

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-35-55

Моделирование контура увлажнения почвы при капельном орошении

Андрей Евгеньевич Новиков¹, Петр Сергеевич Васильев²,
Марина Юрьевна Шмелёва³, Роман Валентинович Збукарев⁴

^{1, 3, 4}Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация

³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация

¹ae_novikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8051-4786>

²nestorvv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0262-686X>

³krushinova-myu@rudn.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4514-3827>

⁴zbukarevr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9237-547X>

Аннотация. Цель: разработать методику моделирования внутренних и граничных контуров увлажнения в подкапельном пространстве, формируемом при капельном орошении сельскохозяйственных культур, и провести ее апробацию на натуральных данных. **Материалы и методы.** Подход к прогнозированию локальных контуров увлажнения основан на представлении их очертания, моделью соответствующего эллиптическому сектору и эллипсу, в форме простого многоугольника, вершины которого являются координатами влажности, а ребра – отрезками прямой. **Результаты.** Используя методы векторного произведения координат (глубин и радиусов) и их сложения, а также аналитической геометрии для нахождения площади и метрических параметров локальных контуров увлажнения, представили алгоритм решения задачи моделирования очертания на плоскости и графическую визуализацию в сравнении с экспериментальными данными о влажности при капельном орошении орошаемых почв. При решении задачи для легких и тяжелых по гранулометрическому составу почв в качестве граничного условия принято соответственно перпендикулярное и параллельное расположение большей оси геометрической фигуры относительно поверхности почвы, причем присутствующие в свойствах почвы неоднородности нивелировали осреднением контура (площади) с соответствующим модельным очертанием. **Вывод.** Для практических целей точность модельного решения задачи обеспечивается 2–4-й степенью полинома, что позволяет довольно легко трансформировать модель под любую выборку экспериментальных данных. В частности, полученные при использовании теоретических моделей площади локальных контуров увлажнения для орошаемой почвы в постполивной период отличаются от экспериментальных значений в среднем на 4–5 %, что свидетельствует о применимости разработанного подхода.

Ключевые слова: орошение, моделирование, регрессия, капельное орошение, контур увлажнения

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию FNFR-2025-0003.

Для цитирования: Моделирование контура увлажнения почвы при капельном орошении /

А. Е. Новиков, П. С. Васильев, М. Ю. Шмелёва, Р. В. Збукарев // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 35–55. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-35-55>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Simulating the soil moisture contour during drip irrigation

Andrey E. Novikov¹, Petr S. Vasilyev², Marina Yu. Shmeleva³,
Roman V. Zbukarev⁴

^{1,3,4}All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

³Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

¹ae_novikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8051-4786>

²nestorvv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0262-686X>

³krushinova-myu@rudn.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4514-3827>

⁴zbukarevr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9237-547X>

Abstract. Purpose: to develop the methodology for simulating internal and boundary moisture contours in the sub-drip space formed during drip irrigation of agricultural crops and to test it on field data. **Materials and methods.** The approach to predicting local moisture contours is based on representing their outline, modeled as an elliptical sector and an ellipse, in the form of a simple polygon whose vertices are moisture coordinates and whose edges are straight line segments. **Results.** Using the methods of the vector product of coordinates (depths and radii) and their addition, as well as analytical geometry for finding the area and metric parameters of local moisture contours, an algorithm for solving the problem of modeling the outline on a plane and a graphical visualization in comparison with experimental data on moisture during dripping of irrigated soils are presented. When solving the problem for light and heavy soils with respect to granulometric composition, the boundary condition was taken to be the perpendicular and parallel arrangement of the major axis of the geometric figure relative to the soil surface, respectively, and the heterogeneities present in the soil properties were leveled by averaging the contour (area) with the corresponding model outline. **Conclusion.** For practical purposes, the accuracy of the model task solution is ensured by a polynomial of 2–4 degrees, which allows for the model to be easily adapted to any sample of experimental data. In particular, the areas of local moisture contours for irrigated soil in the after-irrigation period, obtained using theoretical models, differ from the experimental values by an average of 4–5 %, demonstrating the applicability of the developed approach.

Keywords: irrigation, simulation, regression, drip irrigation, moisture contour

Funding: the study was funded by Ministry of Education and Science of the Russian Federation under state assignment FNFR-2025-0003.

For citation: Novikov A. E., Vasilyev P. S., Shmeleva M. Yu., Zbukarev R. V. Simulating the soil moisture contour during drip irrigation. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2):35–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-35-55>.

Введение. В настоящее время агропродовольственный сектор сталкивается с беспрецедентными трудностями, вызванными увеличением спроса

на продовольствие, масштабами голода и неполноценного питания из-за растущего населения планеты, неблагоприятными последствиями изменения климата, чрезмерной эксплуатацией природных ресурсов, утратой биоразнообразия. При этом экстремальные погодные явления, по оценкам специалистов, будут оказывать наиболее существенное влияние на устойчивость сельскохозяйственного производства, доступность воды и водных ресурсов в глобальном масштабе [1–3]. Наблюдаемые тенденции роста повторяемости, интенсивности и продолжительности засух в регионах требуют диверсификации традиционной системы ведения сельского хозяйства в сторону климатически оптимизированной [4]. Такое стратегическое изменение деятельности необходимо для преобразования и переориентации сельскохозяйственных систем с целью эффективной поддержки развития и обеспечения продовольственной безопасности в новых климатических реалиях [5].

Важная стратегия адаптации сельского хозяйства к изменению климата – повышение продуктивности использования оросительной воды, внедрение ресурсосберегающих способов полива и интеллектуальных ирригационных систем, в их числе технологии точного орошения [6–8]. В частности, исследуя контуры увлажнения почвы в подкапельном пространстве, решают такие важные задачи:

- уточнение режимов орошения и поливных норм;
- совершенствование систем и техники полива;
- моделирование влажностных и геометрических параметров локальных контуров увлажнения в соответствии с биологическими особенностями и потребностями растений;
- оптимизация водного, пищевого и воздушного режимов почвы;
- реализация потенциала продуктивности возделываемых сельскохозяйственных культур.

Сегодня с учетом известных исследований контуров увлажнения при

капельном орошении (каплевании) их очертание представляется окружностью либо эллипсом, большая ось которого располагается перпендикулярно или параллельно поверхности почвы соответственно для легких и тяжелых по гранулометрическому составу почв.

Существующие подходы к моделированию очертаний контуров увлажнения при каплевании основаны на математических моделях влагопереноса (широкого применения на практике не нашли), а также на эмпирических функциях расчета координат (глубин и радиусов) контуров по массивам натурных данных с учетом водно-физических свойств почвы – плотности сложения ρ (т/м³), содержания частиц физической глины W_g и наименьшей влагоемкости $\beta_{\text{НВ}}$ (% от массы сухой почвы, или % МСП), а также количества гумуса q_g (%). В опубликованных работах [9–12] подробно рассмотрена методика определения относительных координат контуров влажности, а также выполнены апробации полученных регрессий на локальных контурах увлажнения, полученных другими авторами.

Разработанные модели для определенного контура увлажнения почвы с уровнем влажности β_i (в долях от $\beta_{\text{НВ}}$) представлены функцией вида:

$$\frac{(r_{\text{кон}})_{h_i}}{r_{\text{кон}}} = f\left(\frac{h_i}{h_{\text{кон}}}\right), \quad (1)$$

где $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – радиус контура увлажнения почвы на глубине h_i (от $h_i = 0$ до $h_{\text{кон}}$), м;

$r_{\text{кон}}$, $h_{\text{кон}}$ – максимальные радиус и заглубленность контура увлажнения почвы, м.

Решая методом корреляционно-регрессионного анализа зависимость (1), авторы методики получают полином n -го порядка (10-й степени и выше), содержащий свободный член уравнения k_0 и коэффициенты при

переменных членах полинома k_i , связанные с k_0 . При этом k_0 характеризует величину $(r_{\text{кон}})_{h_i} / r_{\text{кон}}$ при $h_i / h_{\text{кон}} = 0$, по значению которой рассчитывают радиус контура увлажнения почвы на поверхности $(r_{\text{кон}})_{h_i} = 0$ при известном $r_{\text{кон}}$ и вычисляют его по регрессии, учитывающей ρ , W_g , $W_{\text{НВ}}$.

Рассмотренный подход позволяет прогнозировать очертание, влажностные и геометрические параметры внутренних и граничных контуров с точностью $\pm 12\%$ для различных почвенных условий проведения капельных поливов.

Несмотря на приемлемый уровень сходимости результатов регрессионного моделирования очертаний контуров увлажнения с их натурными параметрами, методика все же представляется недостаточно универсальной. Это обусловлено тем, что полиномы с высокой степенью содержат много коэффициентов, это затрудняет их интерпретацию и понимание вклада каждой переменной в результат. С другой стороны, хорошо подстроенная под одну выборку модель может с более низкой достоверностью обобщить другую, так как высокая степень полинома может привести к переобучению модели.

Для исключения возможных неточностей, обусловленных применяемым подходом к моделированию внутренних и граничных контуров в подкапельном пространстве, представляется более совершенным использование метода векторного произведения координат (глубин и радиусов) и их сложения для нахождения искомой площади, а также геометрических параметров контура увлажнения, представленного эллипсоидом.

В связи с этим цель исследования заключается в разработке методики моделирования внутренних и граничных контуров увлажнения в подкапельном пространстве, формируемом при капельном орошении сельскохозяйственных культур, и ее апробации на натуральных данных.

Материалы и методы. Для моделирования контуров увлажнения ис-

пользовали результаты измерений влажности почвы (таблица 1) по 20-сантиметровым слоям с поверхности до глубины 1 м в двух взаимно противоположных радиальных направлениях от капельницы (0 м) до 0,8 м с шагом 0,2 м, полученные через 24 ч после проведения полива. Для полива использовали эмиттерную капельную трубку с расходом капельницы 2 л/ч и расстоянием между капельницами 200 мм. Дополивная влажность почвы составляла $\beta_{dp} \approx 65\%$ НВ, а постполивная – $\beta_{pp} \approx 90\%$ НВ. Поливную норму и продолжительность полива назначали из условия формирования развитого контура увлажнения с глубиной промачивания слоя почвы $h \approx 1,0$ м [13, 14].

Таблица 1 – Характеристика почвы на опытной площадке

Table 1 – Soil characteristics at the experimental site

Слой почвы h_i , м	Значение показателя			
	W_g , % МСП	$\beta_{НВ}$, % МСП	ρ , т/м ³	q_g , %
0,0–0,1	35,2	26,8	1,21	4,0
0,1–0,2	36,0	26,0	1,27	3,6
0,2–0,3	37,7	25,3	1,34	3,0
0,3–0,4	38,6	24,4	1,38	2,5
0,4–0,5	39,8	24,0	1,39	2,0
0,5–0,6	41,8	23,6	1,41	1,6
0,6–0,7	43,7	22,4	1,41	1,1
0,7–0,8	46,8	21,9	1,44	0,6
0,8–0,9	47,7	21,6	1,47	–
0,9–1,0	48,6	21,4	1,48	–

По результатам измерений для каждой повторности были сформированы матрицы абсолютной влажности почвы и в пересчете на относительную влажность в процентах от наименьшей влагоемкости [15].

Матрицы относительной влажности почвы использовали для графического отображения экспериментальных разновлажностных контуров в программном обеспечении Surfer и как базовый материал для создания их математических моделей в связи с тем, что их геометрическая форма приближена к эллипсоиду.

Для моделирования внутренних и граничных контуров в подкапель-

ном пространстве использовали методы векторной алгебры и аналитической геометрии на плоскости (рисунки 1, 2)¹.

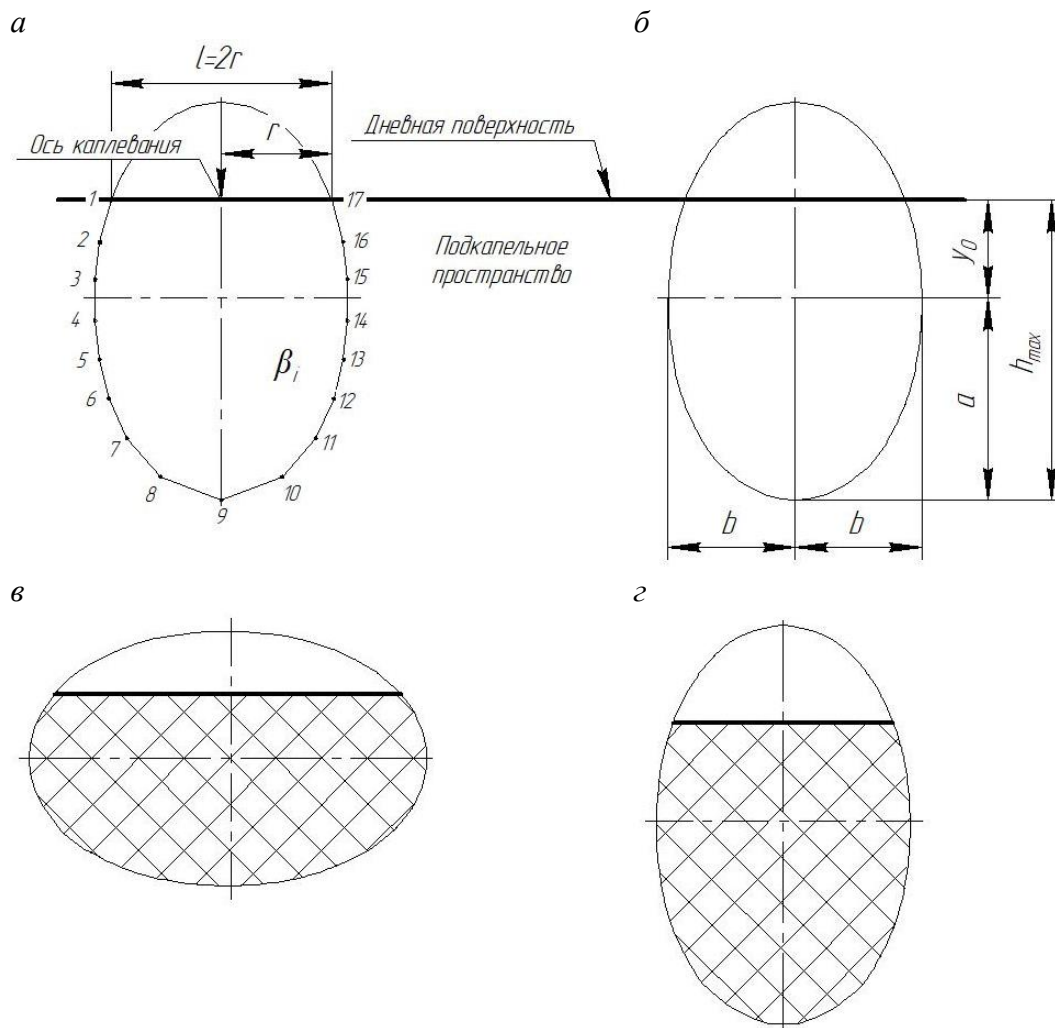


Рисунок 1 – Контур увлажнения при капельвании почвы, модельно соответствующий эллиптическому сектору

Figure 1 – Moisture contour during drip irrigation, model corresponding as the elliptical sector

На рисунках 1 и 2 обозначено: *a* – схема формирования контура в подкапельном пространстве; *b* – обозначение геометрических параметров контура; *в*, *г* – очертания контура соответственно на тяжелых и легких почвах по гранулометрическому составу.

¹Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ; Астрель, 2006. 991 с. EDN: QJTUPF.

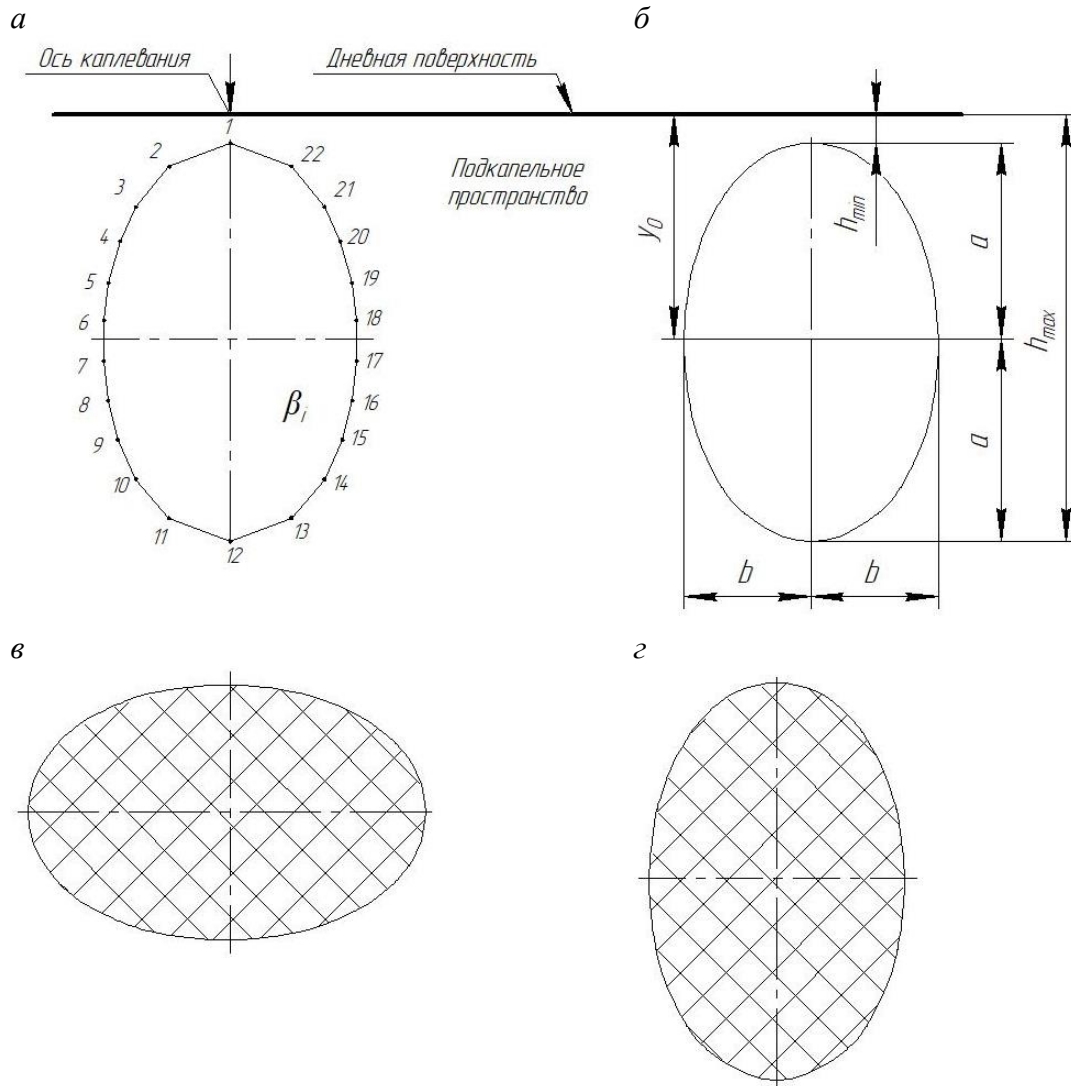


Рисунок 2 – Контур увлажнения при капельном орошении почвы, модельно соответствующий эллипсу
Figure 2 – Moisture contour during drip irrigation, model corresponding to the ellipse

При этом эллиптический сектор (см. рисунок 1) и эллипс (см. рисунок 2) рассматривали как простой многоугольник, вершины которого являются координатами влажности (r – радиус контура увлажнения; β_i – локальный уровень влажности в долях от $\beta_{\text{НВ}}$), а ребра – отрезками прямой. Площадь многоугольника определяли по формуле Гаусса:

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot y_{i+1} + x_n \cdot y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} \cdot y_i - x_1 \cdot y_n \right| =$$

$$= \frac{1}{2} |x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_3 + \dots + x_n \cdot y_1 - x_2 \cdot y_1 - x_3 \cdot y_2 - \dots - x_1 \cdot y_n|. \quad (2)$$

Теоретические площади контура увлажнения, модельно соответствующего эллиптическому сектору (см. рисунок 1), рассчитывали по формулам:

- для варианта *з* на рисунке 1:

$$S_T = k \cdot a^2 \left[\arccos\left(1 - \frac{h}{a}\right) - \left(1 - \frac{h}{a}\right) \cdot \sqrt{\frac{2h}{a} - \frac{h^2}{a^2}} \right], \quad (3)$$

где $a = \left(\frac{l^2}{4 \cdot k^2} + h^2 \right) / (2 \cdot h)$; $y_0 = -(h - a)$;

- для варианта *в* на рисунке 1:

$$S_T = \frac{b^2}{k} \cdot \left[\arccos\left(1 - \frac{h}{b}\right) - \left(1 - \frac{h}{b}\right) \cdot \sqrt{\frac{2h}{b} - \frac{h^2}{b^2}} \right], \quad (4)$$

где $b = \left(\frac{k^2 \cdot l^2}{4} + h^2 \right) / (2 \cdot h)$; $y_0 = -(h - b)$;

a, b – соответственно большая и малая полуоси;

$k = b/a$ – коэффициент сжатия эллипса;

h – глубина залегания (ордината) эллиптического сектора;

l – хорда эллиптического сектора;

y_0 – глубина залегания (ордината) центра эллипса на оси каплевания.

Необходимо отметить, что выражения (3) и (4) при условии $S_T = S$ являются верными равенствами только при $k = \text{const}$, значение которого определяли численно.

Теоретические площади контура увлажнения, модельно соответствующего эллипсу (см. рисунок 2), рассчитывали по формулам:

- для варианта *з* на рисунке 2:

$$S_T = \pi \cdot k \cdot a^2, \quad (5)$$

где $a = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{2}$; $y_0 = -(h_{\min} + a)$;

- для варианта *в* на рисунке 2:

$$S_T = \frac{\pi \cdot b^2}{k}, \quad (6)$$

где $b = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{2}$; $y_0 = -(h_{\min} + b)$;

h_{\max} – максимальная глубина залегания (ордината) эллипса;

h_{\min} – минимальная глубина залегания (ордината) эллипса.

Необходимо отметить, что при условии $S_T = S$ выражение (5) является верным равенством только при $k = S / \pi \cdot a^2$, а выражение (6) – только при $k = S / \pi \cdot b^2$.

Для графического представления локального контура увлажнения использовали каноническое уравнение эллипса:

- для варианта *г* на рисунках 1 и 2:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{(y - y_0)^2}{a^2} = 1; \quad (7)$$

- для варианта *в* на рисунках 1 и 2:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1. \quad (8)$$

С учетом представленных теоретических выкладок решение задачи моделирования локального контура увлажнения сводится к определению неизвестных из системы уравнений:

- для вариантов *в* и *г* на рисунке 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = f(\beta) \\ \frac{l}{h_{\max}} = f(\beta), \\ \frac{h_{\max}}{z} = f(\beta) \end{array} \right. \quad (9)$$

где $z = a$ для варианта *г* и $z = b$ для варианта *в*;

- для вариантов v и z на рисунке 2:

$$\begin{cases} h_{\max} = f(\beta) \\ \frac{h_{\min}}{h_{\max}} = f(\beta), \\ \frac{h_{\max}}{z} = f(\beta) \end{cases} \quad (10)$$

где $z = b$ для варианта z и $z = a$ для варианта v ;

$$f(\beta) = \sum_{j=0}^m c_j \cdot \beta^j, \quad (11)$$

где c_j – полиномиальные коэффициенты уравнения регрессии (11).

Определяем неизвестные в следующем порядке:

- задаемся значением β_i , из первого уравнения системы находим r и l для вариантов на рисунке 1, h_{\max} для вариантов на рисунке 2;
- из второго уравнения системы определяем h_{\max} для вариантов на рисунке 1, h_{\min} для вариантов на рисунке 2;
- из третьего уравнения системы рассчитываем a или b ;
- определяем y_0 ;
- строим локальный контур для влажности β_i .

При этом необходимо отметить, что приемлемая для практических целей точность модельного решения обеспечивается уже при $m = 2-4$ в уравнении (11).

Для обеспечения повышенной точности модельного решения уравнение (11) необходимо представить в виде интерполяционного многочлена Лагранжа, однако это определенно усложнит математическую обработку экспериментальных данных².

²Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986. 544 с.

Результаты и обсуждение. Для апробации методики моделирования внутренних и граничных контуров увлажнения в подкапельном пространстве использованы натурные данные о влажности орошаемой почвы, интерпретированные в виде усредненного по соответствующим значениям контура влажности (рисунок 3).

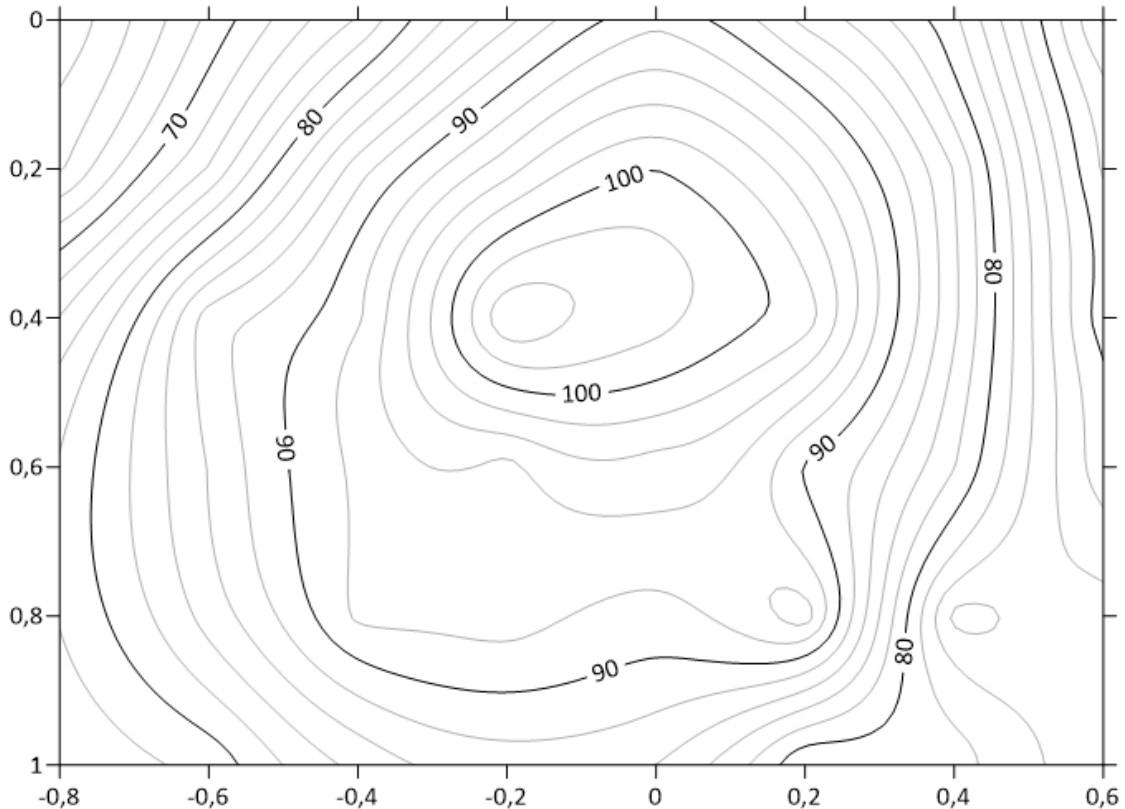


Рисунок 3 – Контур влажности почвы в постполивной период
Figure 3 – Soil moisture contour during after-irrigation period

В результате обработки экспериментальных данных о влажности почвы в постполивной период получены следующие системы уравнений:

- для варианта z на рисунке 1 (при $m = 2$ в уравнении (11)):

$$\begin{cases} r = -1,561 \cdot 10^2 + 7,013 \cdot \beta - 5,804 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2 \\ \frac{l}{h_{\max}} = -1,743 \cdot 10^1 + 4,638 \cdot 10^{-1} \cdot \beta - 2,987 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2, \\ \frac{h_{\max}}{a} = -1,366 \cdot 10^1 + 3,412 \cdot 10^{-1} \cdot \beta - 1,859 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 \end{cases} \quad (12)$$

средние относительные ошибки уравнений в системе равны 0,563; 1,538 и 0,375 % соответственно;

- для варианта *в* на рисунке 2 (при $m = 3$ в уравнении (11)):

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\max} = 1,895 \cdot 10^5 - 5,865 \cdot 10^3 \cdot \beta + 6,054 \cdot 10^1 \cdot \beta^2 - 2,083 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^3 \\ \frac{h_{\min}}{h_{\max}} = 8,200 \cdot 10^2 - 2,594 \cdot 10^1 \cdot \beta + 2,729 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^2 - 9,549 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^3, \\ \frac{h_{\max}}{a} = 1,699 \cdot 10^3 - 5,004 \cdot 10^1 \cdot \beta + 4,895 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^2 - 1,587 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^3 \end{array} \right. \quad (13)$$

средние относительные ошибки уравнений в системе равны 1,738; 12,783 и 3,789 % соответственно.

При этом необходимо отметить, что экспериментальные значения площадей контуров увлажнения S , определенные по формуле (2), отличаются от своих теоретических значений S_T , рассчитанных по формулам (3) и (6) с учетом определенных с помощью систем уравнений (12) и (13) геометрических параметров r , l , h_{\max} , h_{\min} , в среднем на 4,44 % для варианта *г* на рисунке 1 и на 5,02 % для варианта *в* на рисунке 2.

Для получения строгого равенства $S = S_T$ необходимо, чтобы уравнения в системах (12) и (13) представляли собой интерполяционные многочлены Лагранжа:

- для варианта *г* на рисунке 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = -1,818 \cdot 10^6 + 1,083 \cdot 10^5 \cdot \beta - 2,580 \cdot 10^3 \cdot \beta^2 + \\ + 3,070 \cdot 10^1 \cdot \beta^3 - 1,826 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^4 + 4,340 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^5 \\ \frac{l}{h_{\max}} = 2,511 \cdot 10^5 - 1,478 \cdot 10^4 \cdot \beta + 3,479 \cdot 10^2 \cdot \beta^2 - \\ - 4,092 \cdot \beta^3 + 2,406 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^4 - 5,654 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^5 \\ \frac{h_{\max}}{a} = -3,382 \cdot 10^4 + 1,930 \cdot 10^3 \cdot \beta - 4,399 \cdot 10^1 \cdot \beta^2 + \\ + 5,010 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^3 - 2,850 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^4 + 6,478 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^5 \end{array} \right. ; \quad (14)$$

- для варианта *в* на рисунке 2:

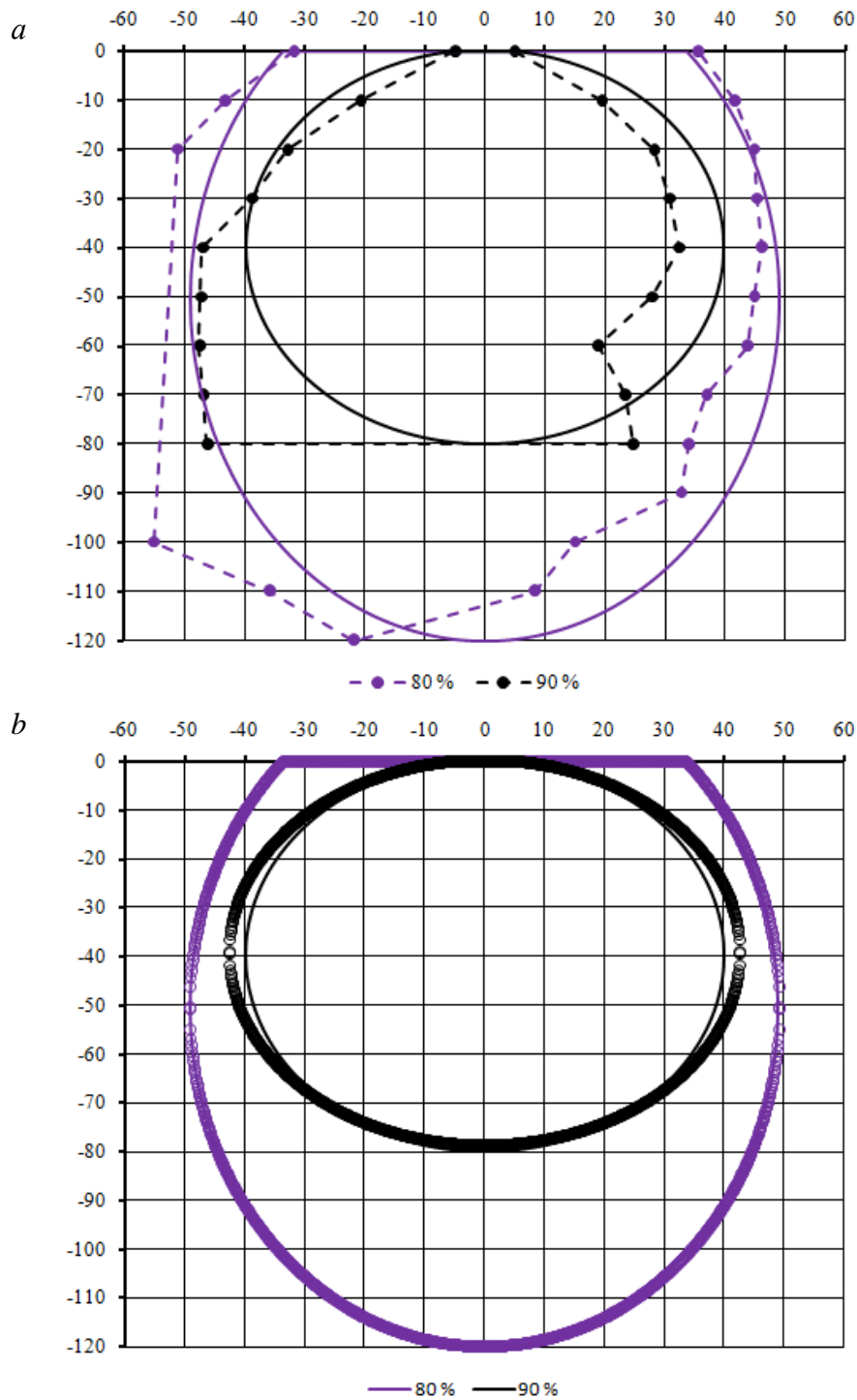
$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\max} = -4,226 \cdot 10^6 + 1,783 \cdot 10^5 \cdot \beta - 2,819 \cdot 10^3 \cdot \beta^2 + \\ + 1,979 \cdot 10^1 \cdot \beta^3 - 5,208 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^4 \\ \frac{h_{\min}}{h_{\max}} = 1,682 \cdot 10^5 - 7,008 \cdot 10^3 \cdot \beta + 1,094 \cdot 10^2 \cdot \beta^2 - \\ - 7,593 \cdot 10^{-1} \cdot \beta^3 + 1,975 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^4 \\ \frac{h_{\max}}{a} = -3,400 \cdot 10^5 + 1,420 \cdot 10^4 \cdot \beta - 2,223 \cdot 10^2 \cdot \beta^2 + \\ + 1,546 \cdot \beta^3 - 4,030 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^4 \end{array} \right. . \quad (15)$$

Результаты моделирования локальных изоплет контура увлажнения при каплевании почвы, модельно соответствующих эллиптическому сектору (на примере 80 и 90 %), представлены на рисунке 4, а модельно соответствующих эллипсу (на примере 92 и 100 %) – на рисунке 5.

Локальные контуры увлажнения при каплевании почвы – многоугольники на рисунках 4а и 5а, построены по результатам обработки экспериментальных данных, представленных на рисунке 3. Их площади рассчитывали по формуле (2), и они составили: $S_{80\%} = 9825 \text{ см}^2$, $S_{90\%} = 5026 \text{ см}^2$, $S_{92\%} = 4079 \text{ см}^2$, $S_{100\%} = 528 \text{ см}^2$.

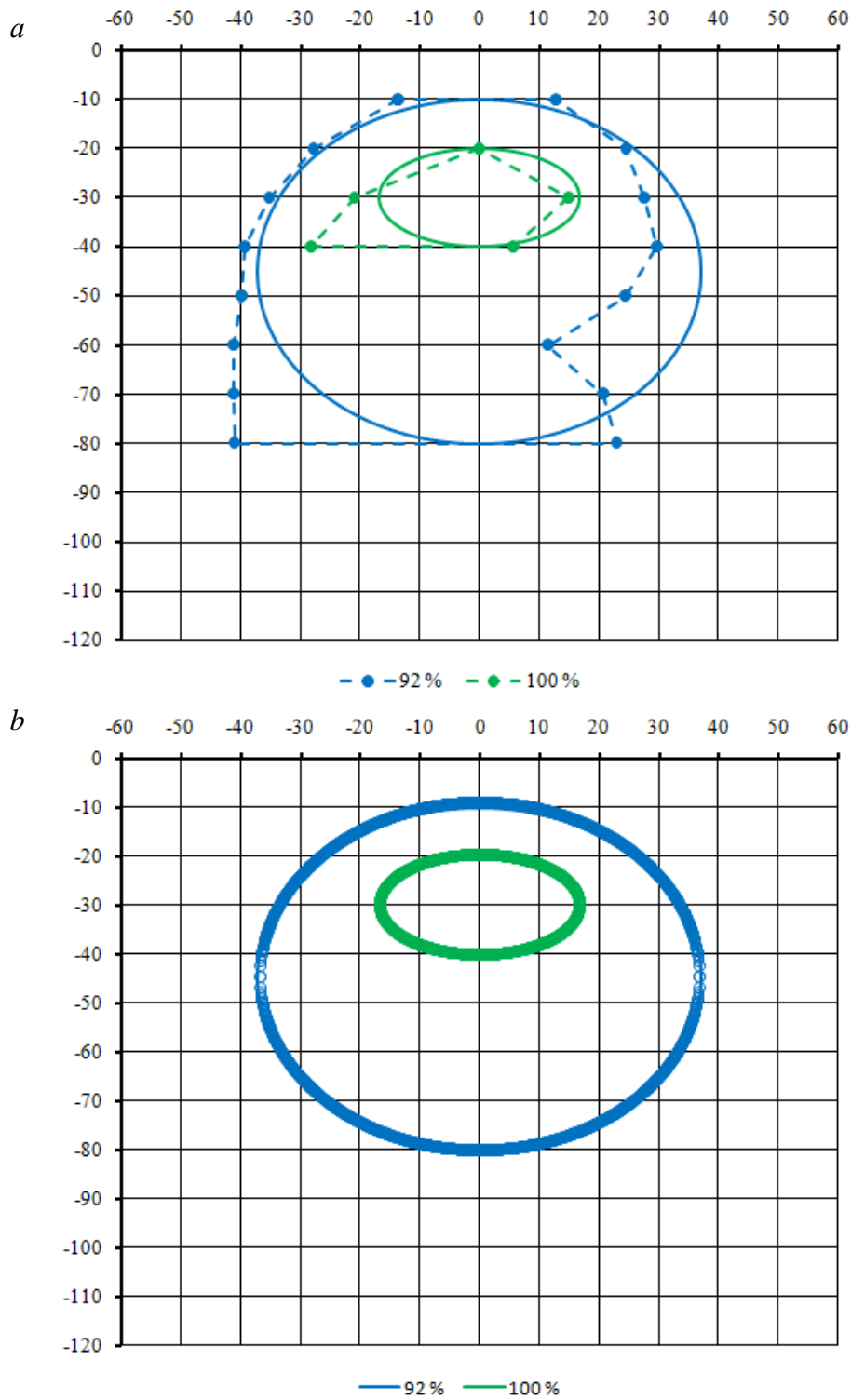
Теоретические эллиптические секторы на рисунке 4а построены по уравнению (7), параметры которого рассчитывали по формуле (3) при условии $S_{\tau} = S$. При этом значения коэффициента сжатия эллипса определяли численно таким образом, чтобы глубина залегания (ордината) эллиптического сектора h была равна наибольшей глубине соответствующей изоплеты: $k_{80\%} = 0,706$, $k_{90\%} = 0,992$.

Теоретические эллипсы на рисунке 5а построены по уравнению (8), параметры которого рассчитывали по формуле (6) при условии $S_{\tau} = S$. При этом значения коэффициента сжатия эллипса определяли непосредственно из формулы (6): $k_{92\%} = 1,060$, $k_{100\%} = 1,681$.



a – сравнение экспериментального многоугольника с теоретическим эллиптическим сектором; *b* – сравнение теоретического эллиптического сектора с результатами моделирования
a – comparison of the experimental polygon with the theoretical elliptical sector; *b* – comparison of the theoretical elliptical sector with the modelling results

Рисунок 4 – Локальные контуры увлажнения при капельном орошении почвы, модельно соответствующие эллиптическому сектору
Figure 4 – Local moisture contours during drip irrigation, model-corresponding to the elliptical sector



a – сравнение экспериментального многоугольника с теоретическим эллипсом;
b – сравнение теоретического эллипса с результатами моделирования
a – comparison of the experimental polygon with the theoretical ellipse;
b – comparison of the theoretical ellipse with the modelling results

Рисунок 5 – Локальные контуры увлажнения при капельном орошении почвы, модельно соответствующие эллипсу

Figure 5 – Local moisture contours during drip irrigation, model-corresponding to the ellipse

На рисунке 4*b* приведено сравнение точек теоретических эллиптических секторов с результатами моделирования при решении системы уравнений (12), а в таблице 2 – сравнение экспериментальных данных с модельными по величине площади эллиптического сектора.

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и модельных данных, соответствующих эллиптическому сектору

Table 2 – Comparison of experimental and model data corresponding to the elliptical sector

β , %	80	82	84	86	88	90
S , см ²	9825	9371	8091	7555	6436	5026
S_T , см ²	9876	9067	8355	7632	6636	4247
δ , %	+0,52	-3,24	+3,26	+1,03	+3,10	-15,50
S – площадь, рассчитанная по формуле (2); S_T – площадь, рассчитанная по формуле (3) с учетом системы уравнений (12); $\delta_{cp} = 4,44$ % – средняя относительная ошибка.						

На рисунке 5*b* приведено сравнение точек теоретических эллипсов с результатами моделирования при решении системы уравнений (13), а в таблице 3 – сравнение экспериментальных данных с модельными по величине площади эллипса.

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и модельных данных, соответствующих эллипсу

Table 3 – Comparison of experimental and model data corresponding to the ellipse

β , %	92	94	96	98	100
S , см ²	4079	2484	1436	1130	528
S_T , см ²	4117	2377	1575	1045	542
δ , %	+0,93	-4,32	-9,70	-7,49	+2,68
S – площадь, рассчитанная по формуле (2); S_T – площадь, рассчитанная по формуле (4) с учетом системы уравнений (13); $\delta_{cp} = 5,02$ % – средняя относительная ошибка.					

Таким образом, модельные данные отличаются от экспериментальных в среднем на 4–5 %.

Выводы. Представленный в работе подход к моделированию локальных (внутренних и граничных) контуров увлажнения при каплевании тяжелых и легких по гранулометрическому составу орошаемых почв позволяет

на основе канонического уравнения эллипса строить контуры, модельно соответствующие эллипсу или эллиптическому сектору, а также вычислять площадь увлажненной почвы методом векторного произведения координат влажности (глубин и радиусов) и их сложения. При этом возможные неоднородности в свойствах почвы, сказывающиеся на возникновении участков с резким градиентом влажности (резкие деформации контуров), нивелируются осреднением контура (площади) соответствующего модельного очертания. Для практических целей точность модельного решения задачи обеспечивается 2–4-й степенью полинома, что позволяет довольно легко трансформировать модель под любую выборку экспериментальных данных. В частности, полученные при использовании теоретических моделей площади локальных контуров увлажнения для орошаемой почвы в постполивной период отличаются от экспериментальных значений в среднем на 4–5 %.

Список источников

1. Иванов А. И., Янко Ю. Г. Мелиорация как необходимое средство развития сельского хозяйства Нечерноземной зоны России // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 67–78. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.01.09. EDN: VWIUQU.
2. Новиков А. Е., Дранников А. В. Прецизионные технологии орошения в повышении устойчивости земледелия к природным изменениям // *Орошаемое земледелие*. 2024. № 4(47). С. 45–50. DOI: 10.35809/2618-8279-2024-4-7. EDN: AYRNAJ.
3. Awazi N. P. Assessing the role of irrigation as an adaptive measure to climate change induced water insecurity: Case study of the market gardening sector in parts of the northwest and west regions of Cameroon // *Frontiers in Water*. 2022. Vol. 4. Art. 902438. DOI: 10.3389/frwa.2022.902438. EDN: DGPAZM.
4. Ползиков Д. А. Основные направления политики адаптации сельского хозяйства России к климатическим изменениям // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № 6(201). С. 119–137. DOI: 10.47711/0868-6351-201-119-137. EDN: BIZBHC.
5. Impact of climate change on global agriculture: Challenges and adaptation / Н. А. Prajapati, Y. Khushboo, Н. Yamuna, В. К. Margam, К. Tanzeel, В. Ningaraj, Т. Vimala, J. Afshan, G. Gomadhi, G. Malathi // *International Journal of Environment and Climate Change*. 2024. Vol. 14, № 4. P. 372–379. DOI: 10.9734/ijecc/2024/v14i44123. EDN: RZQULT.
6. Новиков А. Е., Дубенок Н. Н., Торопов А. Ю. Водоподготовка на природных модифицированных загрузках для систем прецизионного орошения // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024. № 6(78). С. 311–320. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-34. EDN: MKCCVQ.
7. Irrigation modulates the effect of increasing temperatures under climate change on cotton production of drip irrigation under plastic film mulching in southern Xinjiang / Н. Wang, Z. Yin, L. Zhang, F. Zhao, W. Huang, X. Wang, Y. Gao // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 1069190. DOI: 10.3389/fpls.2022.1069190. EDN: PUWIJA.

8. Innovative technologies for improved water productivity and climate change mitigation, adaptation, and resilience: A review / E. Oiganji, H. Igbadun, P. S. Amaza, R. Z. Lenka // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2025. Vol. 29, № 1. P. 123–136. DOI: 10.4314/jasem.v29i1.17. EDN: HSYUFG.

9. Васильев С. М., Шкура В. Н., Штанько А. С. Очертание локальных зон увлажнения подкапельного почвенного пространства // *Аграрный научный журнал*. 2019. № 3. С. 65–71. DOI: 10.28983/asj.y2019i3pp65-71. EDN: YZPHVZ.

10. Шкура В. Н., Штанько А. С. Геометрия контуров капельного увлажнения почв // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. Т. 13, № 2. С. 55–74. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-55-74. EDN: ZQRYEJ.

11. 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: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=914> (дата обращения: 01.05.2026). EDN: YOTSKC.

12. Штанько А. С., Шкура В. Н. О трансформации контуров капельного увлажнения почвы в постполивной период // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. Т. 13, № 3. С. 69–86. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-69-86. EDN: AYRQFY.

13. Шкура В. Н., Масный Р. С., Штанько А. С. Системы капельного орошения садов: науч.-практ. изд. М.: Росинформагротех, 2023. 300 с.

14. Ясониди О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с. EDN: QLCBER.

15. Рыжаков А. Н., Шкура В. Н. