

UDK: 626:627.631.624

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-1.12>

“TUPROQ – O‘SIMLIK - IQLIM” TIZIMIDA BIOSINTEZNI MATEMATIK MODELLASHTIRISH

Samandarova Gavhar Avaz qizi¹ - doktorant (PhD),

ORCID: 0009-0008-1501-7389, E-mail: Abdulohsuratov55@gmail.com;

Xo‘jaqulov Rustam² - texnika fanlari doktori, professor,

ORCID: [0009-0007-6082-0042](https://orcid.org/0009-0007-6082-0042), E-mail: rustam868793@mail.ru;

Tursunov Feruz Yuldoshevich² - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

ORCID: 0009-0001-5350-5999, E-mail: feruzbektursunov531gmail.com.

¹ Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro sh., O‘zbekiston

² Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *Ma'lumki, AquaCrop, SWAP va HYDRUS kabi mavjud modellar suv balansini prognozlashda yuqori aniqlikka ega bo'lishiga qaramay, suv-tuz muvozanati bilan harorat cheklovlarining ildiz o'sishiga ta'siri o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni yetarlicha to'liq integratsiya qilmaydi. Zamonaviy modellarning aksariyati o'simlikning yer usti qismining o'sishini yer osti fiziologik jarayonlaridan ajratilgan holda tasvirlaydi yoki soddalashtirilgan empirik bog'lanishlardan foydalanadi. Bu esa ularning tez o'zgarayotgan iqlim ssenariylari sharoitida, shuningdek yuqori darajada qurg'oqchil va degradatsiyaga uchragan tuproqli hududlarda qo'llanish imkoniyatini cheklaydi. Differensial tenglamalar tizimiga asoslangan matematik modellashtirish iqlim, tuproq tarkibi va o'simlik fiziologiyasiga oid ma'lumotlarni integratsiya qilish imkonini beradi va shu orqali agrotexnologik rejalashtirish uchun aniqroq vositalarni yaratadi. Agroiinformatikadagi zamonaviy tendensiyalar, jumladan agroekotizimlarning raqamli egizaklarini yaratish, muhit parametrlarining makon-vaqt bo'yicha o'zgarishlarini hamda chiziqli bo'lmagan biofizik jarayonlarni hisobga oladigan modellarni ishlab chiqishni talab etadi. Tuproqning suv-tuz balansini, harorat rejimi va fiziologik jarayonlar o'rtasidagi murakkab o'zaro bog'liqlik stress sharoitida ildiz tizimi dinamikasini bashorat qila oladigan matematik modellarni yaratishni talab etadi. Global isish, qurg'oqchiliklar va tuproqlarning sho'rlanishi kabi zamonaviy chaqiriqlar ushbu vazifani yanada dolzarb qilmoqda.*

Ushbu maqolada ildiz biomassasi $R(x,t)$, tuproq namligi $W(x,t)$ va tuzlar konsentratsiyasi $S(x,t)$ o'rtasidagi o'zaro ta'sirni tasvirlaydigan oddiy va xususiy hosilali differensial tenglamalar tizimi keltirilgan. Modelda harorat omili, evapotranspiratsiya hamda fiziologik cheklovlar inobatga olingan.

Kalit so'zlar: *biosintez, matematik model, suv-tuz muvozanati, fiziologik jarayon, differensial tenglamalar, agroekotizimlar, biofizik jarayon, ildiz biomassasi tuproq namligi, tuzlar konsentratsiyasi*

UDC: 626:627.631.24

MODELING BIOSYNTHESIS IN THE "SOIL – VEGETATION - CLIMATE" SYSTEM

Samandarova, Gavhar¹ – Doctoral student (PhD);

Xujakulov, Rustam² – Doctor of Technical Sciences, Professor;

Tursunov, Feruz² - Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD), docent.

¹ Bukhara State Technical University, Bukhara city, Uzbekistan

² Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. *It is known that, despite the high accuracy of water balance forecasting, existing models such as AquaCrop, SWAP and HYDRUS do not fully take into account the relationship between water-salt balance and the effect of temperature limitations on root growth.*

Most current models describe the growth of the aboveground part of the plant separately from the physiological processes in the belowground part or use simplified empirical relationships. This limits their applicability in rapidly changing climates, as well as in areas with severely arid and degraded soils. Mathematical modeling based on a system of differential equations enables the integration of information on climate, soil composition, and plant physiology, thereby creating more

accurate tools for agronomic planning. Current trends in agroinformatics, including the creation of digital twins of agroecosystems, require the development of models that account for spatial and temporal changes in environmental parameters and nonlinear biophysical processes. Complex relationships between soil water-salt balance, temperature, and physiological processes require the development of mathematical models capable of predicting root system dynamics under stress. Modern challenges such as global warming, droughts, and soil salinization make this task even more urgent. This article presents a system of ordinary differential equations and a system of partial differential equations describing the interactions between root biomass $R(x,t)$, soil moisture $W(x,t)$, and salt concentration $S(x,t)$. The model takes into account temperature, evapotranspiration, and physiological constraints.

Keywords: *biosynthesis, mathematical model, water-salt balance, physiological process, differential equations, agroecosystems, biophysical process, root biomass, soil moisture, salt concentration.*

УДК: 626:627.631.624

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОСИНТЕЗА В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ-КЛИМАТ»

Самандарова Гавхар Аваз кизи¹ – докторант, (PhD);

Хужакулов Рустам² - доктор технических наук, профессор;

Турсунов Феруз Юлдошевич² - доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент.

