

**ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების მათემატიკური
მოდელირების შესახებ**

დემეტრაშვილი დ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

შესავალი

ნიადაგი, რომელიც ბუნებრივი გარემოს ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ობიექტია, მიწის ქერქის ზედა თხელი ფენაა, რომელიც უზრუნველყოფს მცენარეებს მკვებავი ნივთიერებებითა და ტენით. N ნიადაგის ფორმირება მიმდინარეობს ხანგრძლივად მთის ქანებზე და მისი სისქე სხვადასხვა ადგილებში სხვადასხვაა, იგი მერყეობს 2-3 მეტრიდან რამოდენიმე სანტიმეტრამდე. ნიადაგი წარმოადგენს მრავალფაზურ კაპილარულ-ფოროვან დისპერსიულ სისტემას, სადაც ნივთიერება იმყოფება მყარ, თხევად და აიროვან მდგომარეობაში [1-3]. ფიზიკურ-ქიმიური და ბიოლოგიური პროცესების მიმდინარეობის თვალსაზრისით იგი მეტად რთული ბუნებრივი ობიექტია, რომლის შემადგენელი კომპონენტებია მინერალური ნაწილაკები, ძირითადად მცენარეული წარმოშობის ორგანული ნივთიერება, ნიადაგის წყალი მასში გახსნილი მინერალური და ორგანული ნაერთებით, ნიადაგის ჰაერი და ნიადაგში მცხოვრები ცოცხალი ორგანიზმები.

ბოლო ათეულ წლებში ადამიანის სამეურნეო საქმიანობის გააქტიურებამ სერიოზული ეკოლოგიური პრობლემები წარმოშვა, რაც უმთავრესად დაკავშირებულია მყარ, თხევად და აიროვან დამაჭუჭყიანებელ ნივთიერებათა ზრდასთან ბუნებრივი გარემოს ობიექტებში – ატმოსფეროში, ჰიდროსფეროში და ნიადაგში [4-7]. ეკოლოგიური უსაფრთხოების საკითხი XXI საუკუნის ერთ-ერთ უმთავრეს გამოწვევად იქცა. განსაკუთრებით დიდ საშიშროებას უქადის ადამიანთა ჯანმრთელობას სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების ნიადაგების დაჭუჭყიანება ანთროპოგენური წარმოშობის მყარი და თხევადი ნივთიერებებით. ატმოსფეროდან მიწის ზედაპირზე დალექილი მძიმე ლითონები, რადიოიზოტოპები და სხვა დამაჭუჭყიანებელი ნივთიერებები დროთა განმავლობაში გადაიტანება ნიადაგის ქვედა ფენებში და ხდება ამ ნივთიერებათა სორბცია მცენარეთა ფესვების მიერ, რასაც ადამიანი საკვებად გამოიყენებს. ამგვარად, ნიადაგების დაჭუჭყიანება მავნე ინგრედიენტებით უშუალოდ აისახება ადამიანის ცხოველქმედებასა და ჯანმრთელობაზე.

ტოქსიკური მძიმე ლითონებით (Pb, Cu, Ni, Mn და სხვ.) ნიადაგის დაჭუჭყიანების ძირითადი წყაროა ავტოტრანსპორტი და ზოგიერთი საწარმოო ობიექტი, რომელთა გამონაბოლქვში არის ტყვია და სხვა მძიმე მეტალები [8-10]. გარემოს დაბინძურების მნიშვნელოვან წყაროს შეიძლება წარმოადგენდეს აგრეთვე სტიქიური ნაგავსაყრელები, რომლებიც, სამწუხაროდ, არცთუ იშვიათად გვხვდება საქართველოს ტერიტორიაზე [7].

დამაჭუჭყიანებელ ნივთიერებათა გავრცელება ნიადაგში რთული პროცესია, რომელიც პირდაპირ კავშირშია სითბოსა და ტენის გადატანის პროცესებთან. მისი შესწავლა, რაოდენობრივი შეფასება და პროგნოზი შესაძლებელია მათემატიკური მოდელირების მეთოდების გამოყენებით. დღეისათვის შემუშავებულია მთელი რიგი მათემატიკური მოდელებისა, რომლებიც გარკვეული მიახლოებით აღწერენ ნიადაგში მყარი და თხევადი დამაჭუჭყიანებელი ნივთიერებების გადატანის პროცესებს [11-18].

