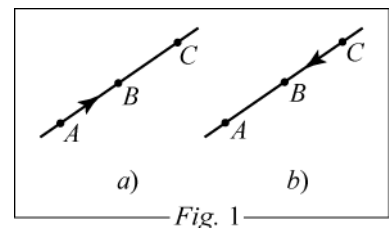


Fig. 1

Să analizăm reflexia luminii. Conform legilor acestui fenomen raza reflectată OB se află în același plan cu raza incidentă AO și normala NO în punctul de incidență O al suprafeței reflectoare, iar unghiul de reflexie i' este egal cu unghiul de incidență i (fig. 2, a). În baza acestor legi raza incidentă BO după reflexie se propagă în direcția OA (fig. 2, b), adică principiul reversibilității luminii se respectă și în cazul reflexiei

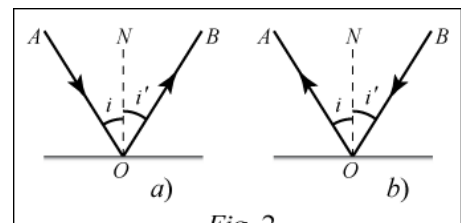


Fig. 2

luminii: la inversarea sensului razei reflectate când aceasta devine incidentă, noua rază reflectată se propagă în sens invers față de sensul fostei raze incidente.

O situație similară are loc și la refracția luminii. Raza incidentă AO pe suprafața de separație a două medii având indicii absoluți de refracție n_1 și n_2 , normala NO în punctul de incidență O al suprafeței de separație și raza refractată OB se află în același plan, iar unghiul de incidență i și cel de refracție r (fig. 3, a) satisfac legea

sinusurilor $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$. Dacă se inversează raza refractată,

adică lumina se propagă în sensul BO, atunci unghiul r devine unghi de incidență, iar unghiul i devine unghi de refracție (fig. 3, b) conform legii sinusurilor care în cazul dat ia forma:

$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{n_1}{n_2}$. Conchidem că și legea refracției luminii se află în

concordanță cu principiul reversibilității traseului razelor de lumină.

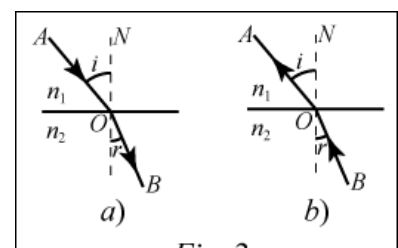


Fig. 3

În baza celor expuse mai sus se poate afirma că **dacă în calea unei raze ce se propagă într-un sistem optic, care conține oglinzi, lentile și prisme, se plasează o oglindă plană perpendiculară pe rază, astfel încât aceasta să se reflecte strict înapoi, atunci raza reflectată va parcurge întreg sistemul în sens invers și se va întoarce la sursă.**

Această afirmație poate fi considerată o formulare generală a principiului reversibilității traseului razelor de lumină. Menționăm că principiul rămâne valabil și la propagarea luminii în medii transparente neomogene, ale căror indice de refracție variază continuu în spațiu.

Să analizăm în continuare câteva probleme de optică geometrică, a căror rezolvare

necesită utilizarea principiului pus aici în discuție.

Problema 1. Poate oare fi construit un dispozitiv optic ce ar conține oglinzi, lentile și prisme, astfel încât din cei doi observatori care se privesc prin el unul pe altul, doar unul să-l vadă pe celălalt? Ilustrați răspunsul cu un exemplu concret.

Rezolvare. Pornind de la principiul reversibilității razelor de lumină, conchidem că un asemenea dispozitiv nu poate fi construit, prin dispozitivul optic se poate privi în ambele sensuri. Cel mai simplu exemplu concret îl prezintă binoclul – prin el putem privi în ambele sensuri. Evident, imaginile observate sunt diferite. Într-un caz imaginea este mărită, în al doilea – micșorată.

Problema 2. Un fascicul de raze paralele cade pe o oglindă sferică, paralel cu axa optică principală a ei. Construiți mersul razelor în oglinda concavă și cea convexă și, utilizând principiul reversibilității razelor de lumină, propuneți unele aplicații ale acestor oglinzi.

Rezolvare. Considerăm o oglindă concavă (fig. 4, a) având ca centru punctul O și ca vârf punctul V . Normala în punctul de incidență B a razei AB pe oglindă are direcția razei OB . Razele reflectate de oglindă intersectează axa optică principală OV în punctul F , focarul real al oglinzii concave.

Să ne imaginăm o sursă punctiformă de lumină situată în focarul F al oglinzii concave (fig. 4, b). Pentru a construi traseul razelor reflectate vom utiliza proprietatea de reversibilitate a razelor de lumină. Razele care cad pe oglindă paralel cu axa optică principală trec după reflexie prin focar, prin urmare razele care ies din focar vor forma după reflexia de la oglindă un fascicul de raze paralele.

Posibilitatea de a obține cu ajutorul oglinzilor concave fascicule de raze paralele de lumină se află la baza funcționării diferitelor proiectoare, faruri maritime, faruri de automobil ș.a.

Vom considera o oglindă sferică convexă. Dreapta care trece prin centrul O al sferei din care este decupată oglinda și vârful ei V este axa optică principală (fig. 5, a). Fie raza incidentă AB paralelă cu axa optică principală. Normala suprafeței sferice are direcția OB a acesteia. Raza reflectată formează cu normala un unghi egal cu unghiul de incidență i . Prelungirea razei reflectate intersectează axa optică principală într-un punct F . Se poate demonstra că în acest punct se intersectează prelungirile tuturor razelor reflectate în cazul căderii pe oglindă a unui fascicul îngust de raze paralele cu axa optică principală. Punctul F este numit focar virtual, deoarece în el se intersectează nu razele reflectate, ci prelungirile acestora.

Fasciculul paralel, după reflexia în oglinda convexă, devine divergent (fig. 5, a). Dacă însă pe oglinda convexă cade un fascicul de raze care ar converge în focar, razele reflectate de la oglindă, datorită reversibilității lor, formează un fascicul de raze paralele (fig. 5, b). Astfel,

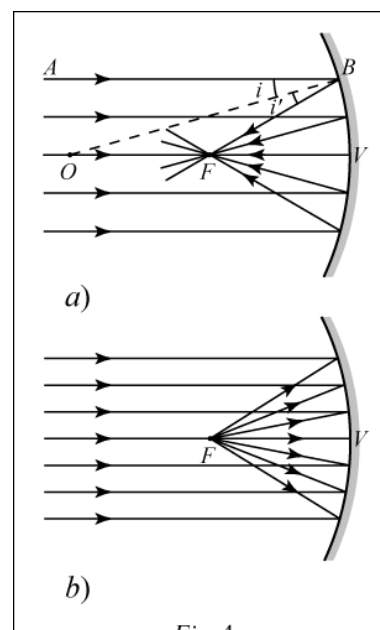


Fig. 4

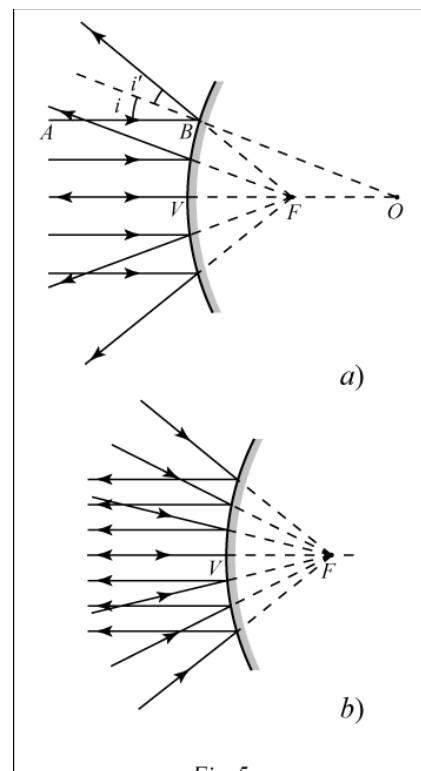
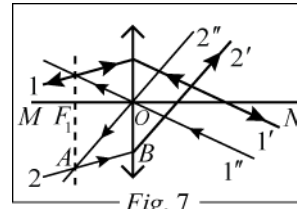
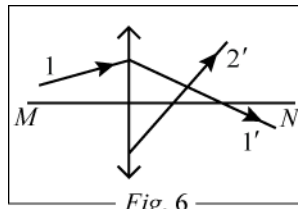


Fig. 5

oglinzile convexe largesc câmpul de vedere. În acest scop, ele se folosesc ca oglinzi retrovizoare la diferite mijloace de transport.

Problema 3. Cunoscând mersul razei 1, construieți mersul razei 2 până la lentilă (fig. 6).

Rezolvare. Pentru a construi mersul razei 1 până la lentilă aplicăm principiul reversibilității razelor de lumină. Dacă inversăm sensul razei 1', după refracția în lentilă ea va avea sens opus razei 1 (fig. 7). Trasăm raza 1'' paralelă cu 1' și trecând prin centrul optic O al lentilei. Aceasta nu-și modifică direcția și intersectează raza 1 în planul focarului din față F_1 al lentilei.



Trasăm raza 2'' paralelă cu 2' și trecând prin centrul optic O. Aceasta nu-și modifică direcția și intersectează planul focal în punctul A. Prin acest punct trece raza incidentă 2 (AB), care după refracția în lentilă are direcția 2'.

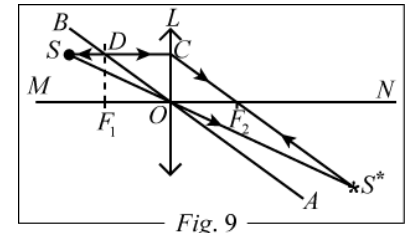
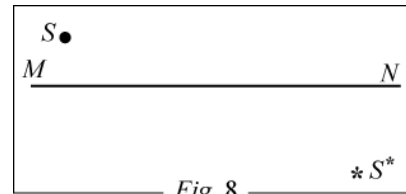
Problema 4. În figura 8 este reprezentată axa optică principală a unei lentile, obiectul S și imaginea lui S*.

a) Determinați tipul lentilei.

b) Stabiliți prin construcție poziția lentilei și a focarelor ei.

Rezolvare: a) Imaginea S* și obiectul S se află de părți opuse ale axei optice principale MN, lentila este convergentă, imaginea în ea fiind reală și răsturnată.

b) Imaginea S* și obiectul S sânt situate pe una din axele optice secundare. Axa secundară SS* intersectează axa optică principală MN în punctul O, care este centrul optic al lentilei. Lentila L este perpendiculară pe MN (fig. 9). Raza SC paralelă cu MN trece prin imaginea S* și intersectează axa optică principală prin focarul din spate F_2 .

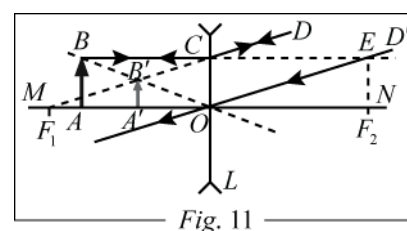
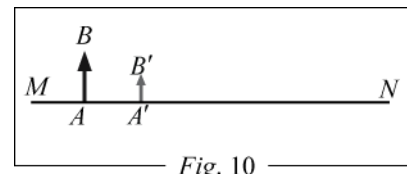


Pentru a determina poziția focarului din față F_1 pornim de la principiul reversibilității razelor de lumină: raza S*C după refracție se propagă în direcția CS. Trasăm raza optică secundară AB paralelă cu raza S*C. Raza secundară AB nu se refractă și intersectează raza SC în planul focal al lentilei (punctul D). Coborâm perpendiculara din D pe axa MN. Punctul de intersecție F_1 este focarul din față al lentilei L.

Problema 5. Indicați poziția lentilei și a focarelor ei, dacă se cunoaște poziția și înălțimea obiectului AB și poziția și înălțimea imaginii A'B' (fig. 10). Determinați poziția lentilei și a focarelor ei.

Rezolvare: Imaginea A'B' este dreaptă și mai mică decât obiectul AB (fig. 10), deci imaginea este virtuală, iar lentila – divergentă. Punctele B și B' se află pe una și aceeași axă optică secundară, care intersectează axa optică principală MN în centrul optic O al lentilei. Lentila este perpendiculară pe MN (fig. 11).

Pentru a determina pozițiile focarelor ei, trasăm



raza BC paralelă cu MN. Ea se refractă astfel încât prelungirea razei refractate trece prin imaginea B' a punctului B. La intersecția prelungirii cu MN obținem poziția F_1 a focarului din față al lentilei.

Pentru a determina poziția focarului din spate F_2 , pornim de la principiul reversibilității razelor de lumină: raza incidentă DC după refracție se propagă în direcția CB. Trasăm raza D'O paralelă cu raza DC. Ea traversează lentila fără a-și modifica direcția. Razele D'O și CB nu se intersectează. Prelungirile lor se intersectează în punctul E, situat în planul focal. Coborând o perpendiculară din E pe MN obținem la intersecție punctul F_2 – focarul din spate al lentilei divergente L.

Problema 6. Într-o cutie neagră se află un dispozitiv care transformă razele 1 și 2 ce pătrund în el într-un fascicul de raze paralele $1'$ și $2'$ (fig. 12). Stabiliți ce prezintă dispozitivul optic și determinați pozițiile elementelor acestuia.

Rezolvare: Inversăm traseul razelor. Stabilim că dispozitivul optic din cutia neagră transformă fasciculul de raze paralele într-un fascicul divergent (fig. 13). Conchidem că

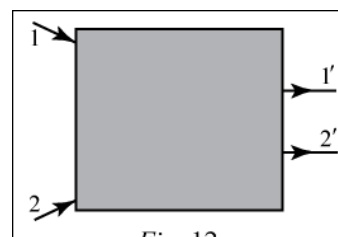


Fig. 12

în cutie se află o lentilă divergentă. În aproximația lentilei subțiri, refracția are loc în planul lentilei. Prelungind razele $1'$ și 1 până la punctul de intersecție al lor și, respectiv, $2'$ și 2 , determinăm poziția planului lentilei divergente. Punctul de intersecție al prelungirilor razelor divergente 1 și 2 este focarul F_1 al lentilei. Dreapta care trece prin F_1 paralel cu razele incidente $1'$ și $2'$ este axa optică principală MN a lentilei, iar punctul de intersecție al ei cu planul lentilei este centrul optic O.

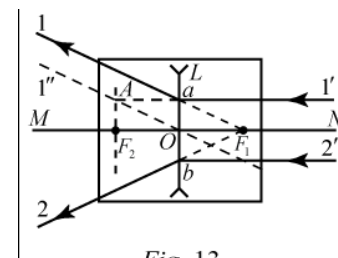


Fig. 13

Pentru a determina poziția focarului al doilea considerăm raza incidentă 1 și o rază $1''$ paralelă cu ea și trecând prin centrul optic al lentilei (fig. 13). Această rază nu se refractă și nu se intersectează cu raza refractată $1'$. Prelungirile lor însă se intersectează în punctul A din planul focal al lentilei. Coborând din acesta perpendiculara pe axa optică principală MN obținem la intersecția cu ea punctul F_2 – al doilea focar al lentilei divergente. Din figură observăm egalitatea distanțelor $F_2O = OF_1$.

Problema 7. Să se stabilească ce dispozitiv optic se află în interiorul unei cutii negre, dacă raza ce pătrunde în cutie în direcția 1 iese din ea în direcția $1'$, iar cea care pătrunde în direcția 2 – iese în direcția $2'$ (fig. 14).

Rezolvare: Pentru a stabili natura dispozitivului optic din cutia neagră inversăm traseul razelor emergente și a celor incidente (fig. 15). Observăm că fasciculul paralel $1'$ și $2'$ este transformat într-un fascicul divergent în care razele sunt schimbate cu pozițiile. Aceasta se poate realiza numai dacă în cutia neagră se află o lentilă convergentă care transformă fasciculul de raze paralele într-un fascicul care converge în focarul ei, după care devine fascicul divergent. Prelungim razele 1 și $1'$ până la intersecția lor, apoi și razele 2 și $2'$. Aceste puncte de intersecție a și b determină poziția lentilei convergente, iar punctul de intersecție a razelor $a2$ și $b1$ este focarul F_1 al ei. Dreapta ce trece prin focarul F_1 paralel cu razele $1'$ și $2'$ este axa optică principală MN a lentilei, iar punctul de intersecție al ei cu planul lentilei este centrul optic O.

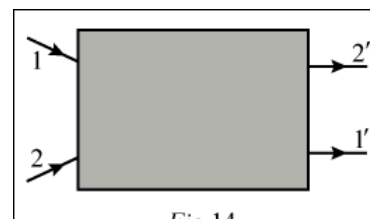


Fig. 14

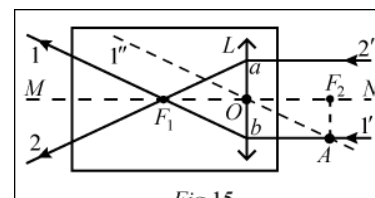


Fig. 15

Pentru a determina poziția celui de al doilea focar inversăm din nou mersul razelor și trasăm o rază $1''$ care trece prin centrul optic și este paralelă cu raza incidentă 1. Ea se

intersectează cu raza refractată $1'$ în punctul A situat în planul focal din spate al lentilei. Coborând din A perpendiculara pe axa MN obținem punctul de intersecție F_2 – al doilea focar al lentilei convergente.

Problema 8. Secțiunea transversală a unei prisme drepte din sticlă este un triunghi echilateral. Unghiul de incidență al unei raze de lumină de culoare violetă pe o față laterală a prisme $i_v = 60^\circ$. Pentru ce valoare a unghiului de incidență a unei raze de lumină de culoare roșie pe aceeași față a prisme, razele emergente sunt paralele? Indicii de refracție ai sticlei pentru lumina de cele două culori sunt $n_v = 1,531$ și $n_r = 1,510$.

Rezolvare: Reprezentăm secțiunea triunghiulară a prisme (*fig. 16*), normala în punctul de incidență a razei de lumină de culoare violetă, unghiul de incidență al ei $i_v = 60^\circ$ și unghiul de refracție r_v . În conformitate cu legea refracției luminii, $\frac{\sin i_v}{\sin r_v} = n_v$, de unde $\sin r_v = \frac{\sin i_v}{n_v}$. Substituind valorile numerice, calculăm $\sin r_v = 0,566$ și $r_v \approx 34^\circ 20'$. Trasăm raza refractată până la intersecția cu cealaltă față a prisme și construim normala în acest punct.

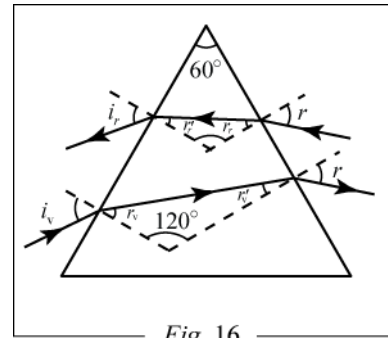


Fig. 16

Din figură determinăm unghiul de incidență pe această față: $i_v' \approx 25^\circ 40'$. Notăm cu r unghiul de refracție respectiv. Avem $\frac{\sin i_v'}{\sin r} = \frac{1}{n_v}$, deci $\sin r = n_v \cdot \sin i_v'$; $\sin r = 0,663$ și $r \approx 41^\circ 30'$.

Pentru a determina valoarea unghiului de incidență a razei de lumină roșie la care razele emergente sunt paralele, folosim principiul reversibilității traseului razelor. Considerăm o rază de lumină roșie paralelă cu raza emergentă de lumină violetă, notăm unghiul de refracție al ei cu r_r . Avem $\frac{\sin r_r}{\sin r_r'} = n_r$ și $\sin r_r = \frac{\sin r_r'}{n_r}$; $\sin r_r = 0,439$ și $r_r \approx 26^\circ$. Unghiul de incidență al acestei raze pe fața a doua a prisme, după cum rezultă din figură, este $r_r' \approx 34^\circ$. Notăm cu i_r unghiul de refracție la ieșirea acestei raze în aer. Avem $\frac{\sin r_r'}{\sin i_r} = \frac{1}{n_r}$, prin urmare

$$\sin i_r = n_r \sin r_r', \sin i_r = 0,844 \text{ și } i_r \approx 57^\circ 30'$$

Inversând traseul razei de lumină roșie, conchidem că la unghiul de incidență pentru această lumină $i_r = 57^\circ 30'$ raza emergentă respectivă este paralelă cu raza emergentă de lumină violetă la unghiul de incidență $i_v = 60^\circ$.

PROBLEME PROPUSE PENTRU REZOLVARE

1. Determinați poziția focarelor unei lentile convergente, dacă se cunoaște poziția axei optice principale MN și mersul unei raze arbitrare (*fig. 17*).
2. În *figura 18* este reprezentată axa optică principală MN și mersul unei raze arbitrare printr-o lentilă divergentă. Determinați prin construcție poziția focarelor lentilei.
3. În arhiva lui Snellius a fost descoperit un manuscris în care se afla o schemă a mersului razelor de lumină printr-o lentilă

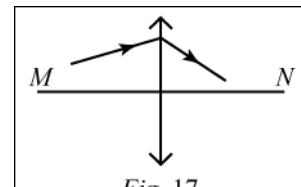


Fig. 17

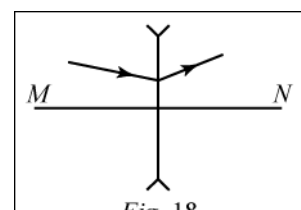
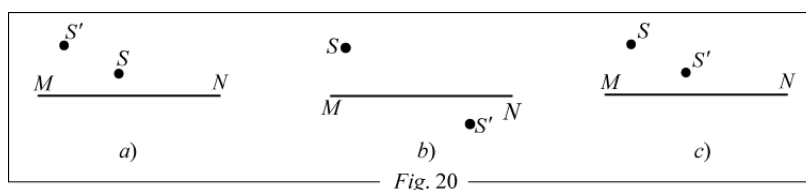
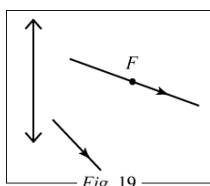


Fig. 18

subțire. Din cauza timpului cerneala s-a decolorat și pe desen au rămas vizibile doar două raze care au trecut prin lentilă, poziția lentilei și cea a focarului din spate (fig. 19). Determinați prin construcție poziția punctului luminos.



4. În figura 20, $a - c$ este reprezentată axa optică principală MN a unei lentile subțiri, obiectul S și imaginea lui S' în lentilă. Determinați prin construcție locul unde se află centrul optic al lentilei și focarele ei. Stabiliți tipul lentilei (convergentă sau divergentă) și tipul imaginii (reală sau virtuală).

BIBLIOGRAFIE

1. Marinciuc M., Ghețu V. Fizică. Manual pentru clasa a 8-a. Chișinău, Știința, 2003.
2. Marinciuc M., Rusu S. Fizică. Manual pentru clasa a 12-a. (Profil real, profil umanist). Chișinău, Știința, 2006.
3. Marinciuc M., Ghețu V., Miglei M., Potlog M. Fizică. Culegere de probleme. Clasele 8 – 9. Chișinău, Știința, 2004.
4. Marinciuc M., Rusu S., Scutelnic I., Ghețu V., Homenco A., Miglei M. Fizică. Culegere de probleme. Clasele 10 – 12. Chișinău, Lyceum, 2008.
5. Marinciuc M. Fizica. Examenele de bacalaureat. Subiecte rezolvate și comentate. Chișinău, Integritas, 2008.
6. Бажанский И. И., Казаков К. Ю. Приморские олимпиады школьников по физике (1998 – 2002 гг.). Владивосток, Издательство Дальневосточного университета, 2003.
7. Гельфгат И. М., Генденштейн Л. Э., Кирик Л. А. 1001 задача по физике с решениями. Харьков, ИМП «Рубикон», 1997.

Primit la redacție: 9 iunie 2010