¹ Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

² Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. *Известно, что, несмотря на высокую точность прогнозирования водного баланса, существующие модели, такие как AquaCrop, SWAP и HYDRUS, не в полной мере учитывают взаимосвязь между водно-солевым балансом и влиянием температурных ограничений на рост корней. Большинство современных моделей описывают рост надземной части растения отдельно от физиологических процессов в подземной части или используют упрощенные эмпирические зависимости. Это ограничивает их применимость в условиях быстро меняющегося климата, а также в районах с сильно засушливыми и деградированными почвами. Математическое моделирование на основе системы дифференциальных уравнений позволяет интегрировать информацию о климате, составе почвы и физиологии растений, создавая тем самым более точные инструменты для агротехнического планирования. Современные тенденции в агроинформатике, включая создание цифровых двойников агроэкосистем, требуют разработки моделей, учитывающих пространственные и временные изменения параметров окружающей среды и нелинейные биофизические процессы. Сложные взаимосвязи между водно-солевым балансом почвы, температурным режимом и физиологическими процессами требуют создания математических моделей, способных прогнозировать динамику корневой системы в условиях стресса. Современные вызовы, такие как глобальное потепление, засухи и засоление почв, делают эту задачу еще более актуальной.*

В данной статье представлена система обыкновенных дифференциальных уравнений и система дифференциальных уравнений с частными производными, описывающая взаимодействие между биомассой корней $R(x,t)$, влажностью почвы $W(x,t)$ и концентрацией соли $S(x,t)$. Модель учитывает температурный фактор, эвапотранспирацию и физиологические ограничения.

Ключевые слова: *биосинтез, математическая модель, водно-солевой баланс, физиологический процесс, дифференциальные уравнения, агроэкосистемы, биофизический процесс, биомасса корней, влажность почвы, концентрация соли.*

Kirish

O‘simliklarning ildiz tizimining rivojlanishi tashqi muhit o‘zgarishlariga moslashish mexanizmining eng muhim tarkibiy qismidir. Ushbu tizim nafaqat o‘simlikning barqarorligini ta‘minlaydi, balki uning biomassasini shakllantirishda, oziqa elementlari va suvni o‘zlashtirishda,

shuningdek rizofera mikrobiomasini tartibga solishda markaziy rol o'ynaydi. Iqlim sharoitlarining murakkablashib borishini — xususan, qurg'oqchiliklarning chastotasi va intensivligining ortishi, haroratlarning ko'tarilishi va tuproqlarning sho'rlanishini — inobatga olgan holda, agroekologiyada miqdoriy yondashuvlarga o'tish zaruriyati nihoyatda dolzarb bo'lib bormoqda.

O'simliklarning yer osti qismlariga iqlim omillarining ta'sirini tushunish, ayniqsa suv ta'minoti cheklangan sharoitlarda, alohida ahamiyat kasb etadi. Evapotranspiratsiya (ET) — ya'ni tuproqdan bug'lanish va barglar orqali transpiratsiyaning yig'indisi — yog'ingarchilik yetishmaydigan sharoitlarda namlik yo'qotilishining asosiy kanali bo'lib, suv-mineral muvozanatiga tanqidiy yuklama hosil qiladi. Harorat rejimi esa o'z navbatida metabolizmga, jumladan, fermentativ faollik, fotosintez, nafas olish jarayoni va to'qimalarning o'sish tezligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Ilmiy muammoning qo'yilishi. AquaCrop, SWAP va HYDRUS kabi mavjud modellar suv balansini prognozlashda yuqori aniqlikka ega bo'lishiga qaramay, suv-tuz muvozanati bilan harorat cheklovlarining ildiz o'sishiga ta'siri o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni yetarlicha to'liq integratsiya qilmaydi. Zamonaviy modellarining aksariyati o'simlikning yer usti qismining o'sishini yer osti fiziologik jarayonlaridan ajratilgan holda tasvirlaydi yoki soddalashtirilgan empirik bog'lanishlardan foydalanadi. Bu esa ularning tez o'zgarayotgan iqlim ssenariylari sharoitida, shuningdek yuqori darajada qurg'oqchil va degradatsiyaga uchragan tuproqli hududlarda qo'llanish imkoniyatini cheklaydi.

Differensial tenglamalar tizimiga asoslangan matematik modellashtirish iqlim [7], tuproq tarkibi va o'simlik fiziologiyasiga oid ma'lumotlarni integratsiya qilish imkonini beradi va shu orqali agrotexnologik rejalashtirish uchun aniqroq vositalarni yaratadi. Agroinformatikadagi zamonaviy tendensiyalar, jumladan agroekotizimlarning raqamli egizaklarini yaratish, muhit parametrlarining makon-vaqt bo'yicha o'zgarishlarini hamda noxatti (nolinear) biofizik jarayonlarni hisobga oladigan modellarni ishlab chiqishni talab etadi.

Tuproqning suv-tuz balansi, harorat rejimi va fiziologik jarayonlar o'rtasidagi murakkab o'zaro bog'liqlik stress sharoitida ildiz tizimi dinamikasini bashorat qila oladigan matematik modellarni yaratishni talab etadi [10]. Global isish, qurg'oqchiliklar va tuproqlarning sho'rlanishi kabi zamonaviy chaqiriqlar ushbu vazifani yanada dolzarb qilmoqda.

Modelning qo'yilishi. Ushbu ishda ildiz biomassasi $R(x,t)$, tuproq namligi $W(x,t)$ va tuzlar konsentratsiyasi $S(x,t)$ o'rtasidagi o'zaro ta'sirni tasvirlaydigan oddiy va xususiy hosilali differensial tenglamalar tizimi keltiriladi. Modelda harorat omili, evapotranspiratsiya hamda fiziologik cheklovlar inobatga olingan.

Model quyidagilarni hisobga oladi:

Ildizlarning o'sish tezligining haroratga nolinear bog'liqligi (Gauss funksiyalari orqali);

Tuzlarning o'zlashtirilishini Mixaelis–Menten tenglamasi asosida;

Evapotranspiratsiyaning tuproq namligiga ta'sirini Penman–Monteith koeffitsiyentlari orqali;

$W(x)$, $R(x)$, $S(x)$ funksiyalar taqsimotini tasvirlash uchun chuqurlik bo'yicha (makondagi) gradientlarni;

Jismoniy cheklovlarni aks ettiruvchi chegaraviy va boshlang'ich shartlarni (ildizlarning kirib borish chuqurligi, bug'lanish, namlikning kapillyar ko'tarilishi).