წინამდებარე სტატიაში განიხილება ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების პრობლემა თბოგადაცემის პროცესებთან კავშირში, წარმოდგენილია ნიადაგში მყარი მინარევის ვერტიკალზე მიგრაციის არასტაციონარული ერთგანზომილებიანი მოდელი და გამარტივებულ შემთხვევაში მოდელირებულია ნიადაგის ზედაპირზე დალექილი მინარევის ქვედა ფენებში გავრცელების პროცესი ტყვიის მაგალითზე.

ამოცანის ფორმულირება

ჩამოვყალიბოთ ნიადაგის სიღრმეში მყარი დამაჭუჭყიანებელი მინარევის გავრცელების ამოცანა, თუ ცნობილია მისი კონცენტრაცია ნიადაგის ზედაპირზე. მძიმე მეტალებისა და სხვა მინარევთა მიგრაციულ პროცესებში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ნიადაგის თხევად ფაზას- წყალს მასში გახსნილი მინერალური და ორგანული ნაერთებით, რომელიც თამამობს სატრანსპორტო

ფუნქციის როლს არამარტო მკვებავი ნივთიერებების, არამედ უმცირესი მყარი ნაწილაკების ნიადაგის ქვედა ფენებში გასავრცელებლად. ეს პროცესი აღწეროთ შემდეგი დიფერენციალური განტოლების საფუძველზე (z ღერძი მიმართულია დედამიწის ზედაპირიდან ვერტიკალურად ქვემოთ):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \varphi (w_G + w_w)}{\partial z} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1)$$

შემდეგი სასაზღვრო და საწყისი პირობების გამოყენებით

$$\begin{aligned} \varphi &= \tilde{\varphi}, \quad \text{როცა } z = 0, \\ -D \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0, \quad \text{როცა } z = H, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi_0 \quad \text{როცა } t = 0. \quad (3)$$

აქ φ მინარევის მასური კონცენტრაციაა (მგ/კგ), D მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტი, w_w ნიადაგის ფორებში წყლის გადაადგილების სიჩქარეა, σ პარამეტრია, რომელიც განსაზღვრავს მინარევის სორბციის ინტენსივობას მცენარეთა ფესვების მიერ. H ნიადაგის სიღრმეა. w_G ნაწილაკების გრავიტაციული დალექვის სიჩქარეა, რომელსაც განვსაზღვრავთ სტოქსის ფორმულის საშუალებით სფერული ფორმის ნაწილაკებისათვის

$$w_G = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_1 - \rho_w}{\eta}, \quad (4)$$

სადაც r ნაწილაკის რადიუსია, g თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა; ρ_1 და ρ_w ნაწილაკისა და წყლის სიმკვრივეებია, შესაბამისად; η წყლის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, რომელიც ტემპერატურის ფუნქციაა და მას განვსაზღვრავთ პუაზეილის ფორმულის საშუალებით

$$\eta(T) = 0.000183 / (1 + 0.0337T^0(z,t) + 0.000221T^{0.2}(z,t)). \quad (5)$$

აქ T^0 ნიადაგის ტემპერატურაა, რომელიც დროისა და ვერტიკალური კოორდინატის ფუნქციაა. ზოგადი მოსაზრებიდან გამომდინარე, შეიძლება მივიღოთ, რომ მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტი

$$D = \alpha \eta(z,t) / \rho_w,$$

სადაც α გარკვეული კოეფიციენტი, რომელიც ნიადაგის ტენიანობის ფუნქციად შეიძლება მივიჩნიოთ.

