

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-55-74

Геометрия контуров капельного увлажнения почв

Виктор Николаевич Шкура¹, Андрей Сергеевич Штанько²

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

¹VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

²shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Аннотация. Цель: установление зависимостей и разработка методики расчета геометрических размеров и построения очертания локальных контуров влажности, формирующихся в почвенном пространстве при капельном поливе. **Материалы и методы.** Фактологическую основу разработки составили данные натурных (полевых) измерений контуров капельно-увлажняемого почвенного пространства и их камеральной обработки. Исследования выполнены на экспериментальных площадках с различным почвенным покровом, представленным степными, сухостепными и степно-пустынными типами почв: черноземами (обыкновенными и южными) и каштановыми почвами с широким спектром гранулометрического состава, водно-физических свойств и с различным уровнем дополивной влажности, при поливе капельницами производительностью от 1,0 до 6,0 л/ч. **Результаты и обсуждение.** При проведении исследования в качестве определяющих процесс контурообразования и геометрию контуров рассмотрены: почвенные условия, характеризующиеся содержанием физической глины, наименьшей влагоемкостью, плотностью сложения и уровнем дополивной влажности; технологические параметры, определяемые уровнем постполивной влажности, заданной глубиной увлажнения почвенной толщи, расходом капельных микроводовыпусков и объемом водоподдачи. Получены эмпирические зависимости, позволяющие определить линейные размеры, величину увлажняемой площади и объемы контуров увлажнения по заданным значениям: содержания физической глины в почве в пределах 18,0–77,0 % массы сухой почвы (МСП), наименьшей влагоемкости в диапазоне 16,5–32 % МСП, глубины промачивания от 0,5 до 1,2 м, дополивной влажности от 60 до 80 % от уровня наименьшей влагоемкости, расхода капельницы от 1,0 до 6,0 л/ч. **Вывод.** Получена система эмпирических зависимостей, и разработаны методики прогнозирования внешнего очертания, линейных, площадных и объемных размеров локальных контуров влажности, формирующихся в почвенном пространстве при капельном поливе.

Ключевые слова: капельное орошение, капельный полив, контур влажности, геометрия контуров влажности, размер контуров влажности, форма контуров влажности

Для цитирования: Шкура В. Н., Штанько А. С. Геометрия контуров капельного увлажнения почв // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 55–74. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-55-74>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Geometry of soil drip irrigation contours

Viktor N. Shkura¹, Andrey S. Shtanko²

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

¹VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

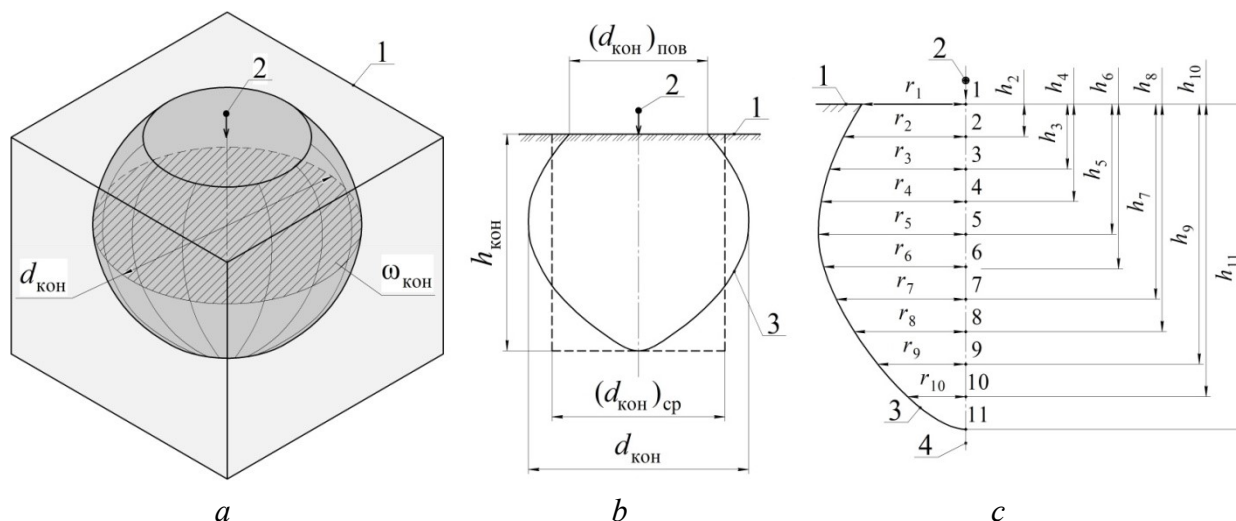
²shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Abstract. Purpose: to determine dependencies and develop a methodology for calculating the geometric dimensions and constructing the outline of local moisture contours formed in the soil space during drip irrigation. **Materials and methods.** The factual basis of the development was the data of full-scale (field) measurements of the contours of the drip-moistened soil space and their office processing. The studies were carried out on experimental sites with different soil cover, represented by steppe, dry steppe and steppe-desert soil types: chernozems (ordinary and southern) and chestnut soils with a wide range of granulometric texture, water-physical properties and with different levels of pre-irrigation moisture, when irrigated with emitters productivity from 1,0 to 6,0 l/h. **Results and discussion.** During the study, the following things were considered as determining the process of contour formation and the contour geometry: soil conditions characterized by the physical clay content, the minimum water capacity, bulk density and the level of pre-irrigation moisture; technological parameters determined by the level of post-irrigation moisture, the given depth of soil moisture, the flow rate of drip micro-water outlets and the volume of water supply. Empirical dependencies that allow determination of the linear dimensions, the wetted area dimensions and the volumes of moisture contours are obtained according to the given values: the physical clay content in soil within 18.0–77.0 % of the dry soil mass (DSM), the lowest moisture capacity in the range 16.5–32 % DSM, wetting depth from 0.5 to 1.2 m, additional irrigation moisture from 60 to 80 % of the level of the minimum water capacity, emitter flow from 1.0 to 6.0 l/h. **Conclusion.** A system of empirical dependencies has been obtained, and methods for predicting the external shape, linear, areal and volumetric dimensions of local moisture contours formed in the soil space during drip irrigation have been developed.

Keywords: drip irrigation, drip watering, moisture contour, moisture contour geometry, moisture dimension, moisture contour shape

For citation: Shkura V. N., Shtanko A. S. Geometry of soil drip irrigation contours. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):55–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-55-74>.

Введение. Результатом и измерителем качества капельного полива являются формирующиеся в почвенном пространстве локальные зоны увлажненной почвы, условно называемые «контурами увлажнения» или «контурами влажности». Геометрические параметры контуров влажности в соответствии с данными рисунка 1 определяются: очертанием контура, глубиной увлажнения почвенного профиля («глубиной контура» $h_{\text{кон}}$), максимальным диаметром («диаметром контура» $d_{\text{кон}}$), средним диаметром контура ($d_{\text{кон}}_{\text{ср}}$), диаметром зоны увлажненной почвы на поверхности земли ($d_{\text{кон}}_{\text{пов}}$), площадью горизонтальной проекции контура $\omega_{\text{кон}}$ и его объемом $W_{\text{кон}}$.



1 – поверхность почвы; 2 – капельница; 3 – граница контура влажности;
4 – ось капания; $h_1 - h_{11}$ – расстояния от поверхности земли до характерных сечений, разделяющих контур по вертикали на 10 равных расчетных слоев; $r_1 - r_{10}$ – радиусы контура, соответствующие характерным его сечениям; 1–11 – точки на оси капания, соответствующие характерным сечениям контура увлажнения почвы

1 – soil surface; 2 – emitter; 3 – moisture contour boundary; 4 – drip axis; $h_1 - h_{11}$ – distances from soil surface to the characteristic cross-sections dividing the contour vertically into 10 equal calculation layers; $r_1 - r_{10}$ are the contour radii corresponding to its characteristic cross-sections; 1–11 – points on the drip axis, corresponding to the characteristic cross-sections of soil moisture contour

Рисунок 1 – Общий вид (а), профиль (б) и расчетная схема (с) локального контура влажности, формирующегося в почвенном пространстве при капельном поливе

Figure 1 – General view (a), profile (b) and design scheme (c) of local moisture contour formed in soil space during drip irrigation

Процесс контурообразования (формирования контуров) и его геометрия зависят от ряда факторов и условий, основными из которых являются почвенные условия (физико-химические характеристики почвы) в пределах увлажняемого почвенного пространства и технологические параметры капельного полива. Учитывая важность геометрических и влажностных параметров контуров для теории и практики капельного орошения, их изучению уделяли особое внимание. Теоретическим и экспериментальным исследованиям геометрии контуров влажности посвящены работы А. Д. Ахмедова и Е. Ю. Галиуллиной [1], О. З. Зубаирова и А. О. Жатканбаевой [2], М. Н. Лытова [3], А. Ф. Рогачева и Е. В. Мелиховой [4], А. С. Овчиннико-

ва [5], А. М. Олейника и М. К. Гаджиева [6], Р. В. Прокопца [7], Н. А. Пронько [8], М. Ю. Храброва [9], В. Н. Шкуры и А. С. Штанько [10, 11], О. Е. Ясониди [12] и других исследователей [13, 14]. Анализ известных разработок в области геометрии контуров позволяет отметить отсутствие должного и необходимого для практики обобщения отдельных частных предложений. Указанное обстоятельство предопределено относительно узким диапазоном условий проведения отдельных исследований и широким спектром факторов влияния на процесс контурообразования. На восполнение дефицита рекомендаций по определению (прогнозированию) параметров контуров влажности, формируемых в почвенном пространстве при капельном поливе, направлено настоящее исследование.

Материалы и методы. Фактологическую основу разработки составили материалы натурных измерений контуров капельно-увлажненного почвенного пространства, выполненных в широком спектре условий капельного полива. Исследования выполнялись на 12 опытных участках в различных природно-климатических зонах Ростовской области с почвенным покровом, представленным южными и обыкновенными черноземами, а также темно- и светло-каштановыми почвами, являющимися типичными для степной, сухостепной и степно-пустынной природно-климатических зон. Черноземы по гранулометрическому составу представлены супесчаными, легко-, средне- и тяжелосуглинистыми, легко- и среднесуглинистыми видами с мощностью перегнойно-аккумулятивного горизонта 80–100 см (преимущественно обыкновенные) и от 40 до 80 см (южные) при содержании гумуса менее 4,0 %. Каштаноземы представлены темно-каштановыми тяжелосуглинистыми и легкоглинистыми среднесуглинистыми образованиями, каштановыми суглинистыми среднесуглинистыми видами и светло-каштановыми маломощными суглинистыми почвами.

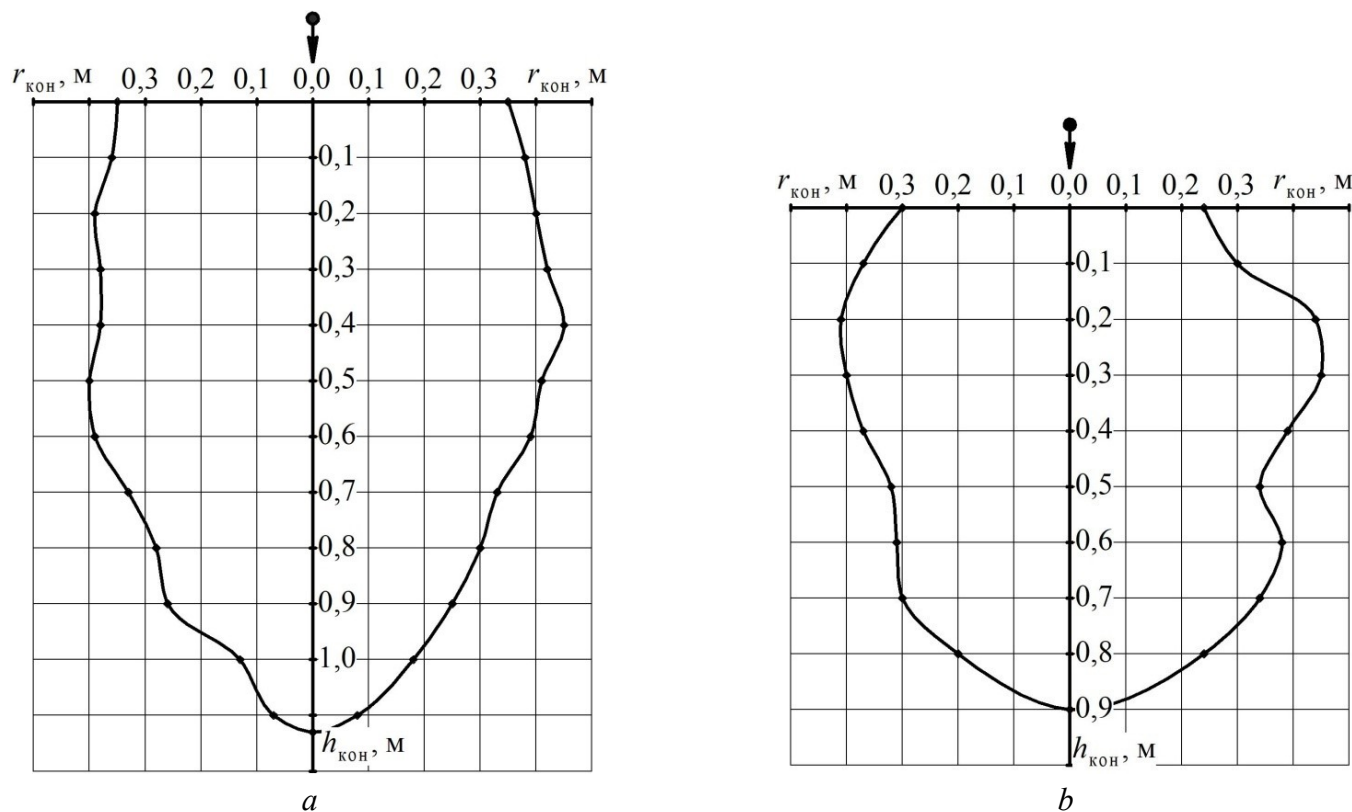
В процессе полевых исследований на разных типах и видах почв фиксировались контуры (зоны) увлажненной почвы при различных уров-