Uslub va materiallar

Ildiz tizimi rivojlanishini modellashtirish. Ildiz tizimlari dinamikasini o'rganish agroekologiya va iqlim modellashtirish doirasida faol rivojlanmoqda. An'anaviy yondashuvlar, masalan AquaCrop va SWAP modellarida, suv balansi va transpiratsiya jarayonlari asosiy e'tibor markazida bo'ladi, biroq ular kamdan-kam hollarda sho'rlanish va harorat stressi bilan bog'liq o'zaro ta'sirni hisobga oladi [1, 2]. Ayrim tadqiqotlarda ildiz o'sishini tavsiflash uchun differensial tenglamalardan foydalaniladi, ammo ular statsionar sharoitlar yoki soddalashtirilgan harorat funksiyalari bilan cheklanadi [3, 8].

Harorat omilini hisobga olish. Harorat rejimi o'simliklarning metabolik jarayonlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ildiz o'sishi uchun optimal harorat turga

qarab 15°C dan 30°C gacha o'zgaradi [4, 11]. Harorat stressini hisobga oladigan modellar odatda o'sishning ekstremal haroratlarda susayishini tavsiflash uchun Gauss funksiyalaridan yoki chegaraviy qiymatlardan foydalanadi [5]. Biroq ularning aksariyati haroratga bog'liq jarayonlarni suv-tuz balansi bilan integratsiya qilmaydi.

Tuproq sho'rlanishini hisobga olish. Tuproqning sho'rlanishi qishloq xo'jaligi ekinlari mahsuldorligining pasayishiga olib keladigan asosiy omillardan biridir. Ildizlar tomonidan tuzlarning o'zlashtirilishini hisobga oluvchi modellar odatda jarayonni to'yinish funksiyalari, xususan Mixaelis–Menten tenglamasi orqali tavsiflaydi [6]. Biroq sho'rlanish, namlik va harorat o'rtasidagi o'zaro ta'sir kamdan-kam hollarda kompleks ravishda modellashtiriladi, bu esa mavjud yondashuvlarning qo'llanish imkoniyatini cheklaydi.

Evopotranspiratsiyani hisobga olish. Evapotranspiratsiya (ET) suv balansini modellashtirishda muhim omil hisoblanadi. AquaCrop va Penman–Monteith kabi modellar transpiratsiya hamda bug'lanishni prognozlashda ETdan faol foydalanadi [9, 12]. Biroq ETning ildiz tizimi dinamikasi va tuproq sho'rlanishi bilan integratsiyasi yetarli darajada ishlab chiqilmagan. Bizning ishimiz ushbu bo'shliqni to'ldirib, ETni o'simliklarning fiziologik jarayonlari bilan birlashtiradi.

Matematik modellashtirish bo'yicha taklif etilayotgan islanmalar. Sonli modellashtirish sohasidagi so'nggi yutuqlar namlik va tuzlarning makondagi taqsimotini o'z ichiga olgan yanada realistik tizimlar yaratishga imkon berdi [7]. Biroq dala sharoitida, ma'lumotlar cheklangan bo'lganda, hisoblash samaradorligi sababli ODE (oddiy differensial tenglamalar) asosidagi modellar afzal hisoblanadi. Bizning ishimiz ushbu yondashuvni rivojlantirib, iqlim omillari, suv-tuz balansi va o'simlik fiziologiyasini yagona dinamik tizimga birlashtiradi. Quyida keltirilgan model nafaqat o'simliklarning fiziologik xususiyatlarini, balki tashqi sharoitlar bilan ichki jarayonlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni ham hisobga oladi. Model iqlim yoki sug'orish rejimidagi o'zgarishlar ildiz tizimi rivojlanishini hisobga olgan holda «tuproq–o'simlik–iqlim» tizimiga qanday ta'sir ko'rsatishini bashorat qilish imkonini beradi. Bu esa qishloq xo'jaligi, ekologiya va iqlim tadqiqotlari uchun ayniqsa muhimdir [8]. Oddiy differensial tenglamalar tizimi uchta o'zgaruvchining dinamikasini tavsiflaydi: $R(t)$ — ildiz biomassasi, $W(t)$ — tuproq namligi, $S(t)$ — tuzlar konsentratsiyasi:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = \alpha \frac{W(t)}{K_W + W(t)} \left(\frac{ET(t)}{K_{ET} + ET(t)} \right) e^{-\frac{(T(t) - T_{opt-R})^2}{\sigma_R^2}} R(t) - \delta_R R(t) \\ \frac{dW}{dt} = -\beta \frac{W(t)}{K_W + W(t)} e^{-\frac{(T(t) - T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}} - \gamma R(t) \frac{W(t)}{K_R + W(t)} \left(\frac{ET(t)}{K_{ET} + ET(t)} \right) e^{-\frac{(T(t) - T_{opt-T})^2}{\sigma_T^2}} \\ \frac{dS}{dt} = -\mu R(t) \frac{S(t)}{K_S + S(t)} \left(\frac{ET(t)}{K_{ET} + ET(t)} \right) e^{-\frac{(T(t) - T_{opt-S})^2}{\sigma_S^2}} - \delta_S S(t) \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda: α — ildizlarning maksimal o'sish tezligi, 1/kun; β va γ — tuproq yuzasidan va barg yuzasidan bug'lanish tezligi, mm/kun; K_W va K_{ET} — tuproq va barg yuzalaridan bug'lanish jarayonida tuproq namligining sarfini hisobga oluvchi koeffitsiyentlar [10, 11]; T_{opt-R} , T_{opt-E} , T_{opt-T} , T_{opt-S} — ildizlarning rivojlanishi, tuproq va barg yuzalaridan bug'lanish hamda tuzlarning migratsiyasi uchun optimal tuproq harorati (°C); σ_{opt-R} , σ_{opt-E} , σ_{opt-T} , σ_{opt-S} — ildiz rivojlanishi, tuproq va barg yuzalaridan bug'lanish hamda tuzlarning migratsiyasi uchun harorat optimal diapazoni (°C); δ_R — ildiz tizimining susayishini (mexanik shikastlanish, qarish va boshqalar) hisobga oluvchi koeffitsiyent [12]; μ — o'simlik ildizlari tomonidan tuzlarning o'zlashtirilish tezligi.