როგორც ამოცანის ფორმულირებიდან ჩანს, მოდელში მინარევის მიგრაცია ნიადაგში განპირობებულია ადვექციით ნიადაგის წყლის მიერ, გრავიტაციული სედიმენტაციით, მოლეკულური დიფუზიითა და მინარევის სორბციით მცენარეთა ფესვების მიერ. ამოცანის დასმიდან ცხადია, რომ მინარევის გავრცელების ამოცანის სრულფასოვანი გადაჭრისათვის საჭიროა ეს პრობლემა განხილულ იქნას ნიადაგში სითბოსა და ტენის გადატანის პროცესებთან კავშირში. მმოცემულ სტატიაში შემოვიფარგლებით ნიადაგის ტემპერატურული რეჟიმის განსაზღვრის მეთოდის აღწერით.

ნიადაგის ტემპერატურული ველის განსაზღვრა

ნიადაგის ტემპერატურული რეჟიმის ცოდნა ერთ-ერთი ფაქტორია მინარევის გავრცელების პროცესის საიმედო მოდელირებისათვის, რადგანაც თერმული ველი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ნიადაგის თხევადი ფაზის სიბლანტისა და მინარევის დიფუზიის კოეფიციენტებზე. ამგვარად, ნიადაგში მინარევის გავრცელების ამოცანა მოიცავს ნიადაგის სითბური რეჟიმის

ამოცანასაც, რომლის სრულფასოვანი გადაწყვეტა სერიოზულ სიძნელეებთანაა დაკავშირებული. იმის გამო, რომ ნიადაგი წარმოადგენს მრავალფაზურ კაპილარულ-ფოროვან სისტემას, მასში სითბოს გადაცემის პროცესი ერთდროულად ხორციელდება რამოდენიმე მექანიზმით, კერძოდ, ნიადაგის მყარ ფაზაში მოლეკულური სითბოგამტარობით, გამოსხივებით და ნიადაგის თხევად და აირად ფაზებში - ძირითადად კონვექციით. [3]–ის თანახმად, ამ სიძნელის გადალახვა შესაძლებელია, თუ ნიადაგს განვიხილავთ როგორც კვაზიერთგვაროვან სისტემას, რომლის თბოფიზიკური პარამეტრები (მოცულობითი სითბოტევადობის, ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტები) წარმოადგენენ ეფექტურ მახასიათებლებს, რომლებიც მთლიანობაში აღწერენ ზემოთ ჩამოთვლილ მექანიზმებს. ეს იმას ნიშნავს, რომ ნიადაგის კვაზიერთგვაროვანი სისტემა თბოფიზიკური პარამეტრების ეფექტური მნიშვნელობებით ექვივალენტურია რეალური მრავალფაზიანი სისტემისა შესაბამისი თბოფიზიკური მახასიათებლებით.

ნიადაგის თერმული რეჟიმის განსაზღვრა კიდევ უფრო რთულდება იმითაც, რომ რეალურ ბუნებრივ პირობებში ნიადაგის თერმული რეჟიმის ფორმირება პირდაპირ კავშირშია ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის თერმულ რეჟიმთან, ეს უკანასკნელი კი დაკავშირებულია ატმოსფეროს სხვა პარამეტრებთან – ქარისა და ღრუბლიანობის ველთან, მზის რადიაციასთან და სხვ. ამიტომ, ნიადაგში ტემპერატურული ველის განსაზღვრის ამოცანის სრული ფორმულირება მოითხოვს ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის განტოლებათა სისტემისა და ნიადაგში სითბოს გადატანის განტოლებათა ერთობლივ განხილვას სითბური ბალანსის განტოლების ჩართვის გზით ატმოსფერო-ნიადაგის საზღვარზე. ასეთი სრული სახით ამოცანის რეალიზაციისათვის შესაძლებელია [19-21]-ში შემოთავაზებული ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენა – ნიადაგის რიცხვითი მოდელის გამოყენება გარკვეული მოდიფიკაციის შემდეგ. მომავალში შესაძლებელია აგრეთვე, აღნიშნულ მოდელში ცალკეული ბლოკის სახით ჩაირთოს ატმოსფეროსა და ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების პროცესის აღმწერი განტოლებები შესაბამისი სასაზღვრო პირობებით ატმოსფერო-ნიადაგის საზღვარზე.

