

О.В. Вольвач, к.геогр.н., **О.О. Дронова**, к.геогр.н., **О.Л. Жигайло**, к.геогр.н.
Одеський державний екологічний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВОДНОГО РЕЖИМУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Розглядається математична модель моніторингу умов зволоження сільськогосподарських угідь. За допомогою моделі дається кількісна оцінка впливу умов зволоження ґрунту на продуктивність озимої пшениці та кукурудзи на зерно в Одеській області.

Ключові слова: *математична модель, водний режим, ґрунт, богара, зрошення, урожайність*

Постанова проблеми. Основні райони родючих чорноземних ґрунтів в Україні розташовані у зонах нестійкого та недостатнього зволоження. Це обумовлює можливість виникнення таких несприятливих для сільського господарства явищ, як атмосферні та ґрунтові посухи, суховії та ін. Дані про урожайність сільськогосподарських культур на території держави показують її значну залежність від умов зволоження.

Ґрунтова волога є одним з найважливіших факторів, що визначають продуктивність агроєкосистем та умови обробки сільськогосподарських полів. Волога у зоні аерації – це основне джерело вологозабезпечення агроценозу.

Всі процеси, які відбуваються у ґрунті, в рослинному покриві і в атмосфері взаємопов'язані та взаємозумовлені. Тому ґрунт, рослини і атмосферу треба розглядати та описувати, тобто представляти як єдину математичну модель триланцюгової системи ґрунт-рослина-атмосфера (ГРА), у якій теплові та вологообмінні процеси є одним цілим. Випарування з ґрунту, транспірація, а також вологість ґрунту в цілому повинні бути складовими частинами цієї математичної моделі.

Основна мета досліджень. Розробити математичну модель, яка дозволить проводити моніторинг динаміки запасів продуктивної вологи в ґрунті (в метровому шарі по 10-ти см шарах) залежно від погодних умов певного року, а також від режиму зрошування сільськогосподарських культур.

Матеріали та методи дослідження.

Процес формування врожаю є складною сукупністю багатьох фізіологічних процесів, інтенсивність яких визначається біологічними особливостями рослин, факторами навколишнього середовища, взаємозв'язком між самими процесами.

Структура моделі визначається, виходячи із закономірностей формування гідрометеорологічного режиму у системі ґрунт – рослина – атмосфера і біологічних уявлень про ріст і розвиток сільськогосподарських культур під впливом чинників зовнішнього середовища. В основі моделі лежить система рівнянь радіаційного, теплового і водного балансів, балансу біомаси (вуглеводів та азоту) у рослинному покриві.

Основні концептуальні положення такі:

– ріст і розвиток рослин визначається генотипом і чинниками зовнішнього середовища;

– моделюється ріст рослин (накопичення сухої біомаси) шляхом розподілу продуктів фотосинтезу і поглинутих елементів мінерального живлення з урахуванням потреб для росту в асимілятах надземної і підземної частин рослин;

– моделюються радіаційний, тепловий і водний режими системи ґрунт – рослина – атмосфера;

– моделюється трансформація форм азоту в ґрунті та азотне живлення рослин;
 – моделюється гідроліз рослинної тканини при старінні рослин і в стресових умовах, а також перетікання продуктів гідролізу з листя, стебел, коренів у репродуктивні органи;

– моделюється вплив агрометеорологічних умов в основні міжфазні періоди сільськогосподарських культур на формування врожаю, втрати врожаю за рахунок засухи, а для зернових колосових культур – полягання посівів і "стікання" зерна.

Модель складається з 7 блоків (рис. 1).

Блок фотосинтезу. Фотосинтез розраховується за формулою

$$\Phi_0^j = \frac{k \cdot b \cdot I^j}{k + b \cdot I^j}, \quad (1)$$

де Φ_0^j – інтенсивність фотосинтезу за оптимальних умов теплоти і вологозабезпеченості в реальних умовах освітлення, $\text{мгСО}_2/(\text{дм}^2 \cdot \text{г})$; k – інтенсивність фотосинтезу при світловому насиченні та нормальній концентрації СО_2 , $\text{мгСО}_2/(\text{дм}^2 \cdot \text{г})$; b – початковий нахил світлової кривої фотосинтезу, $\text{мгСО}_2/(\text{дм}^2 \cdot \text{г})$; I – інтенсивність фотосинтетичної активної радіації (ФАР) всередині посіву, $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$; j – номер кроку розрахункового періоду.

Для розрахунку фотосинтезу в онтогенезі в реальних умовах середовища, які відрізняються від біологічно оптимальних, використовується вираз

$$\Phi_\tau^j = \Phi_0^j \cdot \alpha_\phi^j \cdot \psi_\phi^j \cdot \gamma_\phi^j, \quad (2)$$

$$\Phi_\tau^j = \alpha_\phi^j \Phi_0^j \frac{E^j}{E_0^j} \psi_\phi^j,$$

де Φ_τ^j – інтенсивність фотосинтезу в реальних умовах середовища, $\text{мгСО}_2/(\text{дм}^2 \cdot \text{г})$;

α_ϕ^j – онтогенетична крива фотосинтезу; ψ_ϕ^j , γ_ϕ^j – функції впливу факторів зовнішнього середовища, які представляють собою одновершинні криві.

Функції α_ϕ^j , ψ_ϕ^j , γ_ϕ^j – нормовані та змінюються від 0 до 1.

Сумарний фотосинтез посіву за світлу пору доби розраховується за формулою

$$\Phi^j = \varepsilon \Phi_\tau^j L^j \tau_g^j, \quad (3)$$

де Φ – денний фотосинтез посіву на одиницю площі, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$; $\varepsilon = 0,68$ – коефіцієнт ефективності фотосинтезу; L – площа листя $\text{м}^2/\text{м}^2$; τ – тривалість дня, год.

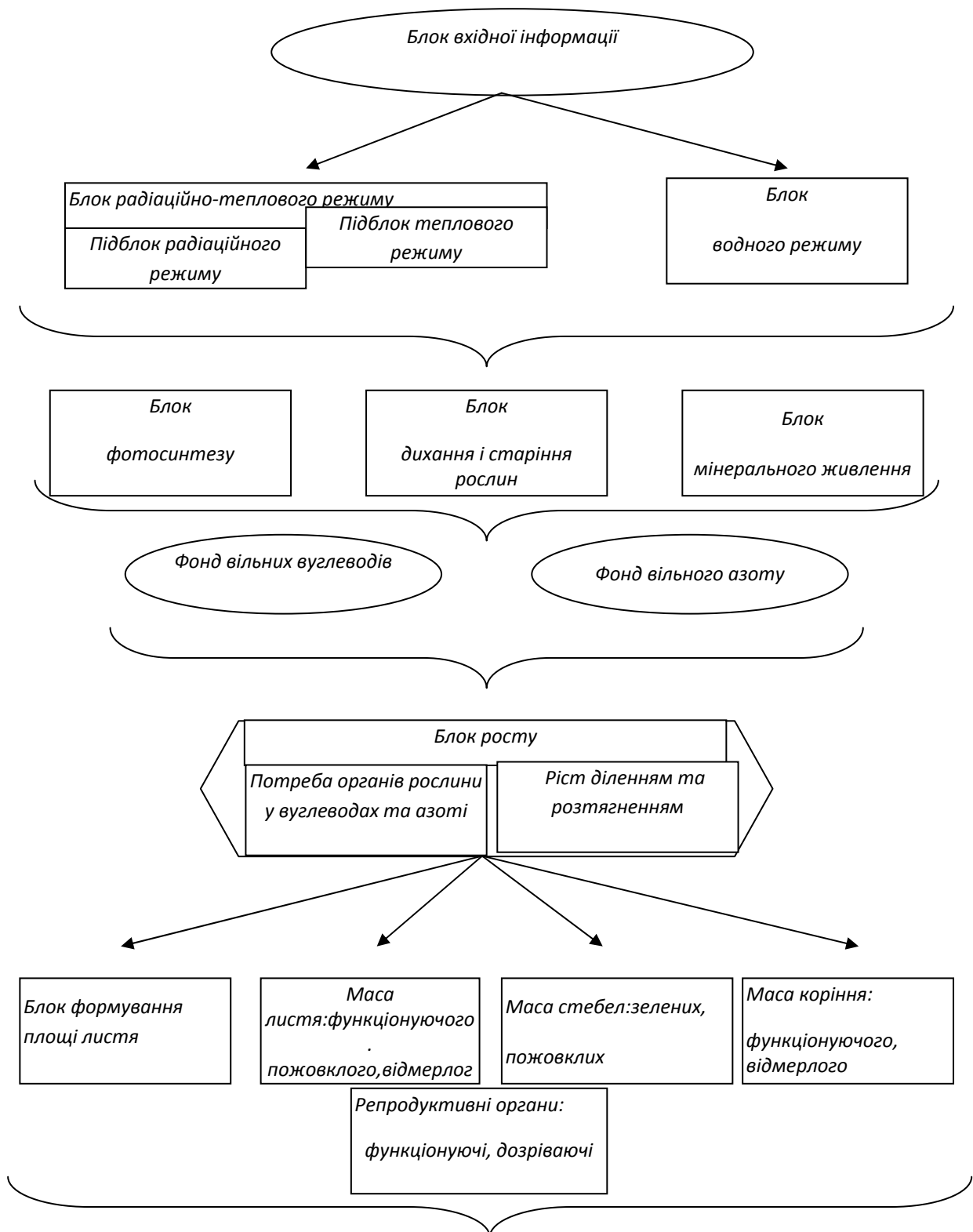


Рис. 1 – Блок – схема динамічної моделі водного режиму сільськогосподарських культур.

Блок дихання. На відміну від процесу фотосинтезу здатність до дихального газообміну мають всі органи рослини. Витрати на дихання, пов'язане з підтримкою структурної організації тканин, і на дихання, пов'язане з переміщенням речовин, фотосинтезом та створенням нових структурних одиниць, визначаються з рівняння

$$R^j = \alpha_R^j (c_1 M^j + c_2 \Phi^j), \quad (4)$$

де R – витрати на дихання, г/м²; α_R – онтогенетична крива дихання; c_1 – коефіцієнт, який характеризує витрати на підтримку структури; M – суха біомаса посіву, г/м²; c_2 – коефіцієнт, який характеризує витрати, пов'язані з переміщенням речовин, фотосинтезом і створенням нових структурних одиниць; j – порядковий номер декади розрахунку.

Блок росту. Приріст біомаси посіву визначається залишком між сумарним фотосинтезом посіву та витратами на дихання

$$\Delta M^j = \Phi^j - R^j. \quad (5)$$

Для опису росту окремих органів рослин використовуються ростові рівняння у модифікованому вигляді, запропоновані Ю.К. Россом:

$$\begin{aligned} m_i^{j+1} &= m_i^j + (\beta_i^j \Delta M^j - v_i^j m_i^j), \\ m_p^{j+1} &= m_p^j + (\beta_p^j \Delta M^j + \sum_i^{l,s,r} v_i^j m_i^j), \end{aligned} \quad (6)$$

Зростання площі листа посіву визначається при позитивному прирості біомаси листа з формули

$$L^{j+1} = L^j + \Delta m_l \frac{1}{z}, \quad (7)$$

де z – питома поверхнева площа листа, г/м².

При від'ємному прирості біомаси листа для опису росту асимілюючої поверхні вживається співвідношення

$$L^{j+1} = L^j - \Delta m_i \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{k_c}, \quad (8)$$

де $k_c = 0,3$ – параметр, який характеризує критичну величину зменшення живої біомаси листа, при якій починається відмирання її.

Блок водного режиму посівів. Для визначення профілю водного режиму нами було прийнято, що зона розповсюдження коренів розділяється на десять шарів. Також виділений 11-й шар (100 – 110 см). Вологість в цьому шарі береться постійною та задається у вигляді константи. До основи моделювання водного режиму посівів, як відзначалося раніше, покладено схему водного балансу у різних шарах ґрунту. Виходячи з припущення, що глибина проникнення коренем зернових культур, як правило, не перевищує 1 метр, пропонується розділити ґрунт на десять шарів (по десять сантиметрів). Рівняння водного балансу для кожного з них можна записати як

$$W_i^{j+1} = W_i^j + \sigma_i R_{in}^j - \sigma_i E^j - TR_i^j + q_{i-1}^j - q_i^j, \quad (9)$$

де W_i^{j+1} і W_i^j - відповідно вологозапаси в $j+1$ -ому і j -тому моментах часу, R_{in}^j - кількість опадів, поглинених ґрунтом, E^j - кількість вологи, що випаровується з поверхні ґрунту, TR_i^j - витрати води на транспірацію з i -го шару ґрунту, q_{i-1}^j і q_i^j - кількість води, що пройшла через верхню та нижню межу шару відповідно, σ_i - логістична змінна, яка дорівнює 1 для самого верхнього шару і 0 для всіх інших.

Для розрахунку потоку вологи через границі шару використовується кінцево-різницева рівняння

$$q_i^j = K_i^j K_{i+1}^j \left[\frac{\psi_{S_{i+1}} - \psi_{S_i}}{h_S} + 1 \right], \quad (10)$$

де ψ_S - водний потенціал, K - вологопровідність ґрунту, h_S - крок сітки.

Для розрахунків тиску ґрунтової вологи у діапазоні від вологості в'янення до повної вологоємності, згідно з [9] використовують емпіричну залежність

$$\psi_{S_i}^j = \psi_0 \exp \left[-7,76 \frac{W_i^j - W_i^{BB}}{W_i^{ПВ} - W_i^{B3}} \right], \quad (11)$$

де $\psi_{S_i}^j$ - потенціал ґрунтової вологи, ψ_0 - максимальний потенціал ґрунтової вологи.

Гідравлічна провідність розраховується за виразом

$$K_i^j = \tilde{K}_{0i} \left[\frac{W_i^j - W_i^{BB}}{W_i^{ПВ} - W_i^{BB}} \right]^f, \quad (12)$$

де

$$\tilde{K}_{0i} = \frac{K_0 [0,01 W_i^{ПВ}]^3}{[W_i^{BB}]^2 [1 - 0,01 W_i^{ПВ}]^2}, \quad (13)$$

де K_0 - емпіричний параметр, який залежить від типу ґрунту, W_i^{BB} - вологість в'янення i -того шару, $W_i^{ПВ}$ - повна вологоємність, W_i^j - фактична вологість ґрунту.

В рівняння (9) також входить кількість опадів, що випали на сільськогосподарське поле. Але при наявності рослинності не вся сума опадів доходить до ґрунту, частка їх використовується на промочування посіву. Для врахування цього процесу вводиться поняття ефективних опадів. Якщо кількість ефективних опадів ненульова, то кількість опадів, поглинених ґрунтом, розраховується як

$$R_{ef} = R_i^j \left[1 - \left[1 - \frac{[W_{50}^{ПВ} - W_{50}^j]}{[W_{50}^{ПВ} - W_{50}^{BB}]} \right]^a \right]^6, \quad (14)$$

де $W_{50}^{ПВ}$, W_{50}^{BB} - вологозапаси, що відповідають повній вологоємності і вологості в'янення у верхньому 50-сантиметровому шарі ґрунту, W_{50}^j - поточні вологозапаси.