Ildiz biomassasi $R(x,t)$, tuproq namligi $W(x,t)$ va tuproqdagi tuzlar $S(x,t)$ dinamikasini makondagi taqsimot (chuqurlik xxx)ni hisobga olgan holda tasvirlash uchun (1)-tizim quyidagi ko'rinishga ega bo'lgan xususiy hosilali differensial tenglamalar (XHDT) ko'rinishini oladi:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR}{dt} = D_R \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \alpha \frac{W}{K_W+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-R})^2}{\sigma_R^2}} R(t) - \delta_R R(t) \\ \frac{dW}{dt} = D_W \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \beta \frac{W}{K_W+W} e^{-\frac{(T-T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}} - \gamma R \frac{W}{K_R+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-T})^2}{\sigma_T^2}} \\ \frac{dS}{dt} = D_S \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \mu R \frac{S}{K_S+S} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{\sigma_S^2}} - \delta_S S \end{array} \right. \quad (2)$$

Ildiz biomassasi $R(x,t)$ uchun quyidagi chegaraviy shartlarni kiritamiz. Bu shartlar shuni ko'rsatadiki, tuproq yuzasida $x=0$ da: $\frac{\partial R}{\partial x}=0$, ya'ni ildizlar tuproq chegarasidan tashqariga chiqmaydi. Boshqa tomondan, ildizlar cheksiz chuqurlikka qadar tarqalmaydi — ularning o'sishi tuproqning jismoniy xususiyatlari va suvning mavjudligi bilan chegaralanadi. Shu sababli ma'lum bir chuqurlikda $x=L$: $R(L,t)=0$. ya'ni ildizlar bu chuqurlikdan pastga o'tmaydi.

Tuproq namligi ($W(x,t)$) uchun chegaraviy shartlar: tuproq yuzasida $x=0$: $W(0, t)=W_0$, ya'ni sug'orish yoki yog'ingarchilik natijasida yuzada shakllangan namlik miqdori. Chuqurlikda ($x=L$): $\frac{\partial W}{\partial x} = 0$, ya'ni yetarlicha katta chuqurlikda ildizlar mavjud emasligi sababli namlik dinamikasining fazoviy o'zgarishi nol deb qabul qilinadi.

Tuzlar konsentratsiyasi ($S(x,t)$) uchun chegaraviy shartlar: yuzada $x=0$: $S(0,t)=S_0$, ya'ni yuzadagi boshlang'ich tuz konsentratsiyasi. Chuqurlikda $x=L$: $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$, chunki sho'rlanish ko'pincha bug'lanish tufayli yuzada to'planadi va chuqurlikda konsentratsiya barqaror hisoblanadi.

Yuqorida keltirilgan chegaraviy shartlarni inobatga olgan holda statsionar rejim uchun hisoblash qilamiz,

$$\left(\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \right)$$

ya'ni fazoviy hosilalar nolga teng deb olinadi.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_R \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \alpha \frac{W}{K_W+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-R})^2}{\sigma_R^2}} R - \delta_R R = 0 \\ D_W \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \beta \frac{W}{K_W+W} e^{-\frac{(T-T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}} - \gamma R \frac{W}{K_R+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-T})^2}{\sigma_T^2}} = 0 \\ D_S \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \mu R \frac{S}{K_S+S} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{\sigma_S^2}} - \delta_S S = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Tuproq namligi $W(x)$ uchun analitik yechimni soddalashtirilgan holatda, ya'ni $R=0$ (transpiratsiyasiz) sharoitda ko'rib chiqamiz:

$$D_W \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \beta \frac{W}{K_W+W} e^{-\frac{(T-T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}} = 0 \quad (4)$$

Faraz qilamizki, $\frac{W}{K_W+W} \approx \frac{W}{K_W}$ ((ya'ni past namlik sharoitida, $W \ll K_W$), unda:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\beta}{D_W} \frac{W}{K_W} e^{-\frac{(T-T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}} = 0 \quad (5)$$

Quyidagi belgilashni kiritamiz:

$$k_W = \sqrt{\frac{\beta}{D_W K_W} e^{-\frac{(T-T_{opt-E})^2}{\sigma_E^2}}} \quad (6)$$

Shunda umumiy yechim quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$W(x) = A e^{k_W x} + B e^{-k_W x}$$

Chegaraviy shartni qo'llaymiz: $W(0)=W_0$, yoki

$$W(0)=A+B=W_0. \quad (7)$$

Va quyidagi shartni ham qo'llaymiz, ya'ni $x=L$:

$$\frac{\partial W(L)}{\partial x} = A k_W e^{k_W L} - A B e^{-k_W L} = 0. \quad (8)$$

shundan kelib chiqadiki,

$$A = \frac{W_0}{1+e^{2kWL}} \quad (7)$$

Shuningdek,

$$B = \frac{W_0 e^{2kWL}}{1+e^{2kWL}} \quad (8)$$

Yuqorida keltirilganlardan kelib chiqib, ildizlar qatlamidagi namlikning chuqurlik bo'yicha dinamikasi quyidagi formula bo'yicha o'zgaradi:

$$W(x) = \frac{W_0}{1+e^{2kWL}} [e^{kwx} + e^{kW(2L-x)}] \quad (9)$$

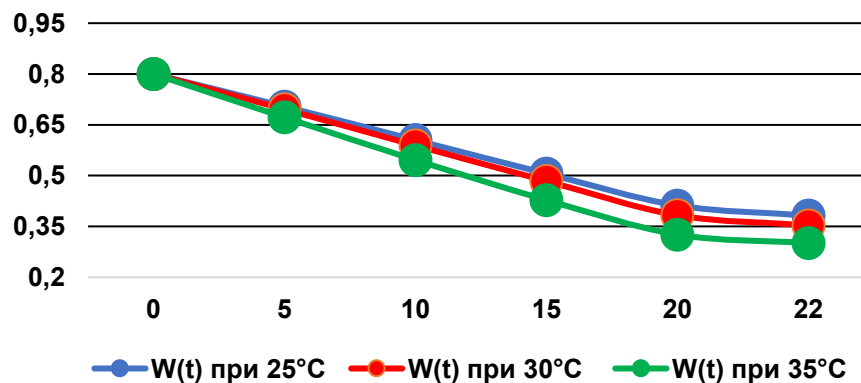
Grafik paxtaning harorat sharoitlariga sezgirligini aks ettiradi. 25 °C da ildizlar suvni faol o'zlashtirib, yer usti qismining o'sishini qo'llab-quvvatlaydi, biroq yetarli namlik mavjud bo'lishi zarur. 30–35 °C da esa evapotranspiratsiyaning (ET) ortishi suv tanqisligini keltirib chiqaradi, bu esa mahsuldorlikning pasayishiga olib keladi. Modelda ET omilining hisobga olingani grafik orqali tasdiqlanadi: 35 °C da namlik yo'qotilishi eng yuqori bo'lib, moslashuv choralarini (masalan, tomchilatib sug'orish) talab etadi.

Grafik tuproqning nisbiy namligi vaqt davomida qanday kamayishini ko'rsatadi. Ushbu pasayish ikki asosiy omil ta'sirida yuz beradi: ildiz biomassasi va haroratga bog'liq bo'lgan suv o'zlashtirilishi hamda harorat oshishi bilan kuchayadigan evapotranspiratsiya.

Boshlang'ich davrda (0-kun) barcha haroratlar uchun tuproq namligi bir xil — 0,800 bo'lib, bu yaxshi namlangan tuproq holatini anglatadi. 22-kunga kelib namlik 25 °C da 0,382 gacha, 30°C da 0,353 gacha va 35 °C da 0,301 gacha kamayadi hamda paxtada suv tanqisligi yuzaga keladigan kritik darajaga yaqinlashadi. Harorat qanchalik yuqori bo'lsa, namlik shunchalik tez kamayadi, chunki namlik yo'qotilishining ikki mexanizmi — ildizlar tomonidan suv o'zlashtirilishi va evapotranspiratsiya — harorat oshishi bilan kuchayadi.

25°C da deyarli optimal sharoit kuzatiladi: ildizlarning o'sish tezligi maksimalga yaqin (0,986), ET esa o'rtacha darajada (0,04). Namlik 0,800 dan 0,382 gacha kamayadi. Dastlabki 5 kunda namlik 12 % ga, 10-kunda 24 % ga, 15-kunda esa 37 % ga kamayadi. 15 kundan keyin kamayish sur'ati sekinlashadi, chunki ildizlarning o'sishi to'yinish bosqichiga yetadi. Bu qulay rejim hisoblanadi, biroq 20–22 kunlarda sug'orish talab etiladi.

30°C da o'rta darajadagi issiqlik stressi kuzatiladi: ildizlarning o'sish tezligi pastroq (0,801), ET esa yuqoriroq (0,05). Namlik 0,800 dan 0,353 gacha kamayadi. Dastlabki 10 kunda namlik yo'qotilishi 25 °C dagiga qaraganda yuqoriroq, ayniqsa ETning kuchayishi tufayli. 15-kunda namlik 0,484 ni tashkil etadi, 22-kunda esa 0,353 gacha tushadi. Bu sharoitda har 10–15 kunda sug'orish tavsiya etiladi.



4.1-rasm. G'ozda ildizlarining o'sishi davrida (0–22 kun) tuproqning nisbiy namligi o'zgarishi grafigi

35°C da kuchli issiqlik stressi kuzatiladi: ildizlarning o'sish tezligi ancha pasaygan (0,325), ET esa yuqori (0,06). Namlik 0,800 dan 0,301 gacha tushadi. Dastlabki 10 kunda namlik yo'qotilishi maksimal bo'ladi, 15-kunda esa namlik kritik qiymatga (0,428) yaqinlashadi. 22-kunda namlik 0,301 gacha tushadi, bu esa o'simlikning so'lish chegarasiga juda yaqin. Bunday sharoitda zudlik bilan sug'orish choralarini ko'rish zarur.

Shu tariqa, grafik tahlili haroratning ildizlarning o'sishi va evapotranspiratsiya orqali suv balansiga kompleks ta'sir ko'rsatishini tasdiqlaydi. Yuqori haroratlarda sug'orish rejimiga alohida e'tibor qaratish zarur.

Ildiz biomassasi $R(x,t)$ uchun stasionar holatdagi (3)-tizimning birinchi tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$D_R \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \alpha \frac{W}{K_W+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-R})^2}{\sigma_R^2}} R - \delta_R R = 0 \quad (10)$$

Quyidagi belgilashni kiritamiz:

$$k_R^2(x) = \frac{1}{D_R} \left[\alpha \frac{W}{K_W+W} \left(\frac{ET}{K_{ET}+ET} \right) e^{-\frac{(T-T_{opt-R})^2}{\sigma_R^2}} - \delta_R \right].$$

Shunda (10)-tenglama quyidagi ko'rinishni oladi:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} - k_R^2(x)R(x) = 0 \quad (11)$$

Faraz qilamizki, $k_R(x)=k_R$ — ya'ni koeffitsiyent doimiy. Unda umumiy yechim quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$R(x) = A \cos(k_R x) + B \sin(k_R x).$$

Yuza (tuproq sathi) uchun chegaraviy shartlarni qo'llaymiz ($x=0$):

$$\frac{\partial R}{\partial x}(0) = k_R(R_{max} - R(0))$$

O'rniga qo'yamiz $R(x)$:

$$-A k_R \sin(0) + B k_R \cos(0) = k_R(R_{max} - A \cos(0) - B \sin(0))$$

Ushbu ifodani soddalashtiramiz:

$$B k_R = k_R(R_{max} - A)$$

Shundan kelib chiqadiki, $B = R_{max} - A$

Chuqurlikdagi ikkinchi chegaraviy shartni qo'llaymiz ($x=L$):

$$\frac{\partial R}{\partial x}(L) = 0$$

yoki

$$-A k_R \sin(k_R L) + B k_R \cos(k_R L) = 0$$

k_R ga bo'lamiz va o'rniga qo'yamiz: $B = R_{max} - A$

$$-A k_R \sin(k_R L) + (R_{max} - A) k_R \cos(k_R L) = 0$$

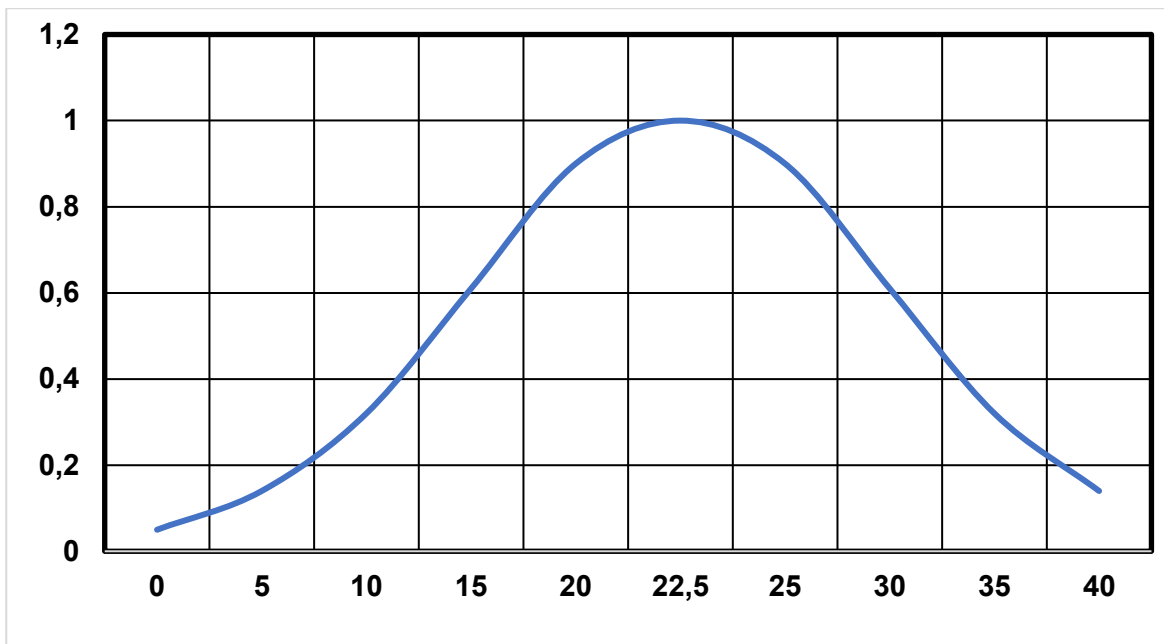
A ni nisbatan yechamiz:

$$A = \frac{R_{max} \cos(k_R L)}{\sin(k_R L) + \cos(k_R L)}$$

A va B qiymatlarini $R(x)$ ifodasiga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$R(x) = R_{max} \frac{\cos(k_R L - k_R x)}{\sin(k_R L) + \cos(k_R L)} \quad (12)$$

4.2-rasmdagi grafik tahlili shuni ko'rsatadiki, 0–5°C oralig'ida nisbiy o'sish tezligi deyarli nolga teng (0,01–0,03). Bu paxta uchun kritik sharoit bo'lib, past haroratlar hujayra bo'linishini va fermentativ jarayonlarni, jumladan ildiz o'sishiga mas'ul bo'lgan auksinlar sintezini susaytiradi. 10–15°C oralig'ida o'sish tezligi past (0,09–0,28). Bu paxta o'sadigan salqin mintaqalardagi vegetatsiyaning dastlabki bosqichlariga mos keladi, bunda paxta kuchsiz ildiz tizimini rivojlantiradi va resurslar uchun raqobat qobiliyati kamayadi. 20–26°C diapazonida o'sish tezligi tez sur'atda oshadi (0,61–1,00). 26°C da maksimal qiymatga erishiladi, bu paxta uchun eng qulay sharoit hisoblanadi. Bunday haroratda ildizlar faol rivojlanib, biomassasi va chuqurlikka kirib borish qobiliyati oshadi, natijada suv va ozuqa moddalari o'zlashtirilishi yaxshilanadi. 25–30°C oralig'ida o'sish tezligi yuqori darajada saqlanadi (0,98–2,27). Bu O'zbekistondagi paxta dalalarining ko'pchiligiga, jumladan mamlakatning janubiy hududlariga xos tipik harorat diapazonidir.



4.2-rasm. Nisbiy ildiz tizimi rivojlanishining haroratga bog'liqligi grafiqi.

35°C da o'sish tezligi 0,35 gacha kamayadi. Yuqori harorat ildizlarning nafas olish jarayonini kuchaytiradi, natijada o'sish uchun zarur bo'lgan uglevodlarning mavjudligi kamayadi, shuningdek evapotranspiratsiya ortib, suv tanqisligini kuchaytiradi. 40°C da o'sish tezligi 0,14 gacha pasayadi — bu kritik daraja bo'lib, bunday issiqlik stressi ildizlarning nobud bo'lishiga va membrana strukturalarining buzilishiga olib kelishi mumkin, ayniqsa arid hududlarda.

Paxta uchun 30–40°C oralig'idagi yuqori ET suv stressini yanada kuchaytiradi, ayniqsa ekstremal haroratlarda ildiz o'sish tezligi past bo'lgani sababli ildiz tizimi zaiflashgan bo'lsa. Grafik shuni ko'rsatadiki, 35°C da o'sish tezligi maksimal qiymatning atigi 46 % ini tashkil etadi, bu esa ildizlarning suv yo'qotilishini qoplash qobiliyatini cheklaydi.

Global isish sharoitida, paxta yetishtiriladigan mintaqalarda o'rtacha harorat 30–35°C atrofida shakllanishi mumkin bo'lgan holatda, grafik ildiz tizimi produktivligining mumkin bo'lgan pasayishga ishora qiladi. Bu esa moslashuvchan agrotexnologiyalarni ishlab chiqishni talab etadi, masalan, sug'orish tizimlarini optimallashtirish yoki optimal harorati yuqoriroq bo'lgan navlarni seleksiya qilish.

Statsionar holat va diffuziya mavjud bo'lmagan sharoitda ($D_S=0$) (3)-tizimning uchinchi tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\mu R \frac{S(x)}{K_S + S(x)} \left(\frac{ET}{K_{ET} + ET} \right) e^{-\frac{(T - T_{opt})^2}{\sigma_S^2}} + \delta_S S(x) = 0 \quad (13)$$

Faraz qilamizki, $S(x)$ nolga teng emas, va (13)-tenglamaning har ikki tomonini $S(x)$ ga bo'lamiz:

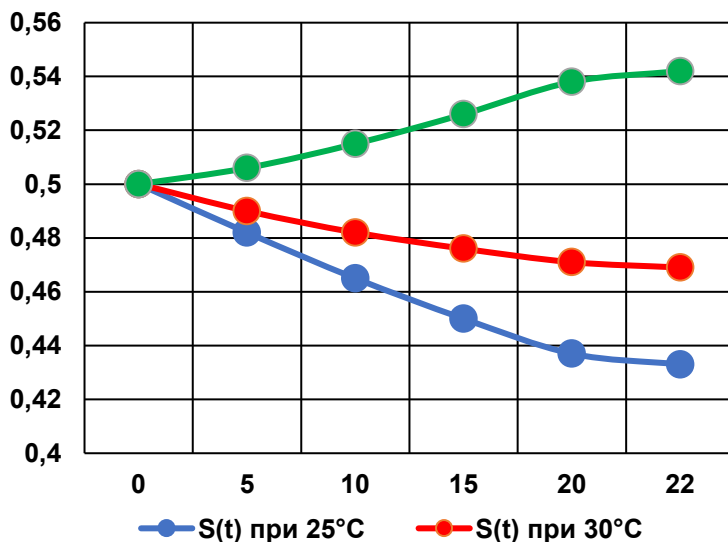
$$-\mu R(x) \frac{1}{K_S + S(x)} \left(\frac{ET}{K_{ET} + ET} \right) e^{-\frac{(T - T_{opt})^2}{\sigma_S^2}} = \delta_S \quad (14)$$

Quyidagi kattalik (o'zgaruvchi) bo'yicha yechamiz $S(x)$:

$$K_S + S(x) = -\frac{\mu R(x) \left(\frac{ET}{K_{ET} + ET} \right) e^{-\frac{(T - T_{opt})^2}{\sigma_S^2}}}{\delta_S} \quad (15)$$

yoki

$$S(x) = -\frac{\mu R(x) \left(\frac{ET}{K_{ET} + ET} \right) e^{-\frac{(T - T_{opt})^2}{\sigma_S^2}}}{\delta_S} - K_S \quad (16)$$



4.3 - rasm.G'o'za ildiz tizimi rivojlanishini hisobga olgan holda tuproq sho'rlanishi dinamikasi.

25°C haroratda deyarli optimal rejim kuzatiladi. Tuzlar konsentratsiyasi 22 kun ichida 0,500 dan 0,433 g/m² gacha kamayadi. Bu ildizlarning faol o'sishi natijasida tuzlarning o'zlashtirilishi kuchayishi, shuningdek, o'rtacha darajadagi namlik tuzlarning yuvilish jarayonini qo'llab-quvvatlashi bilan izohlanadi. Bug'lanishning past intensivligi namlikning saqlanishiga va tuzlarning barqaror yuvilishiga yordam beradi. Bunday sharoitda paxta o'zining tuz

balansini samarali tartibga soladi va vegetatsiya uchun qulay muhit shakllanadi. Biroq 20–22 kunlarga kelib, tuzlarning yanada yuvilishini ta'minlash uchun sug'orish talab etiladi.

30°C haroratda o'rta darajadagi issiqlik stressi kuzatiladi. Tuzlar konsentratsiyasi juda oz miqdorda — 0,500 dan 0,469 g/m² gacha kamayadi. Ildizlarning o'sishi sekinlashgani sababli tuzlarning o'zlashtirilishi cheklanadi, evapotranspiratsiyaning kuchayishi va namlikning kamayishi esa tuzlarning yuvilishini kamaytiradi. Natijada tuproqning yuqori qatlamida tuzlarning to'planish xavfi ortadi. Osmotik stressning oldini olish uchun har 10–15 kunda muntazam sug'orish talab etiladi.

35°C haroratda kuchli issiqlik stressi yuzaga keladi. Tuzlar konsentratsiyasi ortadi — 0,500 dan 0,542 g/m² gacha. Bu ildizlarning o'sish tezligi juda past bo'lishi, namlikning kamayishi va intensiv evapotranspiratsiya natijasida tuzlarning tuproq yuzasida cho'kishi bilan izohlanadi. Ildiz tizimining sust rivojlanishi va suv tanqisligi tuz stressini kuchaytiradi hamda o'simlikning mahsuldorligini pasaytiradi. Bunday sharoitda intensiv tomchilatib sug'orish va sho'rlanishga chidamli navlardan foydalanish zarur.

