DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

GEOMIGRATSIYA JARAYONLARINI MATEMATIK MODELLASH ASOSIDA YER OSTI SUVLARI IFLOSLANISH XAVFINI SIFAT JIHATIDAN BAHOLASH

Djumanov J.X., *professor,*
e-mail: jamoljon@mail.ru
Vafoyev R.A., *2-bosqich magistranti,*
e-mail: vafoyevrajabboy@gmail.com
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti

Annotatsiya. *Ushbu maqolada yer osti suvlari ifloslanish jarayonlarini geomigratsiya hodisalari asosida o‘rganish va ularni matematik modellash orqali baholash masalasi ko‘rib chiqiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi ifloslantiruvchi moddalarning yer osti suvlarida tarqalish mexanizmlarini aniqlash hamda ularning xavf darajasini sifat jihatdan baholashdan iborat. Maqolada filtratsiya, diffuziya va adveksiya jarayonlarini tavsiflovchi klassik adveksiya–dispersiya modeli asosida ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash algoritmi va Python tilidagi dasturi ishlab chiqilgan. Namunaviy hisoblarda qumli-shag‘alli qatlam uchun Pe = 16,67 va 600 kunda 100 m masofada $C/C_0 = 0,57$, qumloq-gilli qatlam uchun Pe = 2,0, gilli qatlam uchun Pe = 0,125 olindi; sonli yechim Ogata–Banks analitik yechimi bilan mos kelishi ko‘rsatildi. Olingan natijalar yer osti suvlarini muhofaza qilish va ekologik xavfsizlikni ta’minlashda muhim ahamiyatga ega.*

Аннотация. *В статье рассматривается проблема изучения процессов загрязнения подземных вод на основе явлений геомиграции и их оценки с помощью математического моделирования. Основная цель исследования – выявить механизмы распространения загрязняющих веществ в подземных водах и качественно оценить уровень их опасности. На основе классической модели адвекции–дисперсии, описывающей процессы фильтрации, диффузии и адвекции, разработаны алгоритм качественной оценки риска загрязнения и программа на языке Python. В модельных расчётах для песчано-гравийного слоя получено Pe = 16,67 и $C/C_0 = 0,57$ на расстоянии 100 м через 600 сут, для супесчано-глинистого слоя Pe = 2,0, для глинистого слоя Pe = 0,125; показано совпадение численного решения с аналитическим решением Огаты–Бэнкса. Полученные результаты имеют большое значение для охраны подземных вод и обеспечения экологической безопасности.*

Abstract. *This article considers the issue of studying groundwater pollution processes based on geomigration phenomena and their assessment through mathematical modeling. The main goal of the research is to identify the mechanisms of dispersion of pollutants in groundwater and qualitatively assess their risk level. Based on the classical advection–dispersion model describing filtration, diffusion and advection, an algorithm for the qualitative assessment of pollution risk and its Python implementation are developed. Model calculations gave Pe = 16.67 and $C/C_0 = 0.57$ at a distance of 100 m after 600 days for a sand-gravel layer, Pe = 2.0 for a loamy layer and Pe = 0.125 for a clay layer; the numerical solution agrees with the Ogata–Banks analytical solution. The results obtained are of great importance in protecting groundwater and ensuring environmental safety.*

Kalit so‘zlar: *geomigratsiya, yer osti suvlari, ifloslanish, matematik modellash, diffuziya, adveksiya, filtratsiya.*

Ключевые слова: *геомиграция, подземные воды, загрязнение, математическое моделирование, диффузия, адвекция, фильтрация.*

Keywords: *geomigration, groundwater, pollution, mathematical modeling, diffusion, advection, filtration.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

Kirish. Hozirgi kunda yer osti suv resurslari insoniyat uchun eng muhim tabiiy boyliklardan biri hisoblanadi. Aholining ichimlik suvi bilan ta’minlanishi, qishloq xo‘jaligi hamda sanoat tarmoqlarining barqaror faoliyati ko‘p jihatdan aynan yer osti suvlarining sifati va miqdoriga bog‘liq. Shu bilan birga, antropogen omillar, ya’ni sanoat chiqindilari, qishloq xo‘jaligida kimyoviy o‘g‘itlar va pestitsidlarning keng qo‘llanilishi, shuningdek, maishiy chiqindilar yer osti suvlarining ifloslanishiga jiddiy ta’sir ko‘rsatmoqda [1].

So‘nggi yillarda yer osti suvlari ifloslanishini baholash va prognozlash masalalari geomigratsiya jarayonlarini hisobga olgan holda matematik modellashtirish asosida keng o‘rganilmoqda. Ayniqsa, ifloslantiruvchi moddalarning suv qatlamlarida tarqalish qonuniyatlarini aniqlash ekologik xavfsizlikni ta’minlashda muhim ahamiyat kasb etadi [2, 3]. Ilmiy ishlarda yer osti suvlari oqimi va ifloslanish jarayonlarini kompleks baholash uchun sonli modellashtirish usullaridan keng foydalanilgan. Xususan, gidrodinamik modellar asosida filtratsiya jarayonlari va moddalarning migratsiyasi uch o‘lchamli muhitda tahlil qilingan [4, 5]. Ushbu yondashuv real geologik sharoitlarni hisobga olish imkonini beradi, biroq katta hajmdagi boshlang‘ich ma’lumotlar va hisoblash resurslarini talab etadi.

Yer osti suvlarining ifloslanishini aniqlash va baholash masalasi ko‘plab ilmiy tadqiqotlarda muhim o‘rin egallab kelmoqda. An’anaviy yondashuvlarda asosan fizik-kimyoviy tahlillar, laboratoriya sinovlari va statistik usullardan foydalanilgan. Bunday usullar aniq natija berishiga qaramay, ular ko‘p vaqt va resurs talab qiladi hamda real vaqt rejimida monitoring olib borish imkoniyatini cheklaydi. So‘nggi yillarda matematik modellashtirish asosida yer osti suvlaridagi ifloslantiruvchi moddalar migratsiyasini o‘rganishga katta e’tibor qaratilmoqda. Xususan, gidrogeologik modellar (masalan, MODFLOW) va massa uzatish tenglamalariga asoslangan yondashuvlar (masalan, MT3DMS) orqali ifloslanish jarayonlari chuqur tahlil qilinmoqda [4, 5].

So‘nggi yillarda tadqiqotlarda mashinali o‘rganish usullari, xususan tasodifiy o‘rmon (Random Forest) va sun’iy neyron tarmoqlar asosidagi modellar keng qo‘llanila boshlandi. Ushbu yondashuvlar orqali yer osti suvlari ifloslanish darajasini prognozlashda yuqori aniqlikka erishilgan [6]. Ayniqsa, nochiziqli bog‘lanishlarni aniqlashda ushbu usullar an’anaviy matematik modellarga nisbatan ustunlik ko‘rsatgan.

Shuningdek, fizik va ma’lumotlarga asoslangan yondashuvlarni birlashtiruvchi gibrid modellar taklif etilgan: bunda gidrodinamik model natijalari ma’lumotlarga asoslangan usullar yordamida aniqlashtiriladi [7]. Bunday modellar yordamida geomigratsiya jarayonlari chuqurroq tahlil qilinib, ifloslantiruvchi moddalarning tarqalish dinamikasi yanada aniqroq baholangan.

Shu bilan birga, mavjud tadqiqotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, aksariyat modellar miqdoriy baholashga yo‘naltirilgan bo‘lib, ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash masalasi yetarli darajada yoritilmagan. Ayniqsa, geomigratsiya jarayonlari bilan bog‘liq noaniqliklarni hisobga olgan holda xavf darajasini aniqlash dolzarb muammo bo‘lib qolmoqda.

Ushbu ishning maqsadi – klassik adveksiya–dispersiya tenglamasi, Darsi qonuni va Pekle soniga tayangan holda yer osti suvlari ifloslanish xavfini sifat jihatidan tezkor baholash algoritmini va uni amalga oshiruvchi dasturni ishlab chiqish, sonli yechimni analitik yechim bilan tekshirish hamda turli gidrogeologik sharoitlar uchun xavf darajasini qiyosiy baholashdan iborat. Mualliflar hissasi tenglamaning o‘zida emas, balki ushbu ko‘rsatkichlarni birlashtirgan baholash algoritmi va dasturiy vositada namoyon bo‘ladi.

Tadqiqot obyekti va usullari. Geomigratsiya – bu kimyoviy elementlar va birikmalarning geologik muhitda harakatlanish jarayoni bo‘lib, u yer osti suvlari sifatiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Ushbu jarayonlarni matematik modellash orqali ifloslanish xavfini oldindan baholash mumkin. Geomigratsiya jarayonlari ko‘pincha gidrogeologik, geokimyoviy va fizik jarayonlarning o‘zaro bog‘liq holda kechishi natijasida yuzaga keladi. Bu jarayonlar orqali ifloslantiruvchi moddalar yer yuzasidan chuqur qatlamlargacha kirib boradi va suv qatlamlarida tarqaladi [1, 3].

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

Adveksiya (oqim bilan ko‘chish) – bu jarayonda moddalar yer osti suv oqimi bilan birga harakatlanadi. Agar suv tezligi yuqori bo‘lsa, ifloslantiruvchi moddalar tez va uzoq masofalarga tarqaladi. Bu ayniqsa qumli va shag‘alli qatlamlarda kuchli namoyon bo‘ladi.

Diffuziya – bu konsentratsiya gradienti ta’sirida moddalarning yuqori konsentratsiyadan past konsentratsiyaga qarab tarqalishidir. Bu jarayon sekin kechadi, lekin uzoq muddatda katta hududlarni qamrab oladi [1, 3].

Dispersiya – bu oqim tezligining notekisligi sababli moddalarning kengayib tarqalishidir. Natijada ifloslanish zonasi kengayadi va aniq chegaralar yo‘qoladi. Filtratsiya – bu suyuqlik (odatda yer osti suvlari)ning g‘ovak muhit (tuproq, qum, shag‘al, tog‘ jinslari) orqali bosim farqi ta’sirida harakatlanish jarayonidir. Ushbu jarayon geomigratsiyaning asosiy mexanizmlaridan biri bo‘lib, ifloslantiruvchi moddalarning yer qatlamlari orqali chuqur suv qatlamlariga kirib borishini ta’minlaydi. Filtratsiya jarayoni natijasida suv bilan birga erigan kimyoviy moddalar, og‘ir metallar, pestitsidlar va boshqa ifloslantiruvchilar ham ko‘chadi. Shu sababli filtratsiya yer osti suvlarining ifloslanish xavfini baholashda muhim omil hisoblanadi [1].

Matematik model asoslari. Yer osti suvlarining ifloslanish jarayonlari murakkab fizik-kimyoviy va gidrogeologik hodisalar majmuasidan iborat bo‘lib, ularni to‘g‘ri baholash uchun matematik modellashtirish muhim ahamiyatga ega. Ifloslantiruvchi moddalar yer osti qatlamlarida asosan adveksiya (oqim bilan ko‘chish), diffuziya va dispersiya (tarqalish) hamda kimyoviy reaksiyalar natijasida harakatlanadi. Bu jarayonlar adveksiya–dispersiya tenglamasi bilan ifodalanadi [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = D\nabla^2 C + R, \tag{1}$$

bu yerda C – ifloslantiruvchi modda konsentratsiyasi; $\vec{u}$ – oqim tezligi vektori; D – dispersiya koeffitsiyenti; R – manba va yutilish hadi.

Adveksiya jarayoni. Ifloslantiruvchi moddaning oqim bilan ko‘chishi quyidagicha ifodalanadi:

$$\vec{u} \cdot \nabla C = u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z}. \tag{2}$$

Algoritm va dastur. Taklif etilgan yondashuvni amaliyotda qo‘llash maqsadida ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash algoritmi ishlab chiqildi (1-rasm). Algoritm quyidagi bosqichlardan iborat:

1) *Kirish ma’lumotlarini kiritish.* Har bir gidrogeologik qatlam uchun filtratsiya koeffitsiyenti K, gidravlik gradient i, samarali g‘ovaklik n, manbadan kuzatuv nuqtasigacha bo‘lgan masofa L, dispersiya koeffitsiyenti D va zarur bo‘lsa yutilish koeffitsiyenti λ kiritiladi.