Випарування з поверхні ґрунту залежить від насичення вологою верхнього шару ґрунту, від температури поверхні ґрунту, яка в свою чергу залежить від характеристик рослинного покриву, від дефіциту вологості повітря у рослинній товщі та від швидкості вітру. Витрати води на транспірацію розраховуються за формулою

$$TR^j = [1 - \exp(-0,412LL)]E_0^j, \quad (15)$$

де TR^j - витрати води на транспірацію, E_0 - випарованість з поверхні ґрунту, LL – відносна площа листя.

Випаровуваність з поверхні ґрунту розраховується за формулою

$$E_0^j = \varepsilon_0 d^j, \quad (16)$$

де ε_0 - емпіричний параметр.

Блок радіаційно-теплого режиму. Поглинена посівом ФАР обчислюється за формулою

$$I^j = \frac{I_0^j}{1 + CL}, \quad (17)$$

де I_0^j – поглинена сонячна радіація, кал/(см²/хв); $C = 0,5$ – емпірична стала величина; L – площа листя, м²/м².

Потік ФАР на верхню межу посіву визначається з формули

$$I_0^j = \frac{0,5Q^j}{60\tau_g}, \quad (18)$$

де Q – сумарна сонячна радіація, кал/ (см²/д).

Сумарна сонячна радіація розраховується з формули С.І. Сівкова

$$Q^j = 12,66(S^j)^{1,31} + 315(\sin h_0^j)^{2,1}, \quad (19)$$

де S – тривалість сонячного саява, год; h_0 - полуденна висота Сонця.

Середня за світлу пору доби температура повітря розраховується за формулою

$$T_g = a_1 T_{\max} + a_0, \quad (20)$$

де T_g , T_{\max} – відповідно середня за день та максимальна температура повітря;

a_0 , a_1 – емпіричні коефіцієнти.

Модель «Моніторинг умов зволоження сільськогосподарських угідь (MUUSU)», описана вище, дозволяє кількісно оцінити вплив умов зволоження ґрунту на продуктивність зернових культур (озима пшениця та кукурудза).

Задача оцінки впливу зволоження ґрунту на продуктивність озимої пшениці та кукурудзи на зерно вирішується в двох напрямках:

- 1) Оцінка умов зволоження ґрунту під зерновими культурами, що вирощуються на богарі. Розглянуті три сценарії умов зволоження ґрунту (табл. 1 і 2):
 - рік-аналог середньобагаторічному;
 - сухий 1999 рік;
 - вологий 1997 рік;
- 2) Оцінка умов зволоження ґрунту під зерновими культурами, що вирощуються на зрошенні. Розглянуті шість варіантів зрошувальної норми від мінімально

(500 м³/га) до максимально (3000 м³/га) можливої, з інтервалом 500 м³/га (табл.3).

Перший напрямок. Були проведені розрахунки для озимої пшениці, що вирощується в богарних умовах Одеської області (табл.1)

Таблиця 1 – Вплив умов зволоження ґрунту на урожайність озимої пшениці. Одеська область

Рік	Показники				
	Опади, мм	Сумарне випаровування, мм	Випаровуваність, мм	Вологозабезпеченість, %	Урожай, ц/га
рік-аналог середньобагаторічному	157	184	453	75	35
сухий 1999 рік	75	156	453	51	25
вологий 1997 рік	236	192	453	94	42

З табл. 1 видно, що вологопотреба (випаровуваність) озимої пшениці в рік-аналог середньобагаторічному дорівнює 453 мм. Фактична вологозабезпеченість визначається кількісними показниками: сумарним випаровуванням (випаровування з поверхні ґрунту та транспірація рослин пшениці) - 184 мм; опадами, які за весняно-літню вегетацію становлять 157 мм. Такий режим зволоження дозволяє сформувати урожай до 35 ц/га. В сухий рік вологозабезпеченість становить лише 51 %, тому урожайність зменшується до 25 ц/га. У вологому році вологозабезпеченість – 94 %, урожай зростає до 42 ц/га.

У табл. 2 наведені результати розрахунків для кукурудзи на зерно, яка вирощується на богарі в межах Одеської області. З таблиці видно, що тільки в вологий рік вологозабезпеченість кукурудзи можливо охарактеризувати як добру (84%), у середньобагаторічній вона задовільна (70%), в сухий рік – незадовільна (46%). При недостатніх умовах зволоження формується урожай кукурудзи нижче потенційно можливого (70-75 ц/га).

Таблиця 2 – Вплив умов зволоження ґрунту на урожай кукурудзи на зерно. Одеська область

№ п/п	Показники	Рік		
		рік-аналог середньобагаторічному	сухий 1999 рік	вологий 1997 рік
1	Опади, мм	168	81	248
2	Сумарне випаровування, мм	208	186	232
3	Випаровуваність, мм	573	573	573
4	Вологозабезпеченість, %	70%	46%	84%
5	Урожай, ц/га	49	35	67

Для одержання стабільних урожаїв зернових культур на Одещині потрібно використовувати зрошення.

Другий напрямок. За допомогою моделі була дана кількісна оцінка впливу умов зволоження ґрунту на продуктивність озимої пшениці та кукурудзи на зерно в умовах зрошення (табл.3).

Таблиця 3 – Вплив зрошувальної норми на урожай зернових культур

Культура	Зрошувальна норма, м ³ /га						
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
У р о ж а й , ц / г а							
Озима пшениця	35	37	40	41	42	44	43
Кукурудза на зерно	49	56	64	67	70	72	70

Аналіз одержаних даних показав, що збільшення зрошувальної норми з 500 до 2500 м³/га обумовлює ріст урожаю. При зрошувальній нормі 2500 м³/га урожайність озимої пшениці зростає на 25 % у порівнянні з урожаєм на богарі, кукурудзи на зерно - практично у два рази. При зрошувальній нормі 3000 м³/га урожай знижується. Перезволоження зернових культур так же небажано, як і дефіцит вологи.

Висновки. Динамічна модель водного режиму сільськогосподарських культур дозволяє виконувати моніторинг і оцінювати продуктивність урожаю зернових культур. За допомогою цієї моделі можливо проводити оптимізацію водного режиму з урахуванням погодних умов конкретного року і зрошувальних норм, які можливо регулювати в залежності від умов природного зволоження.

Список літератури

1. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат. – 1983. – 175 с.
2. Бойко А.П., Сиротенко О.Д. Моделирование энерго- и массообмена системы почва-растение-атмосфера при недостатке почвенной влаги // Труды ВНИИСХМ. – 1985. – Вып. 10. – С. 3-26.
3. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат. – 1981. – 168 с.
4. Сиротенко О.Д., Мокиевский В.М. Параметризованная модель водно-теплового режима агроэкосистемы для расчета суммарного испарения в задачах нормирования орошения // Труды ВНИИСХМ. – 1990. – Вып. 26. – С. 12-21.
5. Полевой А.Н., Хохленко Т.Н. Моделирование формирования урожая сельскохозяйственных культур в условиях орошения черноземов придунайской провинции. // Почвоведение. – 1995. - № 12. – С. 1518-1524.

Динамическая модель водного режима сельскохозяйственных культур.

Вольвач О.В., Дронова Е.А., Жигайло Е.Л.

Рассматривается математическая модель мониторинга условий увлажнения сельскохозяйственных угодий. С помощью модели дается количественная оценка влияния условий увлажнения почвы на продуктивность озимой пшеницы и кукурузы на зерно в Одесской области.

Ключевые слова: математическая модель, водный режим, почва, богара, орошение, урожайность.

A dynamic model of the water regime of agricultural crops. Volvach O. V., Dronova E.A., Zhigaylo E.L.

It is considered a mathematical model for monitoring moisture conditions of agricultural land. The model quantifies the influence of soil moisture conditions on the productivity of winter wheat and corn for grain in the Odessa region.

Key words: mathematical model, the water regime, soil, non-irrigated fields, irrigation, crop yields.