нях дополивной влажности при подаче поливной воды разнорасходными надземно-расположенными капельницами. При проведении измерений параметров капельно-увлажняемого почвенного пространства использовались общепринятые технологии. В процессе камеральной обработки опытного материала устанавливались очертания контуров влажности, являющихся основой для анализа и обобщений. Примеры профилей контуров, зафиксированных на южных супесчаных и среднесуглинистых черноземах при подаче поливной воды капельницами с расходом $q_{\text{кап}} = 2,0$ л/ч в объеме $N_{\text{кап}} = 20$ л/кап., проиллюстрированы на рисунке 2.

Примеры локальных контуров капельного увлажнения почвы, зафиксированных в одинаковых почвенных условиях – тяжелосуглинистом черноземе с характеристиками: содержанием физической глины $\overline{W}_r = 52,0$ % от массы сухой почвы (% МСП), наименьшей влагоемкостью $\overline{W}_{\text{НВ}} = 26,0$ % МСП, плотностью сложения $\overline{\gamma}_{\text{об}} = 1,31$ т/м³ и дополивной влажностью $\beta_{\text{д/п}} = 0,68 \cdot \overline{W}_{\text{НВ}} = 17,7$ % МСП, при подаче поливной воды капельницами с расходами $q_{\text{кап}}$, равными 2 и 6 л/кап., приведены на рисунке 3.

Примеры профилей контуров, сформировавшихся в тяжелосуглинистом среднемощном черноземе ($\overline{W}_r = 53,5$ % МСП, $\overline{W}_{\text{НВ}} = 26,0$ % МСП, $\overline{\gamma}_{\text{об}} = 1,33$ т/м³) при поливе капельницей с расходом 2,0 л/ч, разных уровнях дополивной влажности (изменяющейся от 0,56 до $0,78\beta_{\text{НВ}}$) увлажняемого почвенного слоя, проиллюстрированы рисунком 4.

Зафиксированные в разных почвенных и технологических условиях проведения капельного полива локальные контуры влажности почвенного пространства позволили выделить и количественно оценить влияние почвенных и технологических факторов на процесс контурообразования, форму и геометрические параметры контуров.



a – контур, зафиксированный в легкосуглинистой почве ($\overline{W}_r = 20,8$ % от МСП, $\overline{W}_{HB} = 16,9$ % МСП, $\overline{\gamma_{ог}} = 1,36$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0,64 \overline{W}_r = 10,8$ % МСП); b – контур, сформировавшийся в тяжелосуглинистом черноземе ($\overline{W}_r = 48,0$ % МСП, $\overline{W}_{HB} = 23,4$ % МСП, $\overline{\gamma_{ог}} = 1,28$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0,68 \overline{W}_r = 15,9$ % МСП)

a – contour stated in light loamy soil ($\overline{W}_r = 20.8$ % of DSM, $\overline{W}_{HB} = 16.9$ % of DSM, $\overline{\gamma_{ог}} = 1.36$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0.64 \overline{W}_r = 10.8$ % of DSM);
 b – contour formed in heavy loamy chernozem ($\overline{W}_r = 48.0$ % DSM, $\overline{W}_{HB} = 23.4$ % DSM, $\overline{\gamma_{ог}} = 1.28$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0.68 \overline{W}_r = 15.9$ % DSM)

Рисунок 2 – Профили локальных контуров капельного увлажнения почв разного гранулометрического состава
Figure 2 – Local soil drip moisture contours profiles of different granulometric texture

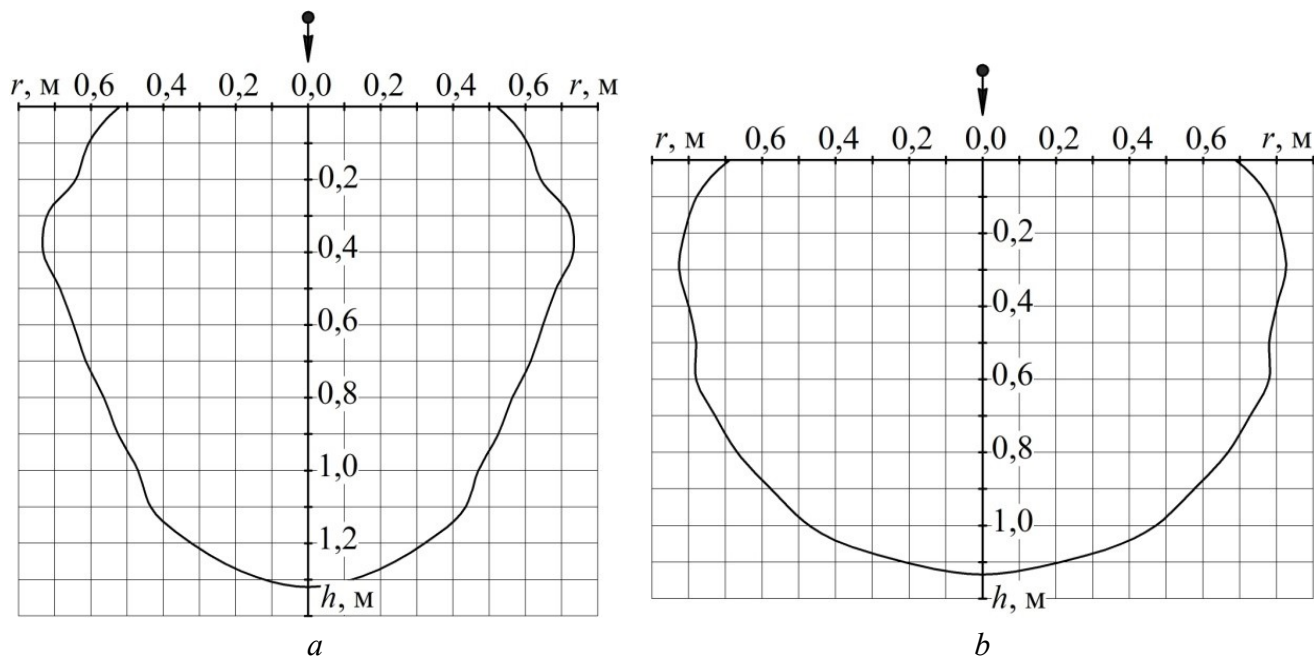
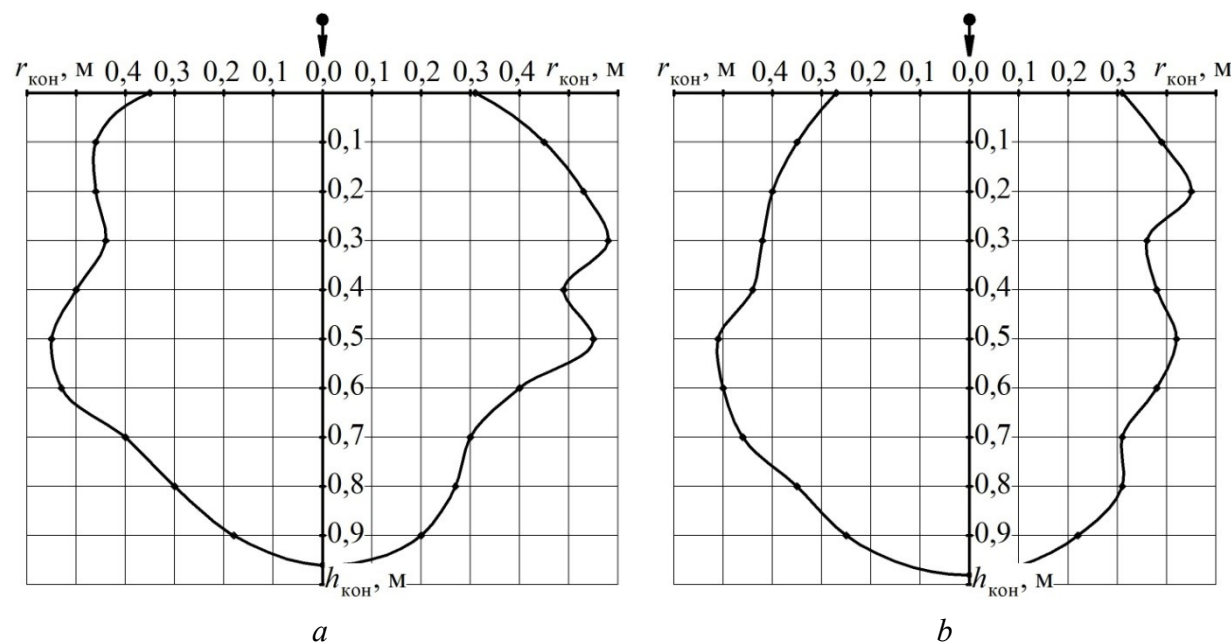


Рисунок 3 – Профили контуров влажности, сформировавшиеся в тяжелосуглинистом черноземе в процессе подачи поливной воды из капельниц с расходом 2 л/ч (а) и 4 л/ч (б) при поливной норме $N_{\text{кап}} = 96$ л/кап.

Figure 3 – Moisture contours profiles formed in heavy loamy chernozem in the process of irrigation water supply from emitters at a flow rate of 2 l/h (a) and 4 l/h (b) at an irrigation rate $N_{\text{кап}} = 96$ l/d.



a – тяжелосуглинистый среднесиловый чернозем ($\overline{W}_r = 53,5$ % МСП, $\overline{W}_{HB} = 26,0$ % МСП, $\overline{\gamma}_{об} = 1,33$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0,56 \overline{W}_{HB} = 14,56$ % МСП, $q_{кап} = 2,0$ л/ч); *b* – тяжелосуглинистый среднесиловый чернозем ($\overline{W}_r = 53,5$ % МСП, $\overline{W}_{HB} = 26,0$ % МСП, $\overline{\gamma}_{об} = 1,33$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0,78 \overline{W}_{HB} = 20,5$ % МСП, $q_{кап} = 2,0$ л/ч)

a – heavy loamy medium chernozem ($\overline{W}_r = 53.5$ % DSM, $\overline{W}_{HB} = 26.0$ % DSM, $\overline{\gamma}_{об} = 1.33$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0.56 \overline{W}_{HB} = 14.56$ % DSM, $q_{кап} = 2.0$ л/ч);

b – heavy loamy medium chernozem ($\overline{W}_r = 53.5$ % DSM, $\overline{W}_{HB} = 26.0$ % DSM, $\overline{\gamma}_{об} = 1.33$ т/м³, $\beta_{д/п} = 0.78 \overline{W}_{HB} = 20.5$ % DSM, $q_{кап} = 2.0$ л/ч)

Рисунок 4 – Профили локальных контуров капельного увлажнения почв, сформировавшихся в тяжелосуглинистом черноземе с разным уровнем допoлнительной влажности

Figure 4 – Local drip moisture contours profiles of soils formed in heavy loamy chernozem with different levels of pre-irrigation moisture

Результаты и обсуждение. Процесс формирования локальных зон (контуров) увлажненной почвы при ее капельном поливе зависит от почвенных и технологических условий его проведения. В соответствии с данными известных и авторских исследований, определяющими факторами контурообразования являются физико-химические характеристики почвы, включающие ее структуру, гранулометрический состав, химизм твердой, жидкой и газовой фаз, влажность почвенной среды, водно-физические свойства, содержание гумуса, плотность сложения, пористость почвы и другие показатели. Анализ указанных средовых факторов влияния на геометрию контуров влажности позволил из всего многообразия свойств почв (их типа и вида, структуры, водопроницаемости, содержания гумуса и др.) выделить на данном этапе исследования две почвенные характеристики: содержание в почве физической глины $\overline{W}_g$, измеряемое в % МСП, наименьшую (предельно-полевую) влагоемкость почвы $\overline{W}_{\text{НВ}}$ в % МСП, и уровень дополивной влажности почвы $\beta_{\text{д/п}}$, измеряемой в процентах от ее влажности, соответствующей уровню наименьшей влагоемкости $\overline{W}_{\text{НВ}}$, определяемые как средние (осредненные) значения по глубине капельно-увлажняемого почвенного слоя $h_{\text{увл}}$ или глубине контура $h_{\text{кон}}$.

Определенное влияние на геометрию контуров влажности оказывают технологические параметры капельного полива, среди которых: расход капельного микроводовыпуска (капельницы) $q_{\text{кап}}$, измеряемый в литрах в час (л/ч); продолжительность капельного полива (каплевания, капания) $t_{\text{кап}}$ (ч); объем водоподачи («поливная норма» на одну капельницу или локальный контур влажности) $N_{\text{кап}}$, л; глубина увлажняемого почвенного слоя $h_{\text{увл}}$, м, определяемая глубиной расположения основной массы корней растений; уровень постполивной влажности почвы $\beta_{\text{п/п}}$ в % от $\overline{W}_{\text{НВ}}$; продолжительность постполивного периода формирования и срабатывания контура $t_{\text{п/п}}$, ч,

и интенсивность потребления и потерь влаги. На данном этапе исследований геометрии контуров влажности в качестве определяющих процесс контурообразования факторов приняты и рассматривались количественные значения почвенных ($\overline{W}_r$, $\overline{W}_{HB}$ и $\beta_{д/п}$) и технологических ($q_{кап}$ и $N_{кап}$) параметров, а фиксация очертаний контуров осуществлялась через 24 ч после завершения капельного полива.

В качестве определяющего форму локального контура влажности параметра принято отношение его максимального диаметра («диаметра контура» $d_{кон}$) к глубине капельно-увлажненной почвы («глубине контура» $h_{кон}$), т. е. соотношение $d_{кон}/h_{кон}$. При этом на разных этапах исследований (выполненных в течение 2010–2022 гг.) изучалось влияние на геометрические параметры контура влажности (его форму и размеры) различных почвенно-средовых и технологических факторов.

На начальном этапе работы преимущественно изучалось влияние почвенных условий на форму и размеры контуров влажности (почвенных показателей $\overline{W}_r$ и $\overline{W}_{HB}$) при проведении поливов капельницами с расходом $q_{кап} = 2,0$ л/ч на экспериментальных площадках с почвенным покровом, представленным средне- и тяжелосуглинистыми, а также легко- и среднеглинистыми южными среднemocными низкогумусными черноземами, при дополивной влажности увлажняемого слоя почвы $(65 \pm 5) \%$ от наименьшей влагоемкости. В процессе анализа и обобщения опытных материалов были получены нижеприведенные эмпирические зависимости, описывающие функциональную связь между определяющим форму и основные размеры контуров влажности соотношением $d_{кон}/h_{кон}$ и почвенными характеристиками $\overline{W}_r$ и $\overline{W}_{HB}$.

1 Однопараметрические зависимости по почвенному параметру $\overline{W}_r$:

$$d_{кон} / h_{кон} = 0,18 \cdot \overline{W}_r^{0,435} - \text{для } 25 \leq \overline{W}_r \leq 77 \% \text{ МСП}$$

при погрешности $\delta = 11,0 \%$;

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,54 + 0,009 \cdot \overline{W}_{\Gamma} - \text{для } 18 \leq \overline{W}_{\Gamma} \leq 70 \text{ \% МСП при } \delta = 12,2 \text{ \%};$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,524 + 0,0079 \cdot \overline{W}_{\Gamma} - \text{для } 15 \leq \overline{W}_{\Gamma} \leq 25 \text{ \% МСП при } \delta = 11,4 \text{ \%};$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,45 + 0,012 \cdot \overline{W}_{\Gamma}^{0,95} - \text{для } 50 \leq \overline{W}_{\Gamma} \leq 75 \text{ \% МСП при } \delta = 12,6 \text{ \%}.$$

2 Однопараметрические зависимости по почвенному параметру $\overline{W}_{\text{HB}}$:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,085 + 0,038 \cdot \overline{W}_{\text{HB}} - \text{для } 10 \leq \overline{W}_{\text{HB}} \leq 20 \text{ \% МСП при } \delta = 12,1 \text{ \%};$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,075 + 0,037 \cdot \overline{W}_{\text{HB}} - \text{для } 15 \leq \overline{W}_{\text{HB}} \leq 32 \text{ \% МСП при } \delta = 11,8 \text{ \%};$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,137 + 0,0334 \cdot \overline{W}_{\text{HB}} - \text{для } 13,5 \leq \overline{W}_{\text{HB}} \leq 32 \text{ \% МСП при } \delta = 9,6 \text{ \%};$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,09 + 0,037 \cdot \overline{W}_{\text{HB}} - \text{для } 15 \leq \overline{W}_{\text{HB}} \leq 25 \text{ \% МСП при } \delta = 8,1 \text{ \%}.$$

Приведенные однопараметрические зависимости соответствовали определенным пределам их применения в части условий капельного полива и диапазонов изменения параметров $\overline{W}_{\Gamma}$ и $\overline{W}_{\text{HB}}$. По мере накопления опытных данных указанные зависимости уточнялись и получили вид:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,52 + 0,009 \cdot \overline{W}_{\Gamma} - \text{для } 14,5 \leq \overline{W}_{\Gamma} \leq 80 \text{ \% МСП}; \quad (1)$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,14 + 0,034 \cdot \overline{W}_{\text{HB}} - \text{для } 13,5 \leq \overline{W}_{\text{HB}} \leq 34 \text{ \% МСП}. \quad (2)$$

Апробация зависимостей (1) и (2) на части известных и авторских контуров влажности показала, что наряду с достаточной для практики точностью определяемых по ним значений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ имеют место и определенные отклонения. Одной из причин этого могут быть неточности в определении опытных значений как почвенных характеристик ($\overline{W}_{\Gamma}$ и $\overline{W}_{\text{HB}}$), так и опытно определяемого значения соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$. Для нейтрализации указанного обстоятельства было принято решение о применении двухпараметрических зависимостей, имеющих вид:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,62 \cdot (\overline{W}_{\Gamma} / \overline{W}_{\text{HB}})^{0,71}, \quad (3)$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,5 \cdot [(0,52 + 0,009 \cdot \overline{W}_{\Gamma}) + (0,14 + 0,034 \cdot \overline{W}_{\text{HB}})]. \quad (4)$$

Апробация зависимостей (3) и (4) показала повышение точности соответствия расчетных значений $(d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}})_{\text{расч}}$ опытным $(d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}})_{\text{оп}}$.

На втором этапе исследований устанавливалось влияние интенсивности водоподачи (расхода капельницы) на рассматриваемое соотношение $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$, для чего на четырех опытных площадках была поставлена серия опытов с разными значениями расходов капельниц $q_{\text{кап}}$ от 1,0 до 4,0 л/ч, а на одной из них при значениях $q_{\text{кап}} = 1,0; 2,0; 4,0$ и 6,0 л/ч. Одинаковость почвенных и влажностных условий серии проведенных полевых опытов позволяла выделить и оценить влияние значений расхода капельниц $q_{\text{кап}}$ на величину соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ и форму контура влажности.

Предварительное сопоставление фактических значений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ в контурах, сформировавшихся при $q_{\text{кап}} = 2,0$ л/ч, с расчетными по зависимостям (3) и (4) показало их соответствие. Указанное обстоятельство позволило допустить возможность установления корректирующего коэффициента к зависимостям (3) и (4) в виде функциональной связи $k_q = f(q_{\text{кап}}; \overline{W}_r / \overline{W}_{\text{HB}})$. Дисперсионно-корреляционным анализом опытных данных, характеризующих указанную функциональную связь, установлена возможность ее описания эмпирической зависимостью вида:

$$k_q = \left(\frac{q_{\text{кап}}}{2,0} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{\text{HB}}} . \quad (5)$$

С учетом связи (5) зависимость (4) приобретает вид:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,5 \cdot \left(\frac{q_{\text{кап}}}{2,0} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{\text{HB}}} \cdot \left[(0,52 + 0,009 \cdot \overline{W}_r) + (0,14 + 0,034 \cdot \overline{W}_{\text{HB}}) \right] . \quad (6)$$

Зависимость (6) позволяет учитывать влияние на величину соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ таких параметров, как $\overline{W}_r$, $\overline{W}_{\text{HB}}$ и $q_{\text{кап}}$, но не учитывает

влияние на его значение такого достаточно значимо влияющего на геометрию контура фактора, как дополивная влажность почвы $\beta_{д/п}$.

Для выявления воздействий данного фактора на одной из опытных площадок была проведена серия опытов с разным уровнем дополивной влажности почвы, регулируемым от $\beta_{д/п} = 0,6 \cdot W_{HB}$ до $\beta_{д/п} = 0,8 \cdot W_{HB}$ ее предварительной заливкой водой. Опыты проводились при одинаковых значениях $q_{кап} = 2,0$ л/ч, $\overline{W}_r = 53,5$ % МСП и $\overline{W}_{HB} = 26,0$ % МСП. Полученные опытные данные позволили установить зависимость для определения значений корректирующего коэффициента k_β в виде:

$$k_\beta = (\overline{W}_r / \overline{W}_{HB})^{0,4} \times \left(1,0 - \frac{\beta_{д/п}}{\overline{W}_{HB}} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{HB}}. \quad (7)$$

Учет корректирующего коэффициента k_β по зависимости (7) позволяет записать:

$$d_{кон} / h_{кон} = 0,5 \cdot \left(\frac{q_{кап}}{2,0} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{HB}} \cdot [(0,52 + 0,009 \cdot \overline{W}_r) + (0,14 + 0,034 \cdot \overline{W}_{HB})] \times \\ \times (\overline{W}_r / \overline{W}_{HB})^{0,4} \times \left(1,0 - \frac{\beta_{д/п}}{\overline{W}_{HB}} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{HB}}. \quad (8)$$

Четырехфакторная эмпирическая зависимость (8) позволяет устанавливать (прогнозировать) значения $d_{кон} / h_{кон}$ для широкого диапазона почвенных и основных технологических условий капельного полива.

При заданной (по условию заглубленности основной массы корней корневой системы растения) глубине увлажняемого почвенного профиля $h_{увл} = h_{кон}$ (глубине контура влажности) по значению соотношения $d_{кон} / h_{кон}$, определяемому по зависимости (8), устанавливается диаметр контура влажности:

$$d_{\text{кон}} = 0,5 \cdot h_{\text{кон}} \cdot \left(\frac{q_{\text{кап}}}{2,0} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_{\Gamma} / \overline{W}_{\text{HB}}} \cdot [0,66 + 0,009 \cdot \overline{W}_{\Gamma} + 0,034 \cdot \overline{W}_{\text{HB}}] \times \\ \times (\overline{W}_{\Gamma} / \overline{W}_{\text{HB}})^{0,4} \times \left(1,0 - \frac{\beta_{\text{д/п}}}{\overline{W}_{\text{HB}}} \right)^{0,1 \cdot \overline{W}_{\Gamma} / \overline{W}_{\text{HB}}}.$$

В процессе аналитической обработки опытного материала установлены зависимости, позволяющие прогнозировать геометрические (линейные, площадные и объемные) параметры локальных контуров влажности, формирующихся в почвенном пространстве при надземно-капельном поливе:

- для определения среднего диаметра контура влажности, м:

$$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}} = 0,78 \cdot d_{\text{кон}};$$

- для определения поверхностного диаметра контура влажности, м:

$$(d_{\text{кон}})_{\text{пов}} / d_{\text{кон}} = 1,164 - 0,269 \cdot \overline{W}_{\Gamma} / \overline{W}_{\text{HB}},$$

или:

$$(d_{\text{кон}})_{\text{пов}} / d_{\text{кон}} = 0,5 \cdot (2,0 - 0,005 \cdot \overline{W}_{\Gamma} \cdot \overline{\gamma}_{\text{об}} - 0,001 \cdot \overline{W}_{\text{HB}}^{1,84} - 0,002 \cdot \overline{W}_{\text{HB}}^{0,45});$$

- для определения максимальной площади контура влажности, м²:

$$\omega_{\text{кон}} = 0,785 \cdot d_{\text{кон}}^2;$$

- для определения общего объема контура увлажненной почвы, м³:

$$V_{\text{кон}} = 0,785 \cdot (d_{\text{кон}})_{\text{ср}}^2 \cdot h_{\text{кон}}.$$

Использование системы вышеприведенных зависимостей позволяет предложить методику прогнозирования геометрических параметров локальных контуров увлажняемого при надземно-капельном поливе почвенного пространства, блок-схема которой проиллюстрирована на рисунке 5.

