

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30>**РАВНОМЕРНОСТЬ УВЛАЖНЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ОРОСИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ КРОТОВОГО ПОЛИВА В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ**

Научная статья

Ходяков Е.А.¹, Петров Н.Ю.², Милованов С.Г.³, Бондаренко К.В.⁴*^{1, 2, 3, 4} Волгоградский Государственный Аграрный Университет, Волгоград, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kirill-bondarenko-1995[at]mail.ru)

Аннотация

В условиях нарастающего дефицита пресных вод актуальность водосберегающих способов и технологий полива сельскохозяйственных культур ежегодно растёт. В этом плане капельное и внутрипочвенное орошение вместе с его основной разновидностью – кротовым орошением выгодно отличаются от дождевания и поверхностных способов. В статье представлены результаты исследований по изучению особенностей кротового орошения, проведённых в Волгоградском ГАУ на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья в 2022 г. Кротовое орошение представляет из себя способ полива, при котором поливная сеть почвенных труб из уплотнённой почвы нарезается специальным рабочим органом, за счёт чего капитальные затраты на строительство поливного участка сводятся к минимуму. Одна из основных задач проведённых исследований заключалась в обеспечении равномерности увлажнения почвы по длине кротовых оросителей. Нарезка таких оросителей под каждым рядом растений обеспечит равномерность увлажнения всего стеблестоя и стабильность урожая. Равномерность увлажнения оценивали с помощью периодических замеров в течении поливного сезона контуров увлажнения почвы в начале (5 м по длине от начала), в середине (50 м от начала) и в конце (95 м от начала или 5 м от конца) кротовых оросителей длиной 100 м. Для их характеристики было выделено 3 зоны с различной степенью увлажнения: зона переувлажнения (> 110% НВ); зона нормального увлажнения (90...110% НВ) и зона пониженного увлажнения (75...90% НВ). Результаты многократных полевых опытов показали, что границы этих зон вверх-вниз, вправо-влево от оси кротового оросителя не имели существенных отличий в начале, середине и конце кротовины. Такая же закономерность была получена при оценке площади распространения этих зон. Площади зоны переувлажнения в начале, середине и конце кротовины в среднем за сезон составили 1236, 880 и 1116; зоны нормального увлажнения 3755, 3429 и 3581; зоны пониженного увлажнения 4550, 4148 и 4437 см². Разница между ними не превышала допустимых предельных значений, равных соответственно НСР₀₅ = 387, 359 и 443 см². Таким образом, исследования показали, что при длине кротового увлажнителя 100 м оросительная вода распределялась равномерно по всей его длине, что обеспечивало равномерность увлажнения активного слоя почвы во всей зоне его расположения.

Ключевые слова: кротовое орошение, равномерность увлажнения, контура увлажнения, распределение поливной воды по длине оросителей.

HUMIDIFICATION EQUALITY ALONG THE LENGTH OF IRRIGATORS OF MOLE IRRIGATION SYSTEM IN THE CONDITIONS OF THE LOWER VOLGA REGION

Research article

Khodiakov E.A.¹, Petrov N.Y.², Milovanov S.G.³, Bondarenko K.V.⁴*^{1, 2, 3, 4} Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation

* Corresponding author (kirill-bondarenko-1995[at]mail.ru)

Abstract

In conditions of increasing fresh water deficit, the relevance of water-saving methods and technologies of crop irrigation grows annually. In this regard, drip and in-soil irrigation together with its main variety – mole irrigation favourably differ from sprinkling and surface methods. The article presents the results of research on studying the traits of mole irrigation, conducted in Volgograd State Agricultural University on light-chestnut soils of the Lower Volga region in 2022. Mole irrigation is a method of watering, in which the irrigation network of soil pipes from compacted soil is cut by a special working organ, due to which capital costs for the construction of the irrigation site are minimized. One of the main tasks of the conducted research was to ensure uniformity of soil moistening along the length of mole irrigators. The cutting of such irrigators under each row of plants will ensure evenness of humidification of the whole stalk and stability of yield. Moisture uniformity was evaluated by periodic measurements during the irrigation season of soil moisture contours at the beginning (5 m along the length from the beginning), in the middle (50 m from the beginning) and at the end (95 m from the beginning or 5 m from the end) of 100 mole irrigators. To characterize them, 3 zones with different degrees of humidification were identified: the zone of over-humidification (> 110% NV); the zone of normal humidification (90...110% NV) and the zone of low humidification (75...90% NV). The results of repeated field experiments showed that the boundaries of these zones up-down, right-left from the axis of the mole irrigator had no significant differences at the beginning, middle and end of the mole. The same pattern was obtained when assessing the area of distribution of these zones. The areas of the overwatering zone at the beginning, middle and end of the mole-hole averaged 1236, 880 and 1116 per season; the areas of the normal wetting zone 3755, 3429 and 3581; the areas of the low wetting zone 4550, 4148 and 4437 cm². The difference between them did not exceed the permissible limit values equal to NSR₀₅ = 387, 359 and 443 cm², respectively. Thus, the research showed that at the length of mole humidifier 100 m

irrigation water was distributed uniformly along its entire length, which provided uniformity of moistening of the active soil layer in the entire zone of its location.

Keywords: mole irrigation, humidification equality, humidification contours, irrigation water distribution along the length of irrigators.

Введение

В современном мире одним из основных требований, предъявляемым к поливной технике, является ресурсосбережение. В этом плане внутрипочвенное орошение (ВПО) выгодно отличается от других способов полива, так как является наиболее водосберегающим способом, однако ВПО сельскохозяйственных культур имеет довольно узкую область применения. Из-за значительных капитальных вложений для строительства оросительного участка оно применяется только для полива садов, виноградников, и реже для выращивания кормовых культур. Одной из наиболее перспективных разновидностей внутрипочвенного способа полива, лишённого такого существенного недостатка как высокие капитальные затраты, является кротовое внутрипочвенное орошение. Этот способ не требует капитального строительства орошаемого участка, за счёт чего начальные затраты сводятся к минимуму. При этом данный способ полива способствует значительному снижению затрат оросительной воды и повышению урожайности сельскохозяйственных культур.

Одновременно с этим кротовое орошение способствует сохранению структуры почвы, так как вода восходящим потоком поступает непосредственно к корням растений, без уплотнения почвы и образования почвенной корки на поверхности.

В связи с этим изучение особенностей применения внутрипочвенного орошения по кротовинам является актуальным и перспективным направлением исследований, над которым работают учёные во множестве стран: в Австралии [1], Бразилии [2], Ирландии [3], Аргентине [4], Португалии [5], Египте [6], Китае [7], США [8], Канаде [9], Иране [10] и Нидерландах [11].

В Российской Федерации рассматриваемый способ полива изучали в основном при поливе сточными водами [12], [13], а также как противоэрозионную технологию орошения склоновых земель при поливе виноградников [14] и как дополнительный способ полива угловых участков поля с дождевальной машиной «Фрегат» [15].

На светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья, находящегося на юге России, исследования особенностей данного способа полива проводятся впервые. В процессе орошения сельхозкультур необходимо обеспечить равномерность их увлажнения, в связи с этим одна из центральных задач наших исследований заключалась в обеспечении равномерности увлажнения почвы по длине кротовых оросителей, расположенных под каждым рядом растений.

Методы и принципы исследования

Исследования были проведены в 2022 г. в Волгоградской области на опытных полях Учебно-научно-производственного центра «Горная Поляна» Волгоградского государственного аграрного университета. Почвенно-климатические условия Волгоградской области являются типичными для Нижнего Поволжья: климат – резко континентальный, лето – жаркое и сухое с практически полным отсутствием дождей в июле и августе, а зима – холодная и малоснежная, почвы опытного участка – светло-каштановые, средне- и тяжёлосуглинистые. Грунтовые воды находились на глубине более трёх метров и не влияли на характер расположения контуров увлажнения в исследуемом слое почвы 0,0-1,0 м.

В наших опытах периодически изучались контура увлажнения почвы в начале (5 м по длине от начала), в середине (50 м от начала) и в конце (95 м от начала или 5 м от конца) кротовых оросителей длиной 100 м и диаметром 60 мм. Глубина нарезки увлажнителей составляла 0,4 м.

Измерение влажности почвы для построения контуров увлажнения проводили на следующий день после полива.

Отбор проб проводили вправо и влево от оси кротовины на расстояние 1 м с шагом 20 см и на глубину до 1 м с таким же шагом.

Средняя влажность почвы перед поливом в слое 0,0-1,0 м составляла 69,3% НВ.

Математическую обработку полученных результатов и построение изоплет влажности почвы проводили с помощью «Microsoft Excel 2010», «Surfer 12» и «STATISTICA».

Наблюдения за характером распределения оросительной воды в зависимости от длины кротовых оросителей проводили неоднократно, в статье представлены наиболее типичные расположения изоплет влажности в почвенном разрезе.

Почвенный разрез был рассмотрен на глубину 1,0 м и по 1,0 м вправо и влево от оси кротовины.

Нарезку кротовых оросителей производили с помощью специального рабочего органа, показанного на рисунке 1.

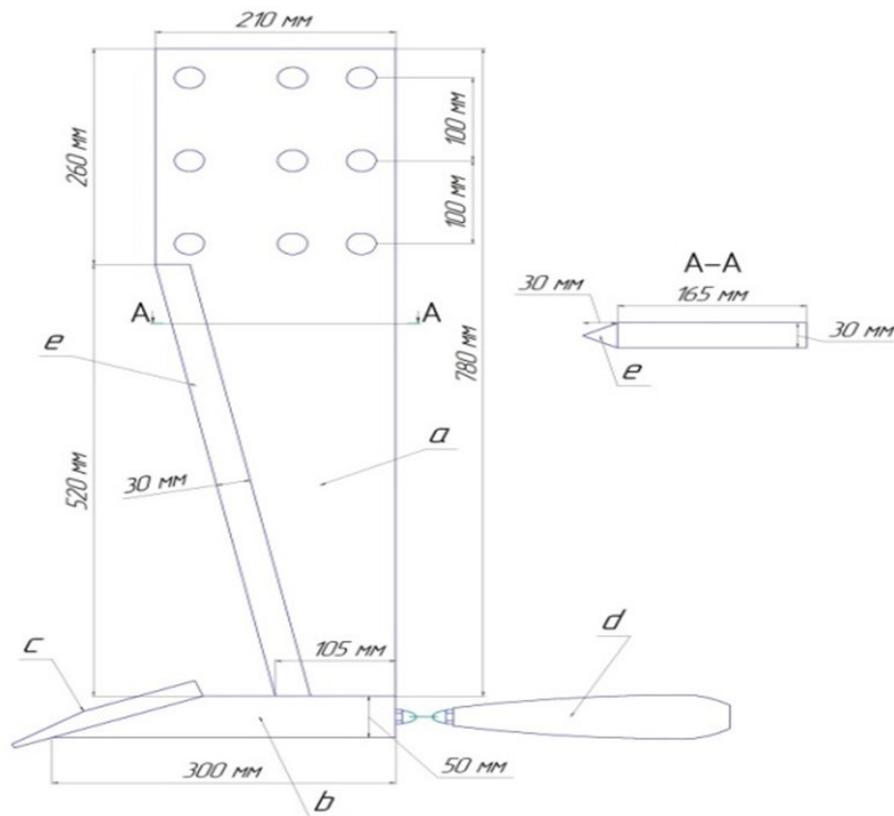


Рисунок 1 - Рабочий орган кротователя и его элементы:
a – стойка, *b* – дренаер, *c* – долото, *d* – уширитель, *e* – нож
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.1>

Основные результаты и обсуждение

Контура увлажнения почвы в среднем за поливной сезон в начале (5 м по длине от начала), в середине (50 м от начала) и в конце (95 м от начала или 5 м от конца) кротовых оросителей длиной 100 м показаны соответственно на рисунках 2, 3 и 4.

После построения изоплет влажности почвы мы оценивали эффективность распределения оросительной воды по почвенному срезу. Для удобства было выделено 3 зоны с различной степенью увлажнения:

- зона переувлажнения (> 110 % НВ);
- зона нормального увлажнения (90...110 % НВ);
- зона пониженного увлажнения (75...90 % НВ).

Границы этих зон отчётливо демонстрируют характер увлажнения почвы в зависимости от длины кротовых оросителей.

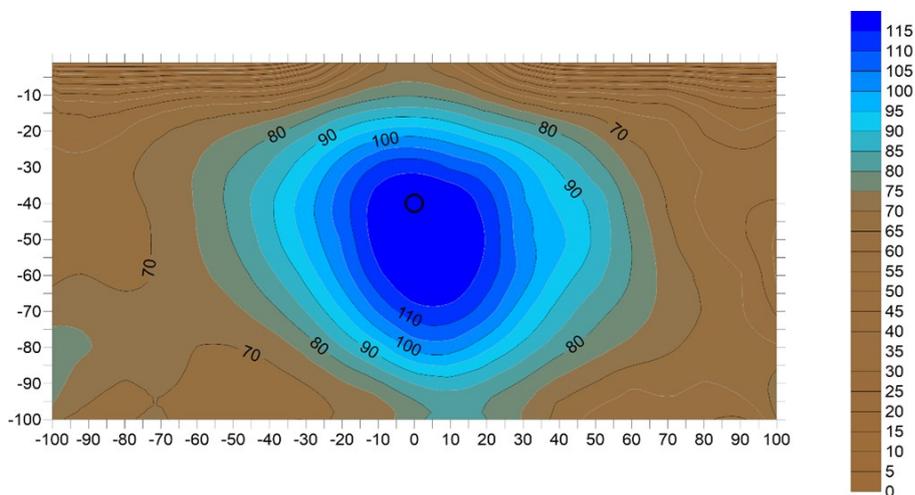


Рисунок 2 - Контура увлажнения почвы в начале кротовины
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.2>

Примечание: 5 м от начала

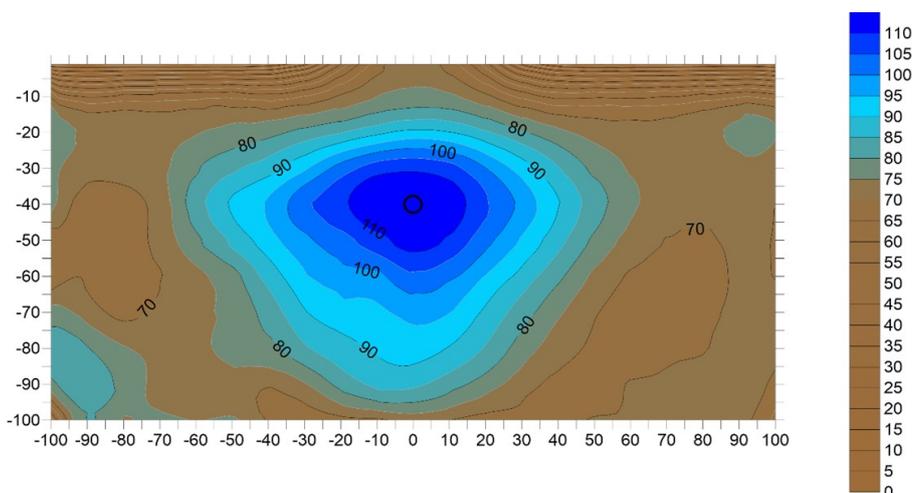


Рисунок 3 - Контур увлажнения почвы в середине кротовины
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.3>

Примечание: 50 м от начала

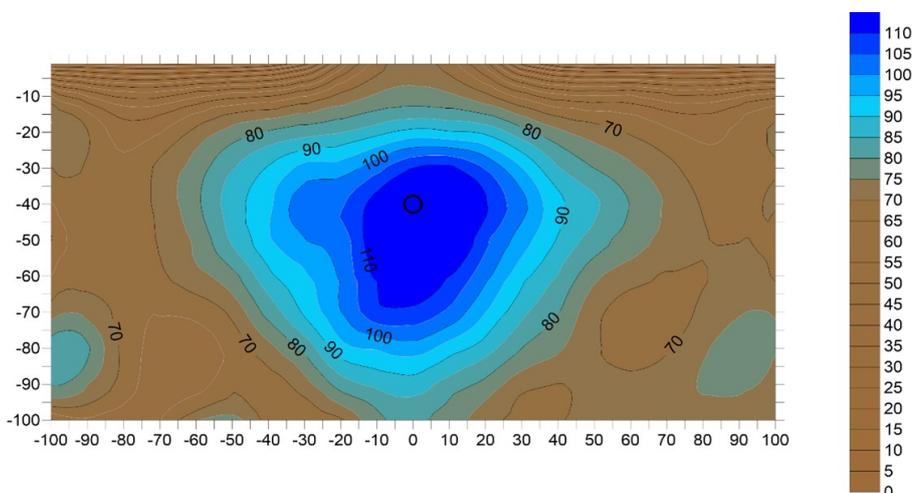


Рисунок 4 - Контур увлажнения почвы в конце кротовины
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.4>

Примечание: 95 м от начала

Внешние границы зон увлажнения по вариантам опыта показаны в таблице 1.

Результаты полевых опытов показали, что в начале кротового оросителя на следующий день после полива верхняя граница зоны переувлажнения находилась выше кротовины на глубине 29 см от поверхности земли, нижняя граница – на глубине 73 см, левая граница – на расстоянии 14 см от кротовины, а правая – на расстоянии 22 см. В середине и в конце кротового оросителя верхняя граница зоны переувлажнения опустилась вниз до глубины 31 см от поверхности земли, а нижняя граница поднялась вверх до глубины 52...65 см от поверхности почвы. Левая граница перемещалась влево от кротовины на 15...18 см, а правая вправо – на расстояние 14...18 см.

Таблица 1 - Внешние границы зон увлажнения почвы в начале середине и конце кротовых оросителей

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.5>

Расположение контуров увлажнения (расстояние от начала кротовины)	Выше кротовины, см от поверхности земли	Ниже кротовины, см от поверхности земли	Слева от кротовины, см от её оси	Справа от кротовины, см от её оси
Внешняя граница зоны переувлажнения (расположение изоплеты 110 % НВ)				
В начале (5 м)	29	73	-14	+22
В середине (50м)	31	52	-18	+14
В конце (95 м)	31	65	-15	+18
Внешняя граница зоны нормального увлажнения (расположение изоплеты 90 % НВ)				
В начале (5 м)	14	83	-38	+48
В середине (50м)	21	84	-49	+38
В конце (95 м)	22	84	-46	+42
Внешняя граница зоны пониженного увлажнения (расположение изоплеты 75 % НВ)				
В начале (5 м)	7	100	-63	+65
В середине (50м)	0	93	-70	+65
В конце (95 м)	0	100	-66	+69

Верхняя граница зоны нормального увлажнения в начале кротового оросителя находилась на уровне 14 см от поверхности земли. Нижняя граница находилась на глубине 83 см. Левая граница расширялась влево от кротовины на 38 см, а правая вправо – на расстоянии 48 см. В середине и в конце кротового оросителя верхняя граница зоны нормального увлажнения опустилась вниз до глубины 21...22 см от поверхности земли. Нижняя граница находилась примерно на том же уровне 84 см от поверхности почвы. Левая граница расширилась влево до 46...49 см от кротовины, а правая, наоборот, сузилась до 38...42 см.

Верхняя граница зоны пониженного увлажнения в начале кротового оросителя находилась на уровне 7 см от поверхности земли. Нижняя граница находилась на глубине 100 см. Левая граница расширялась влево от кротовины на 63 см, а правая вправо – на расстоянии 65 см. В середине и в конце кротового оросителя верхняя граница зоны пониженного увлажнения поднялась вверх до поверхности земли. Нижняя граница находилась примерно на том же уровне 93...100 см от поверхности почвы. Левая граница расширилась влево до 66...70 см от кротовины, а правая вправо - 65...69 см.

Такая динамика контуров увлажнения вызвала соответствующее изменение площадей изучаемых зон (см. табл. 2).

В начале кротовых оросителей зона переувлажнения занимала площадь 1236, в середине она снижалась до 880 и в конце вновь возрастала до 1116 см².

Аналогичные закономерности наблюдались в зонах нормального и пониженного увлажнения. В результате вся зона увлажнения в середине кротовины составила 8457 см², что было на 1084 и 677 см² меньше, чем в начале и конце оросителя. Это было вызвано тем, что в середине напор несколько снижался по сравнению с начальным и конечным участками.

При этом расчёты показали, что площадь зоны переувлажнения, составившая 880...1236 см², в связи с переходом в зону нормального увлажнения возрастала до 3429...3755 см² и далее до 4188...4550 см² при дальнейшем переходе в зону пониженного увлажнения. То есть, последняя зона охватывает 47,7...49,5 % или почти половину всей исследуемой области вправо и влево по 100 см от оси кротователя и вниз до 100 см.

Таблица 2 - Изменение площади зон увлажнения почвы в начале, середине и конце кротовых оросителей

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.6>

Расположение контуров увлажнения (расстояние от начала кротовины)	Зона переувлажнения (> 110 % НВ)		Зона нормального увлажнения (90...110 % НВ)		Зона пониженного увлажнения (75...90 % НВ)	
	см ²	%	см ²	%	см ²	%
В начале (5)	1236	13,0	3755	39,4	4550	47,7

м)						
В середине (50м)	880	10,4	3429	40,5	4148	49,0
В конце (95 м)	1116	12,2	3581	39,2	4437	48,6

По полученным значениям площадей трёх зон увлажнения в начале, середине и конце был проведён однофакторный дисперсионный анализ, в результате которого было установлено, что расстояние от начала кротовины оказывало влияние на площади зон увлажнения, так как F фактическое ($F_{ф}$) было больше F критического (F_{05}):

- для зоны переувлажнения ($> 110\% \text{ НВ}$) – $F_{ф}=90,9 > F_{05}=7,709$;
- для зоны нормального увлажнения ($90...110\% \text{ НВ}$) – $F_{ф}=131 > F_{05}=7,709$;
- для зоны пониженного увлажнения ($75...90\% \text{ НВ}$) – $F_{ф}=1249 > F_{05}=7,709$.

Дальнейшая статистическая обработка результатов исследования показала, что несмотря на уменьшение площадей зон увлажнения в середине кротовых оросителей, величина этого снижения не превышала наименьшей существенной разности (НСР_{05}).

Так, для значений площади зоны переувлажнения НСР_{05} составляла 387 см^2 , а фактическая разница находилась в пределах $|120|...|356| \text{ см}^2$. Аналогичная ситуация наблюдалась при сравнении площадей зоны нормального увлажнения и пониженного увлажнения, которые различались соответственно на $|174|...|326|$ и $|113|...|402| \text{ см}^2$, а НСР_{05} составляла соответственно 359 и 443 см^2 , что свидетельствует о том, что по длине 100-метровой кротовины оросительная вода распределяется равномерно.

Также статистическая обработка результатов исследований позволила выразить зависимость между зоной увлажнения (X) и площадью увлажнения (Y) в виде уравнения множественной регрессии:

$$Y = 10441,9167 - 82,525X.$$

Статистическая значимость уравнения проверена с помощью критерия Фишера и коэффициента детерминации (R^2), который составлял $0,91$, что говорит нам о том, что полученная модель достоверно описывает исходные данные (т. к. $0,9 < |R^2| < 1$). Установлено, что в исследуемой ситуации 91% общей вариальности Y (площадь увлажнения) объясняется изменением факторов X_j . (зона увлажнения) Установлено также, что параметры модели статистически значимы.

Если рассмотреть контур увлажнения (площадь увлажнения), как функцию от рассматриваемой зоны увлажнения (влажность почвы, приняв $100\% \text{ НВ}$ за единицу) и расположения участков по длине кротового оросителя, то эту поверхность регрессии можно изобразить в виде представленного графика и уравнения (см. рис. 5).

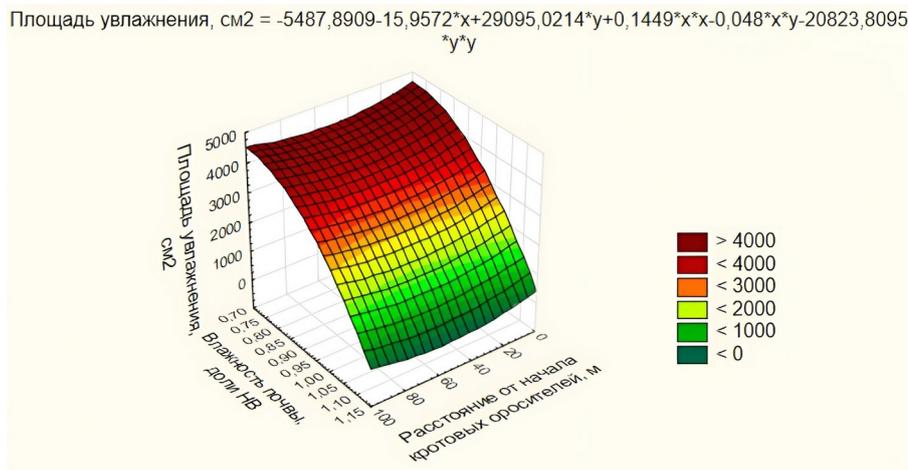


Рисунок 5 - График поверхности для площади увлажнения, расстояния от начала кротовых оросителей и влажности почвы

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.7>

Заключение

Таким образом, проведённые на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья в 2022 г. исследования показали, что при длине кротового увлажнителя 100 м оросительная вода распределялась равномерно на всём протяжении кротовины, что обеспечивало равномерность увлажнения активного слоя почвы по длине кротовых оросителей.

Так, в начале кротового оросителя на следующий день после полива верхняя граница зоны нормального увлажнения ($90...110\% \text{ НВ}$) в начале кротового оросителя находилась на уровне 14 см от поверхности земли. Нижняя граница находилась на глубине 83 см . Левая граница расширялась влево от кротовины на 38 см , а правая вправо – на расстоянии 48 см . В середине и в конце кротового оросителя верхняя граница зоны нормального увлажнения опустилась вниз до глубины $21...22 \text{ см}$ от поверхности земли. Нижняя граница находилась примерно на том же уровне – 84 см от поверхности почвы. Левая граница расширилась влево до $46...49 \text{ см}$ от кротовины, а правая, наоборот,

сузилась до 38...42 см. Распространение оставшихся зон (пониженного (75...90% НВ) и повышенного (> 110% НВ)) увлажнения в начале, середине и конце кротовины также не имело существенных различий.

Площади зон увлажнения с увеличением расстояния от начала кротовины изменялись не существенно: площадь зоны переувлажнения в начале, середине и конце кротовины составляла 1236, 880 и 1116 см² соответственно, что не превышало НСР₀₅ = 387 см²; площадь зон нормального и пониженного увлажнения соответственно составляла 3755 и 4550 в начале, 3429 и 4148 в середине, 3581 и 4437 в конце при НСР₀₅ равной 359 и 443 см².

Финансирование

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Администрации Волгоградской области по проекту №22-26-20070, <https://rscf.ru/project/22-26-20070>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.8>

Funding

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Administration of the Volgograd Region under project No. 22-26-20070, <https://rscf.ru/project/22-26-20070>.

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.30.8>

Список литературы / References

- Christena E.W. Improving Mole Drainage Channel Stability in Irrigated Areas / E.W. Christena, G. Spoorb // *Agricultural Water Management*. — 2001. — 3(48). — p. 239-253.
- Filipovićabc V. Numerical Simulation of Water Flow in Tile and Mole Drainage Systems / V. Filipovićabc, F.J. Kochem, Y. Coquetc et al. // *Agricultural Water Management*. — 2014. — 146. — p. 105-114.
- Rodgersa M. Model Study of Mole Drain Spacing and Performance / M. Rodgersa, J. Mulqueenb, J. McHalea // *Agricultural Water Management*. — 2003. — 1(60). — p. 33-42.
- Camussia G.F. Hydraulic Performance of Mole Drains and Validation of Steady-state Drainage Spacing Equations for Mollisols / G.F. Camussia, S. Imhoffa, D.L. Antilleb et al. // *Soil and Tillage Research*. — 2022. — 223.
- Castanheira P.N. Impact of mole drains on salinity of a vertisols under irrigation / P.N. Castanheira, R.P. Serralheiro // *Biosystems Engineering*. — 2010. — 1(105). — p. 25-33.
- El-Ghannam K. The role of Controlled and Mole Drainage in Relation to Water Saving, Salt Accumulation on Sugar Beet Yield and Quality in North Nile Delta, Egypt / K. El-Ghannam, A. El-sherief, I. Nageeb // *International Journal of Plant & Soil Science*. — 2021. — 1(33). — p. 48-57.
- Yupu H. Effect of Controlled Drainage on Nitrogen Losses from Controlled Irrigation Paddy Fields through Subsurface Drainage and Ammonia Volatilization after Fertilization / H. Yupu, Z. Jianyun, Y. Shihong et al. // *Agricultural Water Management*. — 2019. — 221. — p. 231-237.
- Acharya S. Modeling Shallow Water Table Dynamics under Subsurface Irrigation and Drainage / S. Acharya, R.S. Mylavarapu // *Agricultural Water Management*. — 2015. — 149. — p. 166-174.
- Liu H.L. Simulating Water Content, Crop Yield and Nitrate-N Loss under Free and Controlled Tile Drainage with Subsurface Irrigation Using the DSSAT Model / H.L. Liu, J.Y. Yang, C.S. Tan et al. // *Agricultural Water Management*. — 2011. — 6(98). — p. 1105-1111.
- Darzi-Naftchali A. The Life Cycle Assessment of Subsurface Drainage Performance under Rice-canola Cropping System / A. Darzi-Naftchali, A. Motevali, M. Keikha // *Agricultural Water Management*. — 2022. — 266.
- Wit J.A. Development of Subsurface Drainage Systems: Discharge – Retention – Recharge / J.A. Wit, C.J. Ritsema, J.C. Dam et al. // *Agricultural Water Management*. — 2022. — 269.
- Гостищев Д.П. Эксплуатация систем кротово-внутрипочвенного орошения при использовании сточных вод и животноводческих стоков / Д.П. Гостищев // *Материалы юбилейной международной научно-практической конференции (Костяковские чтения) «Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования»*; — Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2007. — с. 130-136.
- Гостищев Д.П. Использование животноводческих стоков при кротово-внутрипочвенном орошении / Д.П. Гостищев, Ю. С. Рогозина // *Сборник научных докладов международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии и техника орошения»*; — Новочеркасск: Радуга, 2004. — с. 142-145.
- Зербалиев А.М. Внутрипочвенное орошение как способ защиты земель от водной эрозии почв / А.М. Зербалиев // *Вестник Дагестанского государственного технического университета*. — 2005. — 11. — с. 162-166.
- Коломыца В.А. Изучение питательного режима почвы при возделывании кукурузы на зерно комбинированным способом орошения / В.А. Коломыца // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ*. — 2005. — 13. — с. 61-64.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Christena E.W. Improving Mole Drainage Channel Stability in Irrigated Areas / E.W. Christena, G. Spoorb // *Agricultural Water Management*. — 2001. — 3(48). — p. 239-253.
2. Filipovićabc V. Numerical Simulation of Water Flow in Tile and Mole Drainage Systems / V. Filipovićabc, F.J. Kochem, Y. Coquetc et al. // *Agricultural Water Management*. — 2014. — 146. — p. 105-114.
3. Rodgersa M. Model Study of Mole Drain Spacing and Performance / M. Rodgersa, J. Mulqueenb, J. McHalea // *Agricultural Water Management*. — 2003. — 1(60). — p. 33-42.
4. Camussia G.F. Hydraulic Performance of Mole Drains and Validation of Steady-state Drainage Spacing Equations for Mollisols / G.F. Camussia, S. Imhoffa, D.L. Antilleb et al. // *Soil and Tillage Research*. — 2022. — 223.
5. Castanheira P.N. Impact of mole drains on salinity of a vertisol under irrigation / P.N. Castanheira, R.P. Serralheiro // *Biosystems Engineering*. — 2010. — 1(105). — p. 25-33.
6. El-Ghannam K. The role of Controlled and Mole Drainage in Relation to Water Saving, Salt Accumulation on Sugar Beet Yield and Quality in North Nile Delta, Egypt / K. El-Ghannam, A. El-sherief, I. Nageeb // *International Journal of Plant & Soil Science*. — 2021. — 1(33). — p. 48-57.
7. Yupu H. Effect of Controlled Drainage on Nitrogen Losses from Controlled Irrigation Paddy Fields through Subsurface Drainage and Ammonia Volatilization after Fertilization / H. Yupu, Z. Jianyun, Y. Shihong et al. // *Agricultural Water Management*. — 2019. — 221. — p. 231-237.
8. Acharya S. Modeling Shallow Water Table Dynamics under Subsurface Irrigation and Drainage / S. Acharya, R.S. Mylavarapu // *Agricultural Water Management*. — 2015. — 149. — p. 166-174.
9. Liu H.L. Simulating Water Content, Crop Yield and Nitrate-N Loss under Free and Controlled Tile Drainage with Subsurface Irrigation Using the DSSAT Model / H.L. Liu, J.Y. Yang, C.S. Tan et al. // *Agricultural Water Management*. — 2011. — 6(98). — p. 1105-1111.
10. Darzi-Naftchali A. The Life Cycle Assessment of Subsurface Drainage Performance under Rice-canola Cropping System / A. Darzi-Naftchali, A. Motevali, M. Keikha // *Agricultural Water Management*. — 2022. — 266.
11. Wit J.A. Development of Subsurface Drainage Systems: Discharge – Retention – Recharge / J.A. Wit, C.J. Ritsema, J.C. Dam et al. // *Agricultural Water Management*. — 2022. — 269.
12. Gostischev D.P. Ekspluatatsija sistem krotovo-vnutripochvennogo oroshenija pri ispol'zovanii stochnyh vod i zhivotnovodcheskih stokov [Operation of Mole-in-Soil Irrigation Systems Using Wastewater and Livestock Effluents] / D.P. Gostischev // *Materialy jubilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Kostjakovskie chteniya) «Problemy ustojchivogo razvitiya melioracii i racional'nogo prirodopol'zovaniya» [Materials of the Anniversary International Scientific and Practical Conference (Kostjakov Readings) "Problems of Sustainable Development of Land Reclamation and Rational Nature Management"]*; — Moscow: All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, 2007. — p. 130-136. [in Russian]
13. Gostischev D.P. Ispol'zovanie zhivotnovodcheskih stokov pri krotovo-vnutripochvennom oroshenii [Utilization of Livestock Wastewater for Mole-in-soil Irrigation] / D.P. Gostischev, Ju. S. Rogozina // *Sbornik nauchnyh dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Resursosberegayushchie ekologicheski bezopasnye tekhnologii i tekhnika orosheniya» [Collection of scientific reports of the International Scientific and Practical Conference "Resource-saving Environmentally Safe Irrigation Technologies and Techniques"]*; — Novocherkassk: Raduga, 2004. — p. 142-145. [in Russian]
14. Zervaliev A.M. Vnutripochvennoe oroshenie kak sposob zaschity zemel' ot vodnoj erozii pochv [In-soil Irrigation as a Method of Land Protection from Water Erosion of Soils] / A.M. Zervaliev // *Bulletin of Dagestan State Technical University*. — 2005. — 11. — p. 162-166. [in Russian]
15. Kolomytsa V.A. Izuchenie pitatel'nogo rezhima pochvy pri vzdelyvanii kukuruzy na zerno kombinirovannym sposobom oroshenija [A Study of Soil Nutrient Regime under Grain Maize Cultivation by Combined Irrigation Method] / V.A. Kolomytsa // *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban GAU*. — 2005. — 13. — p. 61-64. [in Russian]