МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-24-38

Прогнозирование контуров капельного увлажнения черноземов степного типа почвообразования

Виктор Николаевич Шкура¹, Андрей Сергеевич Штанько²

^{1,2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

²<https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Автор, ответственный за переписку: Андрей Сергеевич Штанько, shtanko.77@mail.ru

Аннотация. **Цель:** разработка и апробация методики определения размеров и влажностных характеристик контуров влажности, формирующихся в южных черноземах степного типа почвообразования при капельном поливе. **Материалы и методы.** Экспериментальные исследования выполнены на легко-, средне- и тяжелосуглинистых среднемощных обыкновенных и южных черноземах. Рассматривались вертикальные сечения зон увлажнения с системой внутриконтурных изоплет влажности. В качестве показателей, определяющих параметры контуров, рассмотрены: содержание в увлажняемом почвенном слое физической глины, плотность почвы и ее наименьшая влагоемкость. **Результаты.** В процессе исследования опытных вертикальных сечений зон капельного увлажнения почвы установлены зависимости, характеризующие имеющие место функциональные связи между геометрическими параметрами контуров и характеристиками почвенных, фитопочвенных и технологических условий их формирования. На базе полученных экспериментальных зависимостей разработана методика расчета линейных размеров контуров и графического построения их очертания. Предложенная методика прогнозирования контуров апробирована на фактических данных об их размерах и распределении влаги во внутриконтурном пространстве, полученных другими исследователями опытным путем. Сопоставление опытных и прогнозных контуров капельного увлажнения свидетельствует об их качественном подобии как в части внешнего очертания, так и в части расположения изоплет с разным уровнем влажности почвы внутри увлажняемой зоны. Расчетное значение поливной нормы отличается от фактического на 2,2 %. **Выводы.** Предложенная методика прогнозирования размеров контуров и внутриконтурных изоплет влажности, формирующихся в черноземах степного типа почвообразования, разработана до уровня ведения расчетов по авторской программе для ЭВМ. Пример апробации предлагаемой методики свидетельствует о ее приемлемости для применения в проектной и эксплуатационной практике капельного полива сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: капельный полив, контур увлажнения, степные черноземы, изолинии влажности, почвенные характеристики, параметры контуров влажности

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Original article

Predicting drip irrigation contours of chernozems of the steppe type of soil formation

Viktor N. Shkura¹, Andrey S. Shtanko²

^{1,2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

²<https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Corresponding author: Andrey S. Shtanko, shtanko.77@mail.ru

Abstract. Purpose: development and testing of a method for determining the size and moisture characteristics of moisture contours formed in the southern chernozems of the steppe type of soil formation during drip irrigation. **Materials and methods.** Experimental studies were carried out on light, medium and heavy loamy medium thick ordinary and southern chernozems. The vertical sections of humidification zones with a system of in-contour moisture isopleths were considered. As indicators determining the contour parameters, the following are considered: the content of physical clay in the moistened soil layer, the soil density and its lowest moisture capacity. **Results.** In the process of studying the experimental vertical sections of soil drip moistening zones, dependences characterizing the existing functional relationships between the contour geometric parameters and the characteristics of soil, phytosoil and technological conditions of their formation were determined. On the basis of the obtained experimental dependences, a method for calculating the contours linear dimensions and graphically constructing their outlines has been developed. The proposed method for contour predicting was tested on actual data on their sizes and moisture distribution in the inner-contour space, obtained by other researchers experimentally. Comparison of the experimental and predicted contours of drip moistening testifies to their qualitative similarity both in terms of the external outline and in terms of the location of isopleths with different levels of soil moisture inside the wetted zone. The calculated value of the irrigation rate differs from the actual one by 2.2 %. **Conclusions.** The proposed method for predicting the sizes of moisture contours and intra-contour isopleths, formed in chernozems of the steppe type of soil formation, was developed to the level of calculations using the author's computer program. An example of approbation of the proposed method indicates its acceptability for use in the crops drip irrigation design and operational practice.

Keywords: drip irrigation, moisture contour, steppe chernozems, moisture isolines, soil characteristics, moisture contours parameters

Введение. При капельном поливе сельскохозяйственных растений в подкапельном почвенном пространстве формируются локальные зоны влажности, называемые контурами увлажнения. Форма и размеры контуров, формируемых в почвогрунтовой толще, являются предметом ряда известных научных работ [1–7]. Влажностные и геометрические характеристики контуров влажности почвы являются определяющими показателями капельного полива, которые должны соответствовать потребностям культивируемых при капельном орошении растений в части формирования благоприятных условий для роста и функционирования корневых систем.

Отметим, что известные теоретические и экспериментальные разработки [8–10] не позволяют с приемлемой для практики точностью прогно-

зировать как геометрические (объемные, площадные и линейные), так и влажностные параметры контуров, формирующихся в суглинистых черноземах степного типа почвообразования при капельном поливе. Сложившееся положение объясняется многофакторностью процесса формирования контуров и влиянием на этот процесс, в т. ч. размеры и влажностные параметры, почвенных и рельефных условий, а также ряда технологических параметров проведения капельных поливов. При этом разработчики систем капельного орошения испытывают потребность в знании параметров контуров влажности, формируемых в почве, и их применении при проектировании и использовании капельных технологий.

Указанные обстоятельства определили цель научного исследования, которая заключается в разработке методики определения размеров и влажностных характеристик контуров влажности, формирующихся в южных черноземах степного типа почвообразования при капельном поливе.

Материалы и методы. Экспериментальную основу разработанной методики прогнозирования формы и размеров капельных контуров составляют данные полевых исследований, проведенных при капельном поливе легко-, средне- и тяжелосуглинистых южных черноземных почв степного типа почвообразования. В качестве характеризующих почвы показателей рассмотрены: содержание в увлажняемой почвенной толще физической глины, измеряемое в процентах массы сухой почвы ($\overline{W}_{г/ч}$, % МСП), плотность почвы ($\overline{\gamma}_{об}$, т/м³) и ее наименьшая влагоемкость ($\overline{W}_{нв}$, % МСП). Указанные почвенные характеристики определялись как средние значения по всему увлажняемому почвогрунтовому слою ($h_{увл}$, м). Диапазоны изменения почвенных параметров составили: по $\overline{W}_{г/ч}$ от 23,0 до 58,0 % МСП; по $\overline{W}_{нв}$ от 19,0 до 29,0 % МСП; $1,2 \leq \overline{\gamma}_{об} \leq 1,42$ т/м³; по влажности почвы до полива $\beta_{д/п} = (0,65 \pm 0,05)$ наименьшей влагоемкости $\beta_{нв}$.

Основным материалом для анализа и синтеза являлись вертикальные

сечения (профили) зон увлажнения с системой внутриконтурных изоплет влажности. Пример одного из экспериментально зафиксированных контуров (получен при: $\bar{W}_{г/ч} = 54,3$ % МСП, $\bar{W}_{нв} = 27,1$ % МСП и $\bar{\gamma}_{об} = 1,27$ т/м³; $h_{увл} = 1,10$ м, $\beta_{д/п} = 0,62 \cdot 27,1 = 16,8$ % МСП; послеполивная влажность почвы $\beta_{п/п} = 27,1$ % МСП; фактическая норма полива на один капельный микроводовыпуск ($N_{пол}$)_{факт} = 93,0 л) приведен на рисунке 1.

Буквенно-цифровые обозначения на изоплотах соответствуют долям от влажности наименьшей влагоемкости

**Рисунок 1 – Вертикальный профиль зоны
капельного увлажнения почвы**

Результаты и обсуждение. В результате корреляционно-регрессионного анализа экспериментального материала получены математические зависимости, описывающие установленные функциональные связи между размерами и влажностными характеристиками контуров влажности, формирующихся в почвенном пространстве, и почвенными характеристиками и технологическими параметрами капельного полива [11, 12]. Полу-

ченные экспериментальные зависимости были положены в основу графо-аналитического метода определения геометрических и влажностных параметров и построения прогнозируемых капельных контуров влажности. Методика его реализации предусматривает проведение расчетов и графических построений, реализуемых в нижеприведенной последовательности.