Расчетные (прогнозируемые) геометрические параметры локальных контуров влажности обеспечиваются подачей поливной воды одним капельным микроводовыпуском в объеме, определяемом по зависимости, л/кап.:

$$N_{\text{кап}} = 10 \cdot \overline{\gamma}_{\text{об}} \cdot W_{\text{кон}} \cdot (\varepsilon_{\text{п/п}} - \varepsilon_{\text{д/п}}) \cdot \beta_{\text{HB}},$$

где $\varepsilon_{п/п}$ и $\varepsilon_{д/п}$ – долевые от β_{HB} значения уровней постполивной и дополивной влажности почвы соответственно, измеряемые в долях единицы.



Рисунок 5 – Блок-схема методики прогнозирования геометрических размеров локальных контуров капельно-увлажняемой почвы
Figure 5 – Block diagram of prediction technique of the local contours geometric dimensions of drip-moistened soil

Использование основных расчетных зависимостей для определения диаметра и глубины контура влажности позволило разработать графо-аналитический метод (способ) прогнозирования формы локального контура влажности и построения его внешнего очертания. Способ предусматривает использование относительных геометрических параметров контуров в виде функциональной связи $(r_{\text{кон}})_{h_i} / r_{\text{кон}} = f(h_i / h_{\text{кон}})$, где h_i – величина задаваемой заглубленности расчетного сечения контура под уровень поверхности земли (см. рисунок 1с), принимаемая от $h_i = 0,0$ до $h_i = h_{\text{кон}}$; $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – радиус локального контура влажности в заданном его сечении горизонтальной плоскостью на глубине h_i .

Существо предлагаемого метода расчета параметров и построения внешнего очертания контура влажности заключается в нижеследующей последовательности выполнения расчетных и графических операций.

1 Для определенных почвенных и технологических условий капельного полива ($\overline{W}_r$, $\overline{W}_{\text{НВ}}$, $\beta_{\text{д/п}}$, $\beta_{\text{НВ}}$, $\overline{\gamma}_{\text{об}}$, $h_{\text{увл}}$, $N_{\text{кап}}$, $q_{\text{кап}}$) устанавливаются значения диаметра $d_{\text{кон}}$ и радиуса контура влажности $r_{\text{кон}} = 0,5 \cdot d_{\text{кон}}$.

2 Задаются рядом (обычно 10) значений заглубленности расчетного сечения контура h_i в долях от $h_{\text{кон}}$: $0,0 \cdot h_{\text{кон}}$, $0,1 \cdot h_{\text{кон}}$, $0,2 \cdot h_{\text{кон}}$, ..., $1,0 \cdot h_{\text{кон}}$, что в относительных параметрах составляет $h_i / h_{\text{кон}} = 0,0$; $h_i / h_{\text{кон}} = 0,1$; $h_i / h_{\text{кон}} = 0,2$, ..., $h_i / h_{\text{кон}} = 0,9$ и $h_i / h_{\text{кон}} = 1,0$ соответственно.

3 Для каждого из значений $h_i / h_{\text{кон}}$ (сечений профиля контура) определяются соответствующие им относительные значения $(r_{\text{кон}})_{h_i} / r_{\text{кон}}$ с использованием экспериментальной полиномиальной зависимости вида:

$$\frac{(r_{\text{кон}})_{h_i}}{r_{\text{кон}}} = k_0 + k_1 \cdot \frac{h_i}{h_{\text{кон}}} - k_2 \cdot \left(\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right)^2 + k_3 \cdot \left(\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right)^3 - k_4 \cdot \left(\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right)^5 - k_5 \cdot \left(\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right)^7,$$

где k_0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 – эмпирические коэффициенты при членах полинома,

значения которых составляют: $k_0 = 1,169 - 0,269 \cdot \overline{W}_r / \overline{W}_{HB}$; $k_1 = 1,03 / k_0^{1,2}$; $k_2 = k_0 + k_1$; $k_3 = 0,254$; $k_4 = 0,2$ и $k_5 = 0,054$.

4 В соответствии с условно принятыми значениями $h_i / h_{\text{кон}}$ для известного значения $h_{\text{кон}} = h_{\text{увл}}$ определяются абсолютные значения h_i с использованием соотношений: $h_0 = 0,0 \cdot h_{\text{кон}}$; $h_1 = 0,1 \cdot h_{\text{кон}}$; $h_2 = 0,2 \cdot h_{\text{кон}}$, ..., $h_9 = 0,9 \cdot h_{\text{кон}}$ и $h_{10} = 1,0 \cdot h_{\text{кон}}$. Полученные значения $h_0 - h_{10}$ являются вертикальными координатами прогнозируемого очертания контура влажности.

5 По полученным значениям отношения $(r_{\text{кон}})_{h_i} / r_{\text{кон}}$ при известном значении $r_{\text{кон}}$ устанавливаются соответствующие глубине h_i абсолютные величины радиусов локального контура капельного увлажнения почвы в соответствующих его сечениях: $(r_{\text{кон}})_{h_i=0} = r_{\text{кон}} \cdot ((r_{\text{кон}})_{h_i=0} / r_{\text{кон}})$, $(r_{\text{кон}})_{h_i=0,1h_{\text{кон}}} = r_{\text{кон}} \cdot ((r_{\text{кон}})_{h_i=0,1h_{\text{кон}}} / r_{\text{кон}})$, ..., $(r_{\text{кон}})_{h_i=h_{\text{кон}}} = r_{\text{кон}} \cdot ((r_{\text{кон}})_{h_i=h_{\text{кон}}} / r_{\text{кон}})$.