წინამდებარე სტატიაში შემოვიფარგლებით მხოლოდ ნიადაგის თერმული რეჟიმის განხილვით მის ზედაპირზე ტემპერატურის, როგორც დროის ცნობილი ფუნქციის მოცემით.

ამგვარად, ნიადაგში განიხილება მოლეკულური სითბოგამტარობის განტოლება

$$C(z) \frac{\partial T'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda(z) \frac{\partial T'}{\partial z}, \quad (6)$$

$$T(z, t) = T_0(z) + T'(z, t),$$

სადაც T_0 საშუალო დღე-ღამური ტემპერატურაა, T' ტემპერატურის გადახრაა საშუალო დღე-ღამური მნიშვნელობიდან, C ეფექტური მოცულობითი სითბოტევადობის კოეფიციენტი, ხოლო λ ეფექტური თბოგამტარობის კოეფიციენტი. [2] – ის თანახმად ამ სიდიდეთა ცვლილება სიღრმის მიხედვით შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგი ექსპონენციალური კანონით

$$C(z) = C_1 e^{-\beta(1-z/h)}, \quad 0 \leq z \leq h, \quad (7)$$

$$\lambda(z) = \lambda_1 e^{-\beta(1-z/h)}, \quad 0 \leq z \leq h,$$

$$C = C_1 \quad z \geq h,$$

$$\lambda = \lambda_1 \quad z \geq h, \quad (8)$$

სადაც h გარკვეული სიღრმეა ნიადაგში.

(6) განტოლება (7) და (8) ტოლობების გათვალისწინებით ამოიხსნება შემდეგი საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით

$$\begin{aligned} T'(0, t) &= A_0 \sin(2\pi/T_d t), & z=0, \\ T' &= 0, & z=H \\ T' &= 0, & t=0. \end{aligned} \quad (9)$$

Аჟ A_0 ნიადაგის ზედაპირის ტემპერატურის დღე-ღამური რხევების ამპლიტუდაა, ხოლო T_d დღე-ღამური რხევების პერიოდია (24 სთ).

C და λ კოეფიციენტების სიღრმის მიხედვით მუდმივობის შემთხვევაში (6) განტოლების ანალიზურ ამონახსნს (9)–ის გათვალისწინებით შემდეგი სახე აქვს (სრული ტემპერატურისათვის) [3]

$$T(z,t) = T_0 + A_0 e^{-z\sqrt{\pi/aT_d}} \sin\left[2\pi/T_d (t - z/2\sqrt{T_d/a\pi})\right], \quad (10)$$

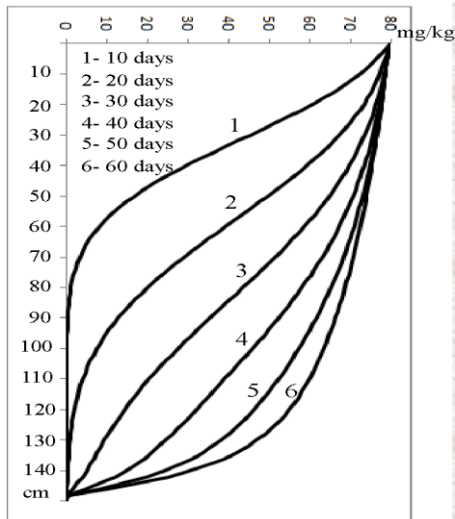
სადაც $a = \lambda/C$ ნიადაგის ტემპერატურაგამტარებლობის კოეფიციენტია.