1 Определение исходных условий и параметров капельного полива.

1.1 Устанавливаются определяющие параметры контуров увлажнения почвенные характеристики: $\overline{W}_{г/ч}$, % МСП; $\overline{W}_{НВ}$, % МСП; $\overline{\gamma}_{об}$, т/м³, и расчетное значение дополивной влажности почвы $\beta_{д/п}$, % МСП.

1.2 Принимаются фитопочвенные показатели: расчетная глубина увлажнения корнеобитаемого почвенного слоя ($h_{увл}$, м), расчетное значение постполивной влажности почвы в контуре увлажнения $\beta_{п/п}$, % МСП.

1.3 Рассчитывается величина поливной нормы на одну капельницу ($N_{пол}$)_{расч}, м³/кап., обеспечивающая достижение фитопочвенных показателей в определенных почвенных условиях, по зависимости вида:

$$(N_{пол})_{расч} = 0,00196 \cdot \overline{\gamma}_{об} \cdot h_{кон}^3 \cdot (0,0765 \cdot \overline{W}_{г/ч}^{0,6} + 0,0292 \cdot \overline{W}_{НВ})^2 \cdot (\beta_{п/п} - \beta_{д/п}).$$

2 Определяется максимальная глубина расположения изоплеты ($(\hat{h}_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$, м) с уровнем влажности, составляющим 70 % от значения наименьшей влагоемкости почвы ($\beta_{0,7\beta_{НВ}} = 0,7 \cdot \beta_{НВ}$, % МСП), по зависимости:

$$\begin{aligned} (\hat{h}_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = & \frac{(h_{из/п})_{\beta_{д/п}}}{0,5 \cdot \left[1,0 - 1,1^{0,1 \cdot \overline{W}_{г/ч}} \cdot \left(\frac{\beta_{д/п}}{\beta_{0,7 \cdot НВ}} - 1,0 \right) + 1,0 - 1,2^{0,1 \cdot \overline{W}_{НВ}} \times \right.} \\ & \left. \times \left(\frac{\beta_{д/п}}{\beta_{0,7 \cdot НВ}} - 1,0 \right) \right]}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(h_{из/п})_{\beta_{д/п}}$ – заглубленность под поверхность земли изоплеты с влажностью, равной $\beta_{д/п}$ (принимается равной $h_{увл}$), м.

3 Определяются значения заглупления изоплет $(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$, м, с уровнем влажности от $\beta_i = \beta_{д/п}$ до $\beta_i = 1,0\beta_{HB}$ в % МСП:

$$(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i} = 0,5 \cdot \left[1,0 - 1,1^{0,1 \cdot \overline{W}_{г/ч}} \cdot \left(\frac{\beta_i}{\beta_{0,7\beta_{HB}}} - 1,0 \right) + 1,0 - 1,2^{0,1 \cdot \overline{W}_{HB}} \cdot \left(\frac{\beta_i}{\beta_{0,7\beta_{HB}}} - 1,0 \right) \right] \times (\hat{h}_{из/п})_{0,7\beta_{HB}}.$$

4 Устанавливаются значения максимальных радиусов (максимальных удалений изоплет с уровнем влажности почвы β_i от оси капания) контуров увлажнения $((\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}, м)$ с разным уровнем влажности по формуле:

$$(\hat{r}_{из/п})_{\beta_i} = 0,25 \cdot (\hat{h}_{из/п})_{\beta_i} \cdot [(0,51 + 0,009 \cdot \overline{W}_{г/ч}) + (0,073 + 0,038 \cdot \overline{W}_{HB})]. \quad (2)$$