Haroratning sho'rlanishga ta'siri quyidagicha namoyon bo'ladi: 25°C da ildizlarning faol o'sishi va yetarli namlik hisobiga sho'rlanish kamayadi. 30°C da evapotranspiratsiya va o'rtacha o'sish o'rtasidagi muvozanat sababli tuzlar konsentratsiyasi barqarorlashadi. 35°C da esa tuzlar to'planadi va tuz stressi kuchayadi.

Amaliy ahamiyati quyidagilardan iborat:

25°C da 20–22 kunlarga kelib sug'orish talab etiladi;

30°C da har 10–15 kunda sug'orish tavsiya etiladi;

35°C da sho'rlanishning oldini olish uchun har 7–10 kunda sug'orish zarur.

Agrotexnik chora-tadbirlar tarkibiga namlik yo'qotilishini kamaytirish uchun tomchilatib sug'orish va mulchalash, shuningdek sho'rlanishga chidamli navlarni seleksiya qilish kiradi. Global isish sharoitida, haroratlar tez-tez 35°C gacha yetadigan hududlarda sho'rlanish jarayonlarini modellashtirish suv resurslaridan oqilona foydalanish va barqaror dehqonchilikni ta'minlash uchun strategik ahamiyat kasb etadi.

Xulosa

1. Model turli xil iqlim va fiziologik omillarning — evapotranspiratsiya, harorat va sho'rlanishning — o'simlik ildiz tizimining rivojlanishiga ta'sirini muvaffaqiyatli birlashtiradi. Mixaelis–Menten funksiyasi va harorat bo'yicha optimal diapazonlar kabi chiziqli bo'lmagan bog'lanishlardan foydalanish mavjud yondashuvlarga nisbatan prognozlarning aniqligini sezilarli darajada oshirdi.

2. Ishlab chiqilgan bog'lanishlar tuproq holatining uzoq muddatli o'zgarishlarini baholash imkonini beradi, jumladan degradatsiya, sho'rlanish va namlikni yo'qotish jarayonlarini. Ushbu

imkoniyatlar modelni qishloq xo‘jaligi tizimlarining raqamli egizaklarini yaratish va barqaror yer resurslaridan foydalanishga o‘tish uchun qimmatli vosita qiladi.

3. Uchrashilgan kompleks tenglamalar tizimi tuproq namligi, evapotranspiratsiya va haroratga bog‘liq holda ildiz tizimining rivojlanish dinamikasini tavsiflaydi. Stasionar sharoitlar uchun analitik yechim olindi, vaqt bo‘yicha dinamikani modellashtirishda esa sonli yondashuvlar — xususan, Runge–Kutta usuli qo‘llanildi. Bu turli ssenariylarni, shu jumladan qurg‘oqchilik, sho‘rlanish va harorat stressi kabi ekstremal sharoitlarni tahlil qilish imkonini beradi.

4. Modelning amaliy ahamiyati uning iqlim stresslarining oqibatlarini bashorat qilish, qishloq xo‘jaligi amaliyotlarini optimallashtirish va suv–tuz balansini boshqarish imkoniyatida namoyon bo‘ladi. Model ayrim cheklovlarga ega bo‘lsada, masalan parametrlarning makon bo‘yicha taqsimoti hisobga olinmagan bo‘lsa ham, u kelgusida rivojlantirish uchun istiqbolli asos bo‘lib xizmat qiladi. Modelni fazoviy ma‘lumotlar va iqlim ssenariylari bilan ishlash imkoniyatlari bilan to‘ldirish uni o‘zgaruvchan iqlim sharoitida barqaror qishloq xo‘jaligiga o‘tish uchun yanada samarali vosita qiladi.

Adabiyotlar

- [1] Гордиенко В.А., Гордиенко Л.В. Моделирование влагопереноса в почве при капельном орошении с использованием HYDRUS // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1350–1362.
- [2] Коваленко А.А., Смирнов А.С. Динамика почвенной влаги в условиях засух: моделирование и прогнозирование // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 102–115.
- [3] Лебедева М.П., Шеин Е.В. Современные методы оценки гидравлических характеристик почв // Eurasian Soil Science. 2023. Т. 56, № 5. С. 678–692.
- [4] Петров А.Н., Иванов К.С. Использование спутниковых данных Sentinel-1 для мониторинга влажности почвы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 2. С. 88–102.
- [5] Семенов В.М., Чекина Т.А. Влияние микробиологических процессов на водный режим почв // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1120–1129.
- [6] Федоренко А.И., Кузнецов О.Л. Эффективность капельного орошения в условиях дефицита воды // Вестник МГУ. Серия 5: География. 2021. № 3. С. 55–63.
- [7] Li, X., Zhou, Y., Zheng, Y. et al. Advances in modeling soil water dynamics under climate change: A review // Agricultural Water Management. 2023. Vol. 280. P. 108123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108123>
- [8] Vereecken, H., Huisman, J.A., Vanderborght, J. et al. Soil hydraulic properties and their estimation: A review of recent progress // Vadose Zone Journal. 2021. Vol. 20(2). P. 1–25. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20134>
- [9] Duan, Q., Huang, M., Liang, X. et al. The Community Land Model (CLM) version 5: Overview of new features and performance // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2022. Vol. 14(1). P. e2021MS002789. <https://doi.org/10.1029/2021MS002789>
- [10] Minasny, B., McBratney, A.B. Digital soil modeling: Past, present, and future // Geoderma. 2023. Vol. 429. P. 116345. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116345>
- [11] Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M. et al. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality // Water Resource Research. 2021. Vol. 57(8). P. e2020WR029420. <https://doi.org/10.1029/2020WR029420>
- [12] Zhang, Y., Yang, Y., Tang, Q. et al. Soil moisture retrieval from satellite observations: Advances and challenges // Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 297. P. 113789. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113789>