გამოთვლითი ექსპერიმენტი

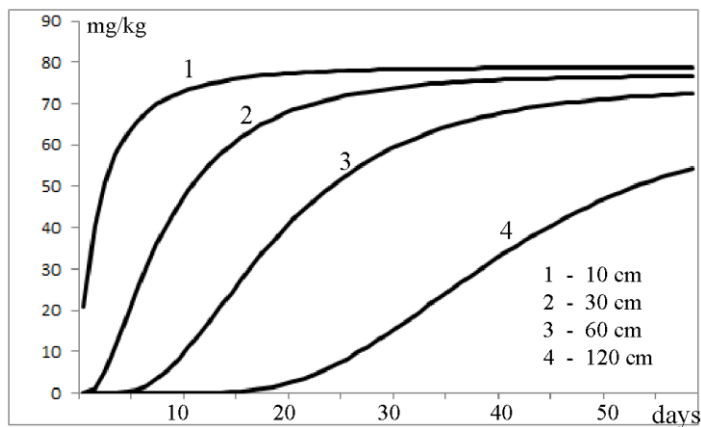
გამარტივებულ შემთხვევაში მოდელირებულია ტყვიის გავრცელება ნიადაგის სიღრმეში, როცა ტყვიის კონცენტრაცია დედამიწის ზედაპირზე მოიცემოდა $\tilde{\rho} = 80$ მგ/კგ და მუდმივი იყო მთელი საინტეგრო დროის განმავლობაში (საინტეგრო დრო შეადგენდა 2 თვეს). ამ მიზნით (1)–(3) ამოცანა (4) და (5)–ის გათვალისწინებით ამოხსნილია სასრულ-სხვაობითი მეთოდით კრანკ-ნიკოლსონის სქემის გამოყენებით, ხოლო განტოლების აპროქსიმაციის შედეგად მიღებული ალგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად გამოიყენებოდა ფაქტორიზაციის მეთოდი [22]. ნიადაგის ტემპერატურული ველი განისაზღვრებოდა (10) ანალიზური ფორმულით. ამოცანის პარამეტრებს შემდეგი მნიშვნელობები ენიჭებოდათ: ტყვიის სიმკვრივე $\rho_1 = 11.3$ გ/სმ³, $\rho_w = 1$ გ/სმ³, $w_w = 1 \cdot 10^{-5}$ სმ/წმ, $\sigma = 44 \cdot 10^{-9}$ წმ⁻¹ (ეს მნიშვნელობა შეესაბამებოდა მცენარეთა ფესვების მიერ ტყვიის სორბციით გამოწვეულ საწყისი კონცენტრაციის შემცირებას 2-ჯერ 6 თვიან პერიოდში), $a = 3 \cdot 10^{-3}$ სმ²/წმ, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, $g = 980$ სმ²/წმ, $r = 2.5 \cdot 10^{-6}$ სმ, $H = 150$ სმ, $D = 3 \cdot 10^{-4}$ სმ²/წმ. ვერტიკალზე აღებული იყო 75 დონე ზადის ბიჯით $\Delta z = 2$ სმ, დროითი ბიჯი $\Delta t = 20$ წთ. საწყის $t = 0$ მომენტში მინარევის კონცენტრაცია $C_0 = 0$.

ნახ.1-ზე მოცემულია ტყვიის კონცენტრაციის პროფილები $t = 0$ მომენტიდან ყოველი 10 დღის შემდეგ. ნახაზიდან ნათლად ჩანს, რომ დროთა განმავლობაში დაჭუჭყიანება თანდათან ვრცელდება ნიადაგის ქვედა ფენებში და კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება თვისებრივად იცვლება. ინტეგრირების დაწყებიდან პირველ დღეებში ნიადაგის ზედა რამოდენიმე ათეული სანტიმეტრი სისქის ფენაში ფორმირდება დაჭუჭყიანების კონცენტრაციის მაღალი გრადიენტები და შესაბამისად კონცენტრაციები სწრაფად მცირდება სიღრმის მიხედვით, დროის შემდგომ პერიოდში მინარევის პროფილი ტრანსფორმაციას განიცდის, რის შედეგადაც გრადიენტები ნიადაგის ზედა ფენაში თანდათან მცირდება მინიმალურ მნიშვნელობამდე. მაგალითად, 10 დღის შემდეგ 40 სმ სისქის ფენაში კონცენტრაცია შემცირდა 89-დან 30 მგ/კგ-მდე, მაშინ როდესაც ორი თვის შემდეგ იმავე ფენაში კონცენტრაციის შემცირება მხოლოდ 3-4 მგ/კგ-ია. თანდათანობით მიმდინარეობს დაჭუჭყიანების გავრცელების პროცესი ნიადაგის ქვედა ფენებში. თუ ტყვიისათვის ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციად (ზდკ) 32 მგ/კგ-ს მივიღებთ [10], მაშინ, როგორც ნახ.1-დან ჩანს, ინტეგრირების დაწყებიდან 10 დღის შემდეგ დაახლოებით 40 სმ სიღრმის ქვემოთ, მინარევის კონცენტრაცია ზდკ-ზე ნაკლებია, მაგრამ ერთი თვის შემდეგ უკვე 100 სმ ქვემოთაა დაჭუჭყიანება ზდკ-ზე ნაკლები.

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია მინარევის კონცენტრაციათა დროში ცვალებადობა სხვადასხვა სიღრმეებზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ ნიადაგის ზედა ფენებში დაახლოებით 30 სმ სიღრმემდე კონცენტრაციები შედარებით სწრაფად იზრდება პირველ 10-15 დღეში, ხოლო შემდგომ პრაქტიკულად აღარ იცვლება, ქვედა ფენებში კონცენტრაციათა ზრდა გაცილებით ნელა მიმდინარეობს. მაგალითად, 10 სმ სიღრმეზე მინარევის კონცენტრაცია ნულოვანი მნიშვნელობიდან 78 მგ/კგ-მდე დაახლოებით 15 დღეში იზრდებოდა, მაშინ როდესაც 120 სმ სიღრმეზე დაჭუჭყიანება 40 დღის შემდეგ აჭარბებდა ზდკ-ს და 55 დღის შემდეგ 50 მგ/კგ კონცენტრაცია დაიკვირვებოდა.



ნახ.1. მინარევის კონცენტრაციათა ვერტიკალური პროფილები ინტეგრების დაწყებიდან 10, 20, 30, 40, 50, და 60 დღის შემდეგ.



ნახ. 2. მინარევის კონცენტრაციათა დროში გავრცელება 10, 30, 60 და 120 სმ სიღრმეებზე.

დასკვნები

ნიადაგში მყარი მინარევების გავრცელებაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ნიადაგის ფორმებსა და ნაპრალებში მყოფ წყალს, რომელიც სატრანსპორტო ფუნქციის როლს ასრულებს. ნიადაგის წყლის მოძრაობის განსაზღვრა, მისი სიბლანტისა და მასში მინარევების მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტების ტემპერატურაზე დამოკიდებულება საჭიროებს ნიადაგის ტენისა და სითბოს გადატანის პროცესების სრულ აღწერას. თავის მხრივ, ეს პროცესები მჭიდრო კავშირშია ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მიმდინარე თერმოდინამიკურ პროცესებთან. ამგვარად, ნიადაგში მყარი ანთროპოგენური მინარევების გავრცელების პროცესის შესწავლა მათემატიკური მოდელირების საფუძველზე რთული ამოცანაა, რომლის საიმედო და სრულფასოვანი გადაწყვეტა საჭიროებს ერთიან კომპლექსურ მიდგომას. ეს მიდგომა ითვალისწინებს ნიადაგში, გარდა მინარევის გადატანის განტოლებისა, სითბოსა და ნიადაგის ტენის გადატანის განტოლებათა და ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში ჰიდროთერმოდინამიკის განტოლებათა სისტემის ერთობლივ განხილვას ნიადაგი-ატმოსფეროს საზღვარზე სითბოსა და ტენის ბალანსის განტოლებათა გათვალისწინებით.

მოცემულ სტატიაში ილუსტრირებულია მყარი მინარევის ვერტიკალური გავრცელების პროცესი ტყვის მაგალითზე გამარტივებულ შემთხვევაში, როცა ნიადაგის ტემპერატურული ველი ცნობილი ფუნქციაა და წარმოადგენს ნიადაგის სითბოგამტარობის განტოლების ანალიზურ ამონახსნს მუდმივი კოეფიციენტების შემთხვევაში.

ლიტერატურა –ЛИТЕРАТУРА - REFERENCES

1. Качинский Н. А. Физика почвы. Москва, издательство “Высшая школа“, 1965, 323 с.
2. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. Москва, “Наука”, 1967, 583с.
3. Чудновский А. Ф. Теплофизика почвы. Москва, “Наука”, 1976, 352 с.
4. Кларк У. К. Управление планетой Земля. В мире науки. 1989. №11, с.7-15.
5. Грейдел Т. Э., Крутцен П. Дж. Меняющаяся атмосфера. В мире науки. 1989. №11, с.16-25.
6. Mironescu L. The fight against harm to the environment in the Black Sea. Parliamentary Assembly of Council of Europe. 2008, <http://assembly.coe.int>.
7. ბუაჩიძე ნ. საქართველოში არსებული სტიქიური ნაგავსაყრელების გავლენის შეფასება მიმდებარე ტერიტორიების ეკოსისტემების მდგომარეობაზე. თბილისი, 2015, 88 გვ.
8. Svanidze Z., Gunia G., Svanidze L. About monitoring of metal impurity in environments of areas of intensive anthropogenous influence of Georgia. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომათა კრებული. საერთაშორისო სამეც.-ტექნიკური კონფერენციის მასალები “ჰიდრომეტეოროლოგიისა და ეკოლოგიის აქტუალური პრობლემები“. 28-30 მაისი 2013, თბილისი, 2013, ტ.119, გვ. 207-211.
9. Гонеев И. А., Чепелев О. А., Голушов П. В. Общие закономерности распространения тяжелых металлов в почвах зоны влияния горнорудных предприятий КМА. Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета, 2011, т.1, №2, 8с.
10. წიკლაური ო., ქავთარაძე მ., ჭირაქაძე ა., შაფაქიძე ე., კორძაძე ა., კვინიკაძე მ., დემეტრაშვილი დ., სიღამონიძე შ. ტრანსკავკასიური ავტოსატრანსპორტო მაგისტრალის მიმდებარე ტერიტორიის ეკომონიტორინგი. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, 2016, ტ.16, №1, გვ.125-130.
11. Сафронова Т. И., Степанов В. И. Математическое моделирование в задачах агрофизики. Краснодар, КубГАУ, 2012, 110 с.
12. Yahya M. D., Abdulfatai J. Mathematical modeling and simulation of mobility of heavy metals in soil contaminated with sewage sludge. http://lejpt.academicdirect.org/A10/get_htm.php?htm=157_168
13. Nedunuri K. V., Govindaraju R. S., Erickson L. E., Schwab A. P. Modeling of heavy metal movement in vegetated, unsaturated soil with emphasis on geochemistry. Proceedings of the 10h annual Conference on hazardous waste research. 1995, May 23-24, Kansas State University, pp. 57-66.
14. Сурмава А. А. Математическое моделирование переноса влаги и растворенного вещества в почве. Тр. Закавказского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического Института. Москва, Гидрометеоиздат, 1988, вып.86(93), с. 3-9.
15. Матвеев Ю. Н., Масленников Б. И., Карельская К. А., Стукалова Н. А. Математическое моделирование процессов распространения загрязняющего вещества в почвогрунтах и атмосфере при его аварийном разливе. Интернет-журнал “Науковедение“, 2016, т.8, № 5, 9с. <http://naukovedenie.ru/PDF/65TVN516.pdf>
16. Surmava A. A. The numerical modeling of spreading of spilled oil and oil-products in some soils of Georgia. J. Georgian Geoph. Society. Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma. 2001, v. 6, pp.41-46.
17. Surmava A. A., Kukhalashvili V. G., Kacharava G. G. Numerical 3D model of soil pollution by oil. J. Georgian Geoph. Society. Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma. 2004, v. 9, pp.18-22.
18. Mirskhoulava Ts. Kordzadze A. Surmava A., Demetrashvili D. Numerical modeling of a soil pollution by oil from an open rectangular pit. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, 2006, t. 173, №2, pp. 295-297.
19. Деметрашвили Д. И. Нестационарная квазиодномерная модель планетарного пограничного слоя Земли. Тр. Закавказского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. Москва, Гидрометеоиздат, 1989, выпуск 91(98), с.84-93.