5 Определяются значения относительных плановых координат изоплетных линий $(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$ по дискретно (от 0 до 10) задаваемым значениям $(h_j)_{\beta_i} / (\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$ с использованием полиномиальной зависимости вида:

$$\frac{(r_j)_{\beta_i}}{(\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}} = k_0 + k_1 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}} \right] - k_2 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}} \right]^2 + k_3 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}} \right]^3 - k_4 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}} \right]^{30}, \quad (3)$$

где $(r_j)_{\beta_i}$ – радиус j -го сечения горизонтальной плоскостью определенно-го изоплетного контура увлажнения почвы с уровнем влажности β_i , м;

$(h_j)_{\beta_i}$ – величина заглупления j -го сечения горизонтальной плоскостью изоплетного контура с уровнем влажности β_i , задаваемая в соответствии с принятым соотношением $(h_j)_{\beta_i} / (\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$ в долях от 0 до 1 $(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$, м;

$k_0 - k_4$ – коэффициенты полинома (3), определяемые по формулам:

$$k_0 = 0,5 \cdot \left((1 - 0,005 \cdot \overline{W}_{г/ч} \cdot \overline{\gamma}_{ог}) + (1 - 0,001 \cdot \overline{W}_{HB}^{1,84} - 0,002 \cdot \overline{W}_{HB}^{0,45}) \right),$$

$$k_1 = 1,03 / k_0^{1,2},$$

$$k_2 = k_0 + k_1,$$

$$k_3 = k_4 = 0,255 \cdot k_0^{0,01}.$$

6 По значениям относительных координат изоплетных контуров $(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$ и $(h_j)_{\beta_i} / (\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$ и известным максимальным значениям $(\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$ и $(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$ определяются абсолютные значения координат граничных линий $(r_j)_{\beta_i}$ и $(h_j)_{\beta_i}$, м, очерчивающих разновлажностные контуры.

7 По определенным значениям $(r_j)_{\beta_i}$ и $(h_j)_{\beta_i}$ осуществляется построение очертаний изоплетных контуров с заданным уровнем влажности.

Приведенная выше методика разработана до стадии практического применения (проведения расчетов по авторской программе для ЭВМ) и позволяет определять параметры капельных контуров влажности для широкого спектра условий капельного полива.

Приемлемость методики определения линейных размеров и очертания контуров влажности, а также расположения внутриконтурных изоплет и их графического представления проиллюстрирована ее реализацией в условиях и на примере зафиксированного авторами контура, приведенного на рисунке 1. Результаты расчетов и построения приведены ниже.

1 Максимальная прогнозируемая заглубленность изоплеты с влажностью $\beta_{из/п} = 0,7 \cdot \beta_{НВ}$ в соответствии с зависимостью (1) составит:

$$(\hat{h}_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = \frac{1,10}{0,5 \cdot \left[1,0 - 1,1^{0,1 \cdot 54,3} \cdot \left(\frac{16,8}{19,0} - 1,0 \right) + 1,0 - 1,2^{0,1 \cdot 27,1} \cdot \left(\frac{16,8}{19,0} - 1,0 \right) \right]} = 0,93 \text{ м.}$$

2 Значения максимальной заглубленности и радиусов изоплет с влажностью, составляющей 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95 и 100 % от $\beta_{НВ}$, приведены в таблице 1.

3 Значения относительных и абсолютных координат, оконтуриваю-

щих разновлажностные зоны, определенные по позициям 4 и 5 при значениях коэффициентов полинома, составляющих $k_0 = 0,61$; $k_1 = 1,88$; $k_2 = 2,48$; $k_3 = k_4 = 0,25$, приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Значения геометрических параметров капельных контуров влажности

Характеристика контура	Величина характеристики при разных уровнях влажности изоплет в %								
	62	65	70	75	80	85	90	95	100
Максимальная заглубленность изоплеты $(\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$, м	1,100	1,034	0,925	0,815	0,706	0,596	0,487	0,377	0,267
Максимальный радиус изоплетных контуров $(\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$, м	0,578	0,543	0,486	0,428	0,371	0,313	0,256	0,198	0,141

Таблица 2 – Абсолютные и относительные значения координат линий влажности

Параметр контура	Значение параметра для различных значений $(h_j)_{\beta_i} / (\hat{h}_{из/п})_{\beta_i}$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Для контура с $\beta_i = 0,7\beta_{HB}$ при $(\hat{h}_{из/п})_{0,7\beta_{HB}} = 0,925$ м и $(\hat{r}_{из/п})_{0,7\beta_{HB}} = 0,486$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,092	0,185	0,277	0,370	0,462	0,555	0,647	0,740	0,832	0,925
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,295	0,374	0,430	0,463	0,474	0,464	0,434	0,384	0,315	0,223	0,000
Для контура с $\beta_i = 0,75\beta_{HB}$ при $(\hat{h}_{из/п})_{0,75\beta_{HB}} = 0,815$ м и $(\hat{r}_{из/п})_{0,75\beta_{HB}} = 0,428$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,082	0,163	0,245	0,326	0,408	0,489	0,571	0,652	0,734	0,815
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,260	0,330	0,379	0,408	0,418	0,409	0,383	0,339	0,278	0,196	0,000
Для контура с $\beta_i = 0,80\beta_{HB}$ при $(\hat{h}_{из/п})_{0,80\beta_{HB}} = 0,706$ м и $(\hat{r}_{из/п})_{0,80\beta_{HB}} = 0,371$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,071	0,141	0,212	0,282	0,353	0,423	0,494	0,565	0,635	0,706
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,225	0,285	0,328	0,353	0,362	0,354	0,331	0,293	0,240	0,170	0,000
Для контура с $\beta_i = 0,85\beta_{HB}$ при $(\hat{h}_{из/п})_{0,85\beta_{HB}} = 0,596$ м и $(\hat{r}_{из/п})_{0,85\beta_{HB}} = 0,313$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,060	0,119	0,179	0,238	0,298	0,358	0,417	0,477	0,536	0,596
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{из/п})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,190	0,241	0,277	0,298	0,306	0,299	0,280	0,248	0,203	0,144	0,000

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Для контура с $\beta_i = 0,90\beta_{\text{НВ}}$ при $(\hat{h}_{\text{из/п}})_{0,90\beta_{\text{НВ}}} = 0,487$ м и $(\hat{r}_{\text{из/п}})_{0,90\beta_{\text{НВ}}} = 0,256$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,049	0,097	0,146	0,195	0,243	0,292	0,341	0,389	0,438	0,487
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{\text{из/п}})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,155	0,197	0,226	0,244	0,250	0,244	0,228	0,202	0,166	0,117	0,000
Для контура с $\beta_i = 0,95\beta_{\text{НВ}}$ при $(\hat{h}_{\text{из/п}})_{0,95\beta_{\text{НВ}}} = 0,377$ м и $(\hat{r}_{\text{из/п}})_{0,95\beta_{\text{НВ}}} = 0,198$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,038	0,075	0,113	0,151	0,189	0,226	0,264	0,302	0,339	0,377
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{\text{из/п}})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,120	0,152	0,175	0,189	0,193	0,189	0,177	0,157	0,128	0,091	0,000
Для контура с $\beta_i = 1,00\beta_{\text{НВ}}$ при $(\hat{h}_{\text{из/п}})_{1,00\beta_{\text{НВ}}} = 0,267$ м и $(\hat{r}_{\text{из/п}})_{1,00\beta_{\text{НВ}}} = 0,141$ м											
$(h_j)_{\beta_i}$, м	0,000	0,027	0,053	0,080	0,107	0,134	0,160	0,187	0,214	0,241	0,267
$(r_j)_{\beta_i} / (\hat{r}_{\text{из/п}})_{\beta_i}$	0,61	0,77	0,88	0,95	0,98	0,96	0,89	0,79	0,65	0,46	0,00
$(r_j)_{\beta_i}$, м	0,085	0,108	0,124	0,134	0,137	0,134	0,126	0,111	0,091	0,064	0,000

Полученные значения горизонтальных и вертикальных координат позволяют построить прогнозируемый контур увлажнения почвы и изо-плеты с разным уровнем влажности, проиллюстрированные на рисунке 2.