2) *Oqim tezligini hisoblash.* Yer osti suvi oqimining tezligi Darsi qonuniga asosan aniqlanadi [1]:

$$u = \frac{K \cdot i}{n}, \tag{3}$$

bu yerda K – filtratsiya koeffitsiyenti, i – gidravlik gradient, n – samarali g‘ovaklik.

3) *Pekle sonini hisoblash.* Adveksiya va dispersiyaning nisbiy ahamiyatini baholash uchun o‘lchamsiz Pekle soni aniqlanadi [2, 3]:

$$\mathrm{Pe} = \frac{u \cdot L}{D}, \tag{4}$$

bu yerda L – manbadan kuzatuv nuqtasigacha bo‘lgan xarakterli masofa.

4) *Ustun mexanizm va xavf darajasini aniqlash.* Pe ≥ 1 bo‘lganda ko‘chish asosan adveksiya hisobiga kechadi, aks holda diffuziya va dispersiya ustun bo‘ladi. Xavf darajasi Pe ≥ 10 bo‘lsa «yuqori», 1 ≤ Pe < 10 bo‘lsa «o‘rta», Pe < 1 bo‘lsa «past» deb baholanadi. Pe soni ko‘chish rejimini tavsiflaydi va xavfning bilvosita ko‘rsatkichi hisoblanadi, shuning uchun yakuniy baho ifloslanish frontining kuzatuv nuqtasiga yetib borish vaqti L/u va shu nuqtadagi nisbiy konsentratsiya C/C_0 bilan birgalikda beriladi; real hudud uchun hisoblangan konsentratsiya moddaning ruxsat etilgan konsentratsiyasi (REK) bilan solishtirilishi lozim. Pe bo‘yicha

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

chegaraviy qiymatlar taxminiy bo‘lib, muayyan hudud va ifloslantiruvchi modda turiga qarab aniqlashtirilishi mumkin.

5) *Sonli modellashtirish.* (1) tenglamaning bir o‘lchamli ko‘rinishi ($R = -\lambda C$ deb olinib) chekli ayirmalar usulida oshkor sxema bilan yechiladi. Bunda $x = 0$ nuqtada doimiy manba ($C = C_0$), boshlang‘ich shart $C(x, 0) = 0$, oxirgi tugunda esa $\partial C/\partial x = 0$ deb qabul qilinadi. Vaqt bo‘yicha qadam quyidagicha bajariladi:

$$C_j^{k+1} = C_j^k + \Delta t \left[D \frac{C_{j+1}^k - 2C_j^k + C_{j-1}^k}{\Delta x^2} - u \frac{C_{j+1}^k - C_{j-1}^k}{2\Delta x} - \lambda C_j^k \right], \quad (5)$$

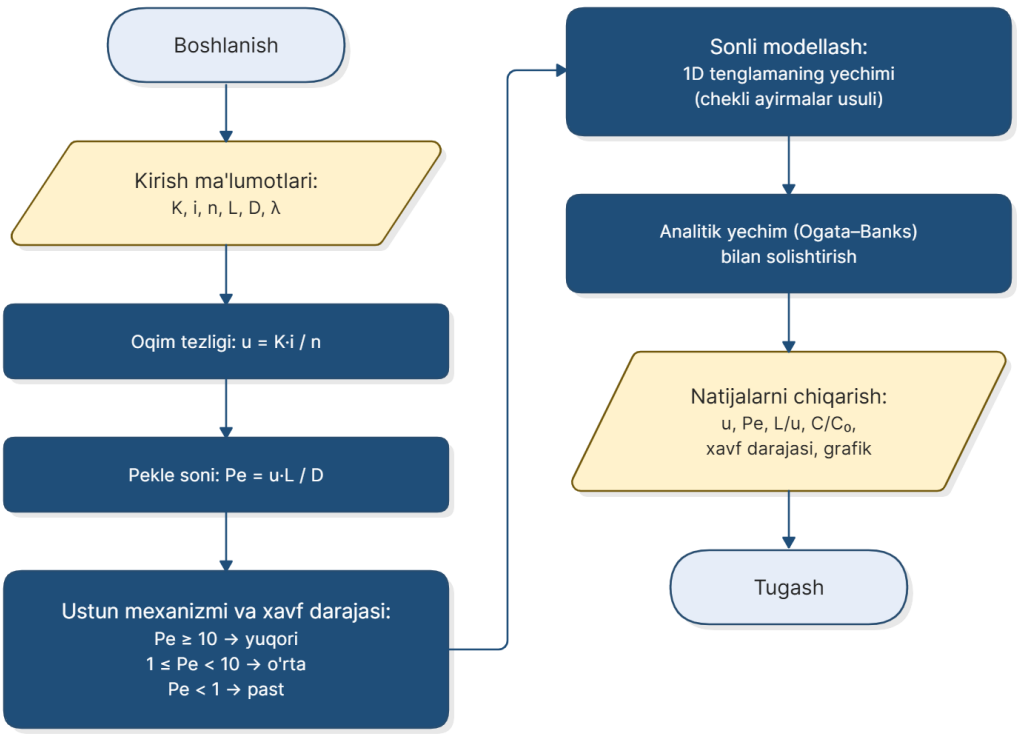
bu yerda j – fazoviy tugun, k – vaqt qadami raqami. Hisoblash barqarorligi uchun vaqt qadami $\Delta t \le \min(\Delta x^2/2D, \Delta x/u)$ shartidan tanlanadi. Agar katak Pekle soni $u\Delta x/D$ ikkidan oshsa, advektiv had markaziy ayirma o‘rniga «upwind» (oqimga qarshi) sxemasi bilan approksimatsiya qilinadi.

6) *Natijani tekshirish.* $\lambda = 0$ holat uchun sonli yechim Ogata–Banks analitik yechimi bilan solishtiriladi [8]:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x - u\cdot t}{2\sqrt{D\cdot t}}\right) + e^{\frac{u\cdot x}{D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x + u\cdot t}{2\sqrt{D\cdot t}}\right)\right], \quad (6)$$

bu yerda erfc – qo‘shimcha xato funksiyasi.

7) *Natijalarni chiqarish.* Har bir qatlam uchun u, Pe, ifloslanish fronti yetib borish vaqti L/u, kuzatuv nuqtasidagi nisbiy konsentratsiya C/C_0, ustun mexanizm va xavf darajasi jadval hamda grafik ko‘rinishida beriladi.



1-rasm. Ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash algoritmining blok-sxemasi

Algoritm Python dasturlash tilida NumPy kutubxonasi [9] yordamida dasturlashtirildi. Dasturning asosiy qismi (qisqartirilgan holda) 1-listingda keltirilgan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

1-listing. Dasturning asosiy qismi (Python)

```
def tezlik(q):                          # (3): u = K*i/n
    return q.K * q.i / q.n

def pekle(q):                           # (4): Pe = u*L/D
    return tezlik(q) * q.L / q.D

def xavf_darajasi(pe):
    if pe >= 10.0: return "Yuqori"
    if pe >= 1.0:  return "O'rta"
    return "Past"

def sonli_yechim(q, T, X, dx=1.0, C0=1.0):
    u, D = tezlik(q), q.D
    x = np.arange(0.0, X + dx, dx)
    C = np.zeros_like(x); C[0] = C0
    dt = 0.4 * min(dx*dx / (2*D), dx/u)    # barqarorlik sharti
    upwind = u*dx/D > 2                  # katak Pekle soni
    steps = int(np.ceil(T / dt)); dt = T / steps
    for _ in range(steps):
        Cn = C.copy()
        d2 = (C[2:] - 2*C[1:-1] + C[:-2]) / dx**2
        if upwind: d1 = (C[1:-1] - C[:-2]) / dx      # «upwind» sxemasi
        else:      d1 = (C[2:] - C[:-2]) / (2*dx)    # markaziy ayirma
        Cn[1:-1] = C[1:-1] + dt*(D*d2 - u*d1 - q.lam*C[1:-1])
        Cn[0], Cn[-1] = C0, Cn[-2]        # chegara shartlari
        C = Cn
    return x, C
```

Natijalar va muhokama. (1) tenglama tahlili ifloslantiruvchi moddalarning yer osti muhitida tarqalishi bir necha mexanizmning birgalikdagi ta’siri bilan belgilanishini ko‘rsatdi. (3) ifodadan ko‘rinadiki, o‘tkazuvchanlik va gidravlik gradient ortishi bilan oqim tezligi u ortadi, natijada (4) ifodaga ko‘ra Pe soni va ifloslanishning tarqalish tezligi ham ortadi. Pe ≫ 1 bo‘lganda ko‘chish asosan oqim bilan, ya’ni adveksiya hisobiga kechadi va ifloslanish fronti tez hamda yo‘nalgan holda harakatlanadi. Pe ≪ 1 bo‘lganda esa diffuziya va dispersiya hal qiluvchi bo‘lib, ifloslanish zonasi sekin, ammo har tomonga kengayadi.

Model tahlili asosida turli gidrogeologik sharoitlar uchun xavf darajasi sifat jihatidan baholandi (1-jadval).

1-jadval

Gidrogeologik sharoitga qarab ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash

Qatlam turi	Filtratsiya koeffitsiyenti *K*	Ustun mexanizm	*Pe* soni	Xavf darajasi
Qumli va shag‘alli	Yuqori	Adveksiya, filtratsiya	Katta	Yuqori
Qumloq-gilli (oraliq)	O‘rtacha	Adveksiya va dispersiya	O‘rtacha	O‘rta
Gilli	Past	Diffuziya	Kichik	Past (uzoq muddatda saqlanadi)

Jadvaldan ko‘rinadiki, qumli va shag‘alli qatlamlarda ifloslantiruvchi moddalar qisqa vaqt ichida uzoq masofalarga tarqaladi va chuqur suv qatlamlariga yetib boradi, shuning uchun bunday hududlar eng yuqori xavf zonasiga kiradi. Gilli qatlamlarda oqim sekin bo‘lgani uchun tarqalish diffuziya hisobiga kechadi. Bunda xavf past baholanadi, biroq jarayon uzoq davom etgani sababli ifloslanish uzoq muddat saqlanib qolishi mumkin.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

Shuningdek, (1) tenglamadagi R hadi orqali muhitning geokimyoviy xususiyatlari hisobga olinadi. Ayniqsa pH muhiti og‘ir metallar va boshqa moddalarning sorbsiyasi hamda eruvchanligiga ta’sir qiladi, shu sababli bir xil gidravlik sharoitda ham ifloslanish darajasi turlicha bo‘lishi mumkin [3].

Dastur yordamida hisoblash natijalari. Algoritmni sinash uchun uch xil qatlam uchun namunaviy kirish parametrlari tanlandi (2-jadval). Bu qiymatlar real o‘lchovlardan olinmagan bo‘lib, algoritmning ishlashini namoyish etish va qatlam turlari o‘rtasidagi sifat farqlarini ko‘rsatish uchun qabul qilingan. Real hudud uchun ular dala va laboratoriya ma’lumotlari bilan almashtirilishi lozim.

2-jadval

Hisoblash uchun namunaviy kirish parametrlari

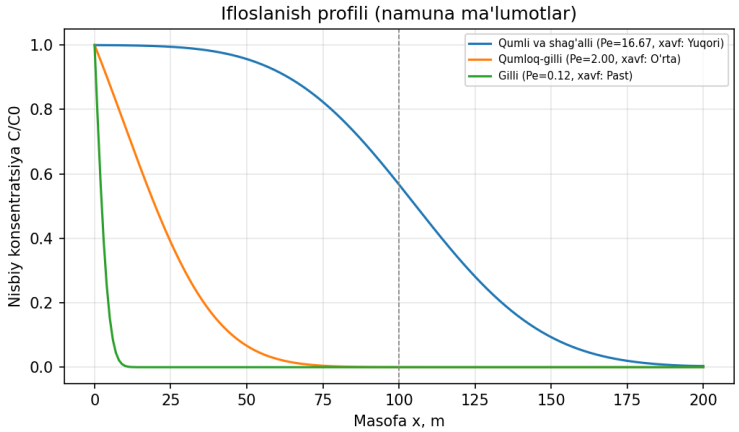
Qatlam turi	*K*, m/kun	*i*	*n*	*L*, m	*D*, m²/kun
Qumli va shag‘alli	10	0,005	0,30	100	1,0
Qumloq-gilli	0,5	0,005	0,25	100	0,5
Gilli	0,001	0,005	0,40	100	0,01

Modellash vaqti T = 600 kun, hisoblash sohasi $0 \le x \le 200$ m, fazoviy qadam $\Delta x = 1$ m, manbadagi konsentratsiya $C_0 = 1$ (nisbiy birlik) deb olindi. Hisoblash natijalari 3-jadvalda va 2-rasmda keltirilgan.

3-jadval

Dastur yordamida olingan hisoblash natijalari ($T = 600$ kun, $x = L$)

Qatlam turi	*u*, m/kun	*Pe*	*L*/*u*, kun	*C*/*C*₀ (sonli)	*C*/*C*₀ (analitik)	Xavf
Qumli va shag‘alli	$1{,}67\cdot10^{-1}$	16,67	600	0,5673	0,5672	Yuqori
Qumloq-gilli	$1{,}00\cdot10^{-2}$	2,00	10 000	0,0001	0,0001	O‘rta
Gilli	$1{,}25\cdot10^{-5}$	0,125	$8\cdot10^{6}$	0,0000	0,0000	Past



2-rasm. T = 600 kunda nisbiy konsentratsiyaning masofa bo‘yicha taqsimlanishi (namunaviy ma’lumotlar)

Sonli va analitik yechimlar orasidagi farq $1\cdot10^{-4}$ dan oshmadi, bu dasturning to‘g‘ri ishlashini tasdiqlaydi. Qumli va shag‘alli qatlamda (Pe = 16,67) ifloslanish fronti 100 m masofaga taxminan 600 kunda yetib boradi va shu paytda konsentratsiya manba konsentratsiyasining yarmidan ko‘pini (0,57) tashkil etadi, ya’ni xavf yuqori. Qumloq-gilli qatlamda (Pe = 2,00) adveksiya hamon ustun bo‘lsa-da, front 100 m ga yetishi uchun o‘n mingdan ortiq kun talab etiladi

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

va 600 kunda kuzatuv nuqtasida konsentratsiya deyarli nolga teng, xavf o‘rta deb baholandi. Gilli qatlamda (Pe = 0,125) ifloslanish diffuziya hisobiga tarqalib, asosan manba yaqinida, taxminan 10 m ichida qoladi. Bu holda L/u ko‘rsatkichi faqat adveksiya bo‘yicha baho bo‘lib, tarqalishning haqiqiy tezligini ifodalamaydi. Olingan natijalar 1-jadvaldagi sifat baholariga mos keladi.

Muhokama shuni ko‘rsatdiki, ifloslanish xavfini ishonchli baholash uchun faqat bitta omilga tayanish yetarli emas. Xavf darajasini aniqlashda filtratsiya tezligi, g‘ovaklik, gidravlik gradient, manbadan masofa va muhitning pH ko‘rsatkichi birgalikda inobatga olinishi lozim. Taklif etilgan yondashuv MODFLOW va MT3DMS kabi sonli modellar [4, 5] uchun dastlabki sifat bahosini berib, xavfi yuqori hududlarni oldindan aniqlash va monitoring punktlarini, jumladan masofaviy ma’lumot uzatuvchi kuzatuv qurilmalarini [10, 11] shu hududlarga joylashtirish imkonini beradi. Shu bilan birga, dastur bir o‘lchamli va bir jinsli muhit uchun ishlab chiqilgan, shuning uchun real sharoitlarda uch o‘lchamli modellar va dala kuzatuv ma’lumotlari bilan tekshirish zarur.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda geomigratsiya jarayonlarini matematik modellash asosida yer osti suvlari ifloslanish xavfini sifat jihatidan baholash masalasi kompleks yondashuv asosida o‘rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, ifloslantiruvchi moddalarning yer osti muhitida tarqalishi ko‘p omilli jarayon bo‘lib, u adveksiya, diffuziya, dispersiya va filtratsiya kabi mexanizmlarning o‘zaro ta’siri natijasida shakllanadi. Klassik adveksiya–dispersiya modeli asosida ishlab chiqilgan algoritm va dastur ifloslantiruvchi moddalarning fazoviy-vaqt bo‘yicha taqsimlanishini aniqlash, ularning tarqalish tezligi va yo‘nalishini baholash hamda potensial xavf zonalarini prognoz qilish imkonini berdi. Xususan, filtratsiya jarayoni orqali moddalarning chuqur qatlamlarga kirib borishi, adveksiya orqali esa tez masofalarga ko‘chishi asosiy omil sifatida aniqlandi. Diffuziya va dispersiya esa uzoq muddatli tarqalishda muhim rol o‘ynashi qayd etildi. Tahlillar shuni tasdiqladiki, yer osti muhitining fizik-kimyoviy xususiyatlari, jumladan, g‘ovaklik, o‘tkazuvchanlik, pH muhiti va gidravlik gradient ifloslanish darajasiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli, ifloslanish xavfini ishonchli baholash faqat ushbu omillarni birgalikda hisobga olgan holda amalga oshirilishi mumkin.

Mazkur tadqiqotning ilmiy ahamiyati shundaki, u geomigratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish orqali yer osti suvlari ifloslanishini sifat jihatidan baholashning samarali usulini taklif etadi. Amaliy jihatdan esa ushbu yondashuv ekologik monitoring tizimlarini takomillashtirish, ichimlik suvi manbalarini muhofaza qilish va ifloslanishning oldini olish bo‘yicha qarorlar qabul qilishda muhim vosita bo‘lib xizmat qiladi.

Kelgusida ushbu modelni real kuzatuv ma’lumotlari bilan integratsiya qilish hamda sun’iy intellekt asosidagi usullar bilan boyitish orqali yanada yuqori aniqlikdagi prognoz tizimlarini yaratish mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Bear J. Hydraulics of Groundwater. – New York: McGraw-Hill, 1979.

2. Anderson M.P., Woessner W.W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. – San Diego: Academic Press, 1992.

3. Zheng C., Bennett G.D. Applied Contaminant Transport Modeling. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 2002.

4. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process // U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. – Reston, VA, 2005.

5. Zheng C., Wang P.P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user’s guide. – Contract Report SERDP-99-1. – Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.126

6. Rodriguez-Galiano V., Mendes M.P., Garcia-Soldado M.J., Chica-Olmo M., Ribeiro L. Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using Random Forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: a case study in an agricultural setting (Southern Spain) // Science of the Total Environment. – 2014. – Vol. 476–477. – P. 189–206.

7. Xu T., Valocchi A.J. Data-driven methods to improve baseflow prediction of a regional groundwater model // Computers & Geosciences. – 2015. – Vol. 85. – P. 124–136.

8. Ogata A., Banks R.B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media // U.S. Geological Survey Professional Paper 411-A. – Washington, 1961.

9. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy // Nature. – 2020. – Vol. 585. – P. 357–362.

10. Djumanov J.X., Anorboyev E.A., Jamolov X.M. Kuzatuv quduqlaridan yer osti suvlari sathi va tok o‘tkazuvchanligini aniqlovchi masofaviy ma’lumot uzatish qurilmasini yaratish // Muhammad al-Xorazmiy avlodlari. – 2023. – № 1 (23). – B. 113–114.

11. Rajabov F.F., Djumanov J.X., Jamolov X.M. Creation of a multi-functional device for real-time monitoring in evaluation of the basic characteristics of water // Digital transformation and artificial intelligence: problems, innovations and trends (DTAI-2024): I International scientific-practical conference. – 2024, 11 September. – P. 16–17.