20. Деметрашвили Д. И. О численном прогнозе приземной температуры с помощью модели планетарного пограничного слоя. Информационное письмо. Грузинское республиканское управление по гидрометеорологии и контролю природной среды. 1987, № 4(120), с. 34-48.
21. Деметрашвили Д. И. К вопросу о гидродинамическом прогнозе суточного хода температуры. Сообщения академии наук Грузинской ССР. 1989, т. 133, № 3, с. 549-552.
22. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва "Наука", 1982, 319 с.

უკ 519.711.3

ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების მათემატიკური მოდელირების შესახებ/დ. დემეტრაშვილი/სტუ-ს ჰმი-ის სამეცნ. რეგ. შრ. კრებ. - 2017. - ტ.124. - გვ.107-113. - ქართ.; რეზ.: ქართ., ინგლ., რუს. მოცემულ სტატიაში ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების ამოცანა განიხილება როგორც კომპლექსური ამოცანა, რომლის სრული გადაწყვეტა დაკავშირებულია ნიადაგში სითბოსა და ტენის გავრცელების პროცესებთან და ატმოსფეროს ქვედა მიწისპირა ფენაში თერმოდინამიკურ პროცესებთან. მოცემულია ასეთი კომპლექსური მათემატიკური მოდელის აგების ერთ-ერთი გზა. სტატიაში რეალიზებულია შედარებით მარტივი, ნიადაგში მყარი მინარევის გავრცელების ერთგანზომილებიანი არასტაციონარული ამოცანა, სადაც მინარევის მიგრაცია განპირობებულია ადვექციური გადატანით ნიადაგის წყალში, გრავიტაციული სედიმენტაციით, მოლეკულური დიფუზიითა და მცენარეთა ფესვების მიერ მინარევის სორბციით. ილუსტრაციის მიზნით მოყვანილია ტყვიის ვერტიკალზე გავრცელების მოდელირების შედეგები ერთ კონკრეტულ შემთხვევაში.

UDC 519.711.3

ON MATHEMATICAL MODELING OF SPREADING OF SOLID ADMIXTURE IN THE SOIL /D. Demetrashvili/ Transactions of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University.-2017.-V.124.-pp.107-113 -Georg.; Summ. Georg., Eng., Russ.

In the present paper a problem of spreading of a solid impurity in the soil is considered as a complex problem, full solution of which is associated with heat and moisture transfer processes in the soil and with thermodynamic processes in the atmospheric surface layer. One of the ways of constructing such a complex mathematical model is described. In this paper relatively simple nonstationary one-dimensional problem of distribution of a solid impurity in the soil is realized, where impurity migration is caused by advective transport in the soil water, gravitational sedimentation, molecular diffusion and sorption by plant roots. For the purpose of illustration, the results of modeling the distribution of the lead along the vertical in one particular case are given.

УДК 519.711.3

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТВЕРДОЙ ПРИМЕСИ В ПОЧВЕ./Д. Деметрашвили/Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Технического Университета, -2017.-т.124 –с.107-113-Груз., Рез. Груз., Англ., Рус.

В настоящей статье задача распространения твердой примеси в почве рассматривается как комплексная задача, полное решение которой связано с процессами распространения тепла и влаги в почве и с термодинамическими процессами в приземном слое атмосферы. Дается одна из путей построения такой комплексной математической модели. В статье реализована сравнительно простая, нестационарная одномерная задача распространения твердой примеси в почве, где миграция примеси обусловлена адвективным переносом в почвенном растворе, гравитационной седиментацией, молекулярной диффузией и сорбцией корнями растений. С целью иллюстрации приводятся результаты моделирования распространения свинца по вертикали в одном конкретном случае.