Рисунок 2 – Прогнозируемые очертания разновлажностных зон в контуре капельного увлажнения

Сопоставление контуров по рисункам 1 и 2 свидетельствует об их качественном подобии как в части внешнего очертания, так и в части положения внутриконтурных изоплант с разным уровнем влажности.

О количественно-качественном соответствии прогнозных и измеренных очертаний и размеров разноизоплантных контуров увлажнения можно судить при их совмещении, проиллюстрированном рисунком 3.

Рисунок 3 – Очертания контурных изоплант с различной влажностью

Сопоставление профилей разновлажностных контуров свидетельствует о приемлемости предложенной методики для прогнозирования параметров зон влажности капельно увлажняемой почвенной толщи.

Приведенные на рисунках 2 и 3 профильные сечения капельного контура влажности соответствуют расчетной поливной норме $(N_{пол})_{расч} = 0,091 \text{ м}^3$. Расчетное значение поливной нормы отличается от фактического

го $(N_{пол})_{факт} = 0,093 \text{ м}^3$ на $\delta = \frac{(N_{пол})_{расч} - (N_{пол})_{факт}}{(N_{пол})_{факт}} \cdot 100 = 2,2\%$, что

вполне приемлемо для практики капельных поливов.

Предложенная методика прогнозирования контуров апробирована на опытных данных измерений геометрических параметров и влажностных характеристик контуров увлажнения, полученных другими исследователями. Ниже приведен пример реализации методики и сопоставления параметров прогнозируемого и опытного контура увлажнения почв, зафиксированного Ю. С. Уржумовой (рисунок 4) при капельном поливе черноземной почвы со следующими почвенными характеристиками: $W_{г/ч} = 58,0$ % МСП; $W_{НВ} = 25,2$ % МСП; $\beta_{п/п} = 23,9$ % МСП; $\beta_{д/п} = 15,1$ % МСП и $\gamma_{об} = 1,4$ т/м³. Контур сформировался при: $N_{пол} = 37,3$ л/кап.; $q_{кап} = 3,2$ л/ч; $h_{увл} = 0,83$ м [13].

Рисунок 4 – Контур по опытным данным Ю. С. Уржумовой

1 Максимальная глубина расположения изоплеты капельного контура с влажностью $\beta_i = 0,7 \cdot \beta_{НВ}$ составляет $(h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = 0,671$ м.

2 Данные определения заглубленностей и радиусов разновлажностных изоплет капельных контуров приведены в таблице 3.

3 С использованием зависимости (2) был произведен расчет координат граничной и внутриконтурных изоплет, по которым построен контур влажности почвы, проиллюстрированный рисунком 5.

Таблица 3 – Данные о глубинах и радиусах изоплет

Параметр контура	Значение параметра для изоплет с разной влажностью, в % от β_{HB}								
	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Глубина изоплетного контура $(h_{из/п})_{\beta_i}$, см	83,0	75,0	67,0	59,1	51,2	43,2	35,3	27,3	19,3
Радиус изоплетного контура $(r_{из/п})_{\beta_i}$, см	42,8	38,7	34,6	30,5	26,4	22,3	18,2	14,1	10,0

Рисунок 5 – Расчетный контур влажности для условий Ю. С. Уржумовой [13]

Сопоставление графических образов опытного (по рисунку 4) и прогнозируемого (по рисунку 5) влажностных контуров позволяет сделать заключение о том, что очертания (формы) опытного и расчетного контуров влажности и внутриконтурных изоплет характеризуются как аффинные. Подобие форм и размеров опытных и прогнозных изоплетных контуров влажности подтверждается их сопоставлением на рисунке 6.

Проведенная апробация разработанной методики графоаналитического прогнозирования параметров контуров влажности подтверждает ее приемлемость для использования при проектировании систем капельного орошения сельскохозяйственных культур.

а) $\beta_{из/п} = 60 \% \beta_{НВ}$; б) $\beta_{из/п} = 65 \% \beta_{НВ}$; в) $\beta_{из/п} = 70 \% \beta_{НВ}$;
г) $\beta_{из/п} = 75 \% \beta_{НВ}$; д) $\beta_{из/п} = 80 \% \beta_{НВ}$; е) $\beta_{из/п} = 85 \% \beta_{НВ}$;
ж) $\beta_{из/п} = 90 \% \beta_{НВ}$; и) $\beta_{из/п} = 95 \% \beta_{НВ}$; к) $\beta_{из/п} = 100 \% \beta_{НВ}$

Рисунок 6 – Очертания профилей опытных и прогнозных контуров влажности

Выводы. Предложена система экспериментальных зависимостей и разработанная на их основе методика прогнозирования геометрических и влажностных параметров и графического построения контуров капельного увлажнения степных суглинистых черноземов. Предложенная методика доведена до уровня ведения практических расчетов по авторской программе для ЭВМ. Полученные в результате ее реализации прогнозные контуры влажности позволяют определить их геометрические и влажностные характеристики. Используя прогнозные очертания контуров, можно при необходимости определить их площадные и объемные параметры, а также средневзвешенные влажностные показатели почвы в увлажняемом почвенном пространстве.

Список источников

1. Ахмедов А. Д., Галиуллина Е. Ю. Контурные увлажнения почвы при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3. С. 183–188.

2. Пронько Н. А., Корсак В. В., Ломовцева А. Н. Контур увлажнения при капельном орошении на почвах Заволжья // Научная жизнь. 2015. № 1. С. 74–81.

3. Зубаиров О. З., Жатканбаева А. О. Исследования контура увлажнения и режима орошения почвы при капельном орошении // Водное хозяйство Казахстана. 2006. № 1(9). С. 9–12.

4. Икромов И. И. Формирование контуров и полосы увлажнения почвы при разной технологии микроорошения // Современные энерго- и ресурсосберегающие экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства. Рязань: Рязанский ГАУ, 2004. Вып. 8. С. 240–244.

5. Васильев С. М., Коржова Т. В., Шкура В. Н. Технические средства капельного орошения: учеб. пособие. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 197 с.

6. Шкура В. Н., Обумахов Д. Л., Рыжаков А. Н. Капельное орошение яблони: монография / под ред. В. Н. Шкуры. Новочеркасск: Лик, 2014. 310 с.

7. Ясонида О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с.

8. Системы капельного орошения: учеб. пособие / М. Л. Ромащенко [и др.]; под ред. М. Л. Ромащенко. Днепропетровск: Оксамит-текст, 2007. 175 с.

9. Ovchinnikov A. S., Bocharnikov V. S., Meshcheryakov M. P. Methodology of calculation and justification of the wetting parameters in the open field and greenhouse // Environmental Engineering. 2012. № 4. P. 29.

10. Ah Koon P. D., Gregory P. J., Bell J. P. Influence of drip irrigation emission rate on distribution and drainage of water beneath a sugar cane and a fallow plot // Agricultural Water Management. 1990, Jan. Vol. 17, iss. 1–3. P. 267–282. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90074-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90074-9).

11. Штанько А. С., Шкура В. Н. Способ графоаналитического построения очерта-ния контуров капельного увлажнения почв // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 1(29). С. 67–85. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531> (дата обращения: 04.03.2021).

12. Рыжаков А. Н., Шкура В. Н., Штанько А. С. О форме локального контура ка-пельного орошения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 2(66). С. 94–100.

13. Уржумова Ю. С. Технологические и конструктивные элементы локального низконапорного орошения садов для условий южных черноземов Ростовской области: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. Новочеркасск, 2004. 24 с.

References

1. Akhmedov A.D., Galiullina E.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Soil moisture contours in drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 3, pp. 183–188. (In Russian).

2. Pronko N.A., Korsak V.V., Lomovtseva A.N., 2015. *Kontur uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii na pochvakh Zavolzh'ya* [Moisture contour during drip irrigation on the soils of the Trans-Volga region]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], no. 1, pp. 74–81. (In Russian).

3. Zubairov O.Z., Zhatkanbaeva A.O., 2006. *Issledovaniya kontura uvlazhneniya i rezhima orosheniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Research of the moisture contour and the soil irrigation regime with drip irrigation]. *Vodnoe khozyaystvo Kazakhstana* [Water Industry of Kazakhstan], no. 1(9), pp. 9–12. (In Russian).

4. Ikromov I.I., 2004. *Formirovanie konturov i polosy uvlazhneniya pochvy pri raznoy tekhnologii mikroorosheniya* [Formation of contours and soil moistening bands with different micro-irrigation technologies]. *Sovremennye energo- i resursosberegayushchie ekologicheski ustoychivye tekhnologii i sistemy sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Modern Energy and

Resource Saving Ecologically Sustainable Technologies and Systems of Agricultural Production]. Ryazan, Ryazan GAU, iss. 8, pp. 240-244. (In Russian).

5. Vasiliev S.M., Korzhova T.V., Shkura V.N., 2016. *Tekhnicheskie sredstva kapel'nogo orosheniya: uchebnoe posobie* [Technical Means of Drip Irrigation: Textbook]. Novocherkassk, RosNIIPM, 197 p. (In Russian).

6. Shkura V.N., Obumakhov D.L., Ryzhakov A.N., 2014. *Kapel'noe oroshenie yablo-ni: monografiya* [Apple-tree Drip Irrigation: monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., 310 p. (In Russian).

7. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie* [Drip Irrigation]. Novocherkassk, Lik Publ., 322 p. (In Russian).

8. Romashchenko M.L. [et al.], 2007. *Sistemy kapel'nogo orosheniya: uchebnoe posobie* [Drip Irrigation Systems: Textbook]. Dnepropetrovsk, Oksamit-text Publ., 175 p. (In Russian).

9. Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Meshcheryakov M.P., 2012. Methodology of calculation and justification of the wetting parameters in the open field and greenhouse. Environmental Engineering, no. 4, p. 29.

10. Ah Koon P.D., Gregory P.J., Bell J.P., 1990. Influence of drip irrigation emission rate on distribution and drainage of water beneath a sugar cane and a fallow plot. Agricultural Water Management, Jan., vol. 17, iss. 1-3, pp. 267-282, [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90074-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90074-9).

11. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2018. [Method of graphoanalytical design of moisture contour at drip irrigation]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 1(29), pp. 67-85, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531> [accessed 04.03.2021]. (In Russian).

12. Ryzhakov A.N., Shkura V.N., Shtanko A.S., 2017. *O forme lokal'nogo kontura kapel'nogo orosheniya* [On local contour form of drip irrigation]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(66), pp. 94-100. (In Russian).

13. Urzhumova Yu.S., 2004. *Tekhnologicheskie i konstruktivnye elementy lokal'nogo nizkonapornogo orosheniya sadov dlya usloviy yuzhnykh chernozemov Rostovskoy oblasti. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk* [Technological and constructive elements of local low-pressure irrigation of gardens under the conditions of southern chernosems of Rostov region. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

Информация об авторах

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор, shtanko.77@mail.ru

А. С. Штанько – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, shtanko.77@mail.ru

Information about the authors

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor, shtanko.77@mail.ru

A. S. Shtanko – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, shtanko.77@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 23.04.2021.

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 23.04.2021.