6 В соответствии с данными рисунка 1в на схему в принятом одинаковом по вертикали и горизонтали масштабе наносятся точки с координатами h_i и соответствующими им $(r_{\text{кон}})_{h_i}$. При последовательном соединении координатных точек линиями получают внешнее очертание контура влажности.

Вывод. В результате проведения полевых исследований параметров контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в широком спектре почвенных и технологических условий проведения капельного полива, и камеральной обработки полученных результатов предложена система эмпирических зависимостей и разработана методика прогнозирования формы (внешнего очертания), линейных, площадных и объемных параметров локальных контуров влажности, формирующихся в почвенном пространстве при надземно-капельном поливе.

Список источников

1. Ахмедов А. Д., Галиуллина Е. Ю. Контуры увлажнения почвы при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3. С. 183–188.
2. Зубаиров О. З., Жатканбаева А. О. Исследования контура увлажнения и режим орошения почвы при капельном орошении // Водное хозяйство Казахстана. 2006. № 1(9). С. 9–12.
3. Лытов М. Н. Особенности применения дифференцированных режимов водообеспечения при капельном способе орошения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2020. № 2(78). С. 54–60.
4. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В. Компьютерное моделирование и параметризация в среде MathCAD контуров увлажнения при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 4(64). С. 367–378. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37.
5. Овчинников А. С., Азарьева И. И. Особенности распространения влаги в контуре увлажнения при капельном орошении // Плодородие. 2010. № 1. С. 29–30.
6. Олейник А. М., Гаджиев М. К. Характер формирования контуров увлажнения почвы при капельном орошении // Режимы орошения и водопотребление сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе. Новочеркасск, 1984. С. 129–133.
7. Прокопец Р. В., Сергеева Е. А. Измерение параметров контура увлажнения при капельном орошении в зависимости от интенсивности водоподачи // Аграрный научный журнал. 2015. № 4. С. 62–66.
8. Расчет поливных норм при капельном орошении в условия сухостепного Заволжья / Н. А. Пронько, В. В. Корсак, Ю. Ю. Каднова, М. Ю. Филиппова, О. А. Баклушина // Основы рационального природопользования: материалы VI Нац. конф. с международным участием. Саратов, 2020. С. 55–59.
9. Храбров М. Ю. Расчет распространения влаги в почве при капельном орошении // Мелиорация и водное хозяйство. 1999. № 4. С. 34–35.
10. Штанько А. С., Шкура В. Н. Способ графоаналитического построения очертания 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: 15.01.2023).
11. Штанько А. С., Шкура В. Н. Геометрия локальных контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в южных черноземах // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 3. С. 123–140. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1297> (дата обращения: 15.01.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>.
12. Ясониди О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с.
13. Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches / B. Karimi, N. Karimi, J. Shiri, H. Sanikhani // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2022. 36. P. 157–172. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y>.
14. Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches / S. Solat, F. Alinazari, E. Maroufpoor, J. Shiri, B. Karimi // Journal of Hydrology. 2021. 601. 126835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126835>.

References

1. Akhmedov A.D., Galiullina E.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Contours of soil moistening during drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc.

of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 3, pp. 183-188. (In Russian).

2. 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).

3. Lytov M.N., 2020. *Osobennosti primeneniya differentsirovannykh rezhimov vo doobespecheniya pri kapel'nom sposobe orosheniya* [Features of differentiated water supply modes application with drip irrigation method]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(78), pp. 54-60. (In Russian).

4. Rogachev A.F., Melikhova E.V., 2021. *Komp'yuternoe modelirovanie i parametri-zatsiya v srede MathCAD konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii* [Computer modeling and parameterization in Mathcad environment of humidification contours during drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee profes-sional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4(64), pp. 367-378, DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37. (In Russian).

5. Ovchinnikov A.S., Azaryeva I.I., 2010. *Osobennosti rasprostraneniya vlagi v kon-ture uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii* [Features of moisture distribution in moisture con-tour during drip irrigation]. *Plodorodie* [Fertility], no. 1, pp. 29-30. (In Russian).

6. Oleinik A.M., Gadzhiev M.K., 1984. *Kharakter formirovaniya konturov uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [The nature of moisture contour formation under drip irriga-tion]. *Rezhimy orosheniya i vodopotreblenie sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na Severnom Kavkaze: sb. nauch. tr.* [Irrigation Regimes and Water Consumption of Agricultural Crops in the North Caucasus: coll. of scientific papers]. Novocherkassk, pp. 129-133. (In Russian).

7. Prokopets R.V., Sergeeva E.A., 2015. *Izmerenie parametrov kontura uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii v zavisimosti ot intensivnosti vodopodachi* [Changing the parameters of moisture contour during drip irrigation depending on intensity of water supply]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 4, pp. 62-66. (In Russian).

8. Pronko N.A., Korsak V.V., Kadnova Yu.Yu., Philipova M.Yu., Baklushina O.A., 2020. *Raschet polivnykh norm pri kapel'nom oroshenii v usloviyakh sukhostepnogo Zavolzh'ya* [Calculation of irrigation rates for drip irrigation under the conditions of Trans-Volga dry steppe]. *Osnovy ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy VI Natsionalnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Basics of Rational nature management: Proc. of VI National Conference with International Participation]. Saratov, pp. 55-59. (In Russian).

9. Khrabrov M.Yu., 1999. *Raschet rasprostraneniya vlagi v pochve pri kapel'nom oro-shenii* [Calculation of moisture distribution in soil during drip irrigation]. *Melioratsiya i vod-noe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 34-35. (In Russian).

10. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2018. [A method for grapho-analytical construction of the contours of drip soil moistening]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(29), pp. 67-85, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531> [assessed 15.01.2023]. (In Russian).

11. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2022. [Geometry of drip soil moisture local contours formed in southern chernozems]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 3, pp. 123-140, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1297> [accessed 15.01.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>. (In Russian).

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

13. Karimi B., Karimi N., Shiri J., Sanikhani H., 2022. Modeling moisture redistribu-

tion of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, no. 36, pp. 157-172, <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y>.

14. Solat S., Alinazari F., Maroufpoor E., Shiri J., Karimi B., 2021. Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches. Journal of Hydrology, 601, 126835, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126835>.

Информация об авторах

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор;

А. С. Штанько – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук.

Information about the authors

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor;

A. S. Shtanko – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 17.03.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 17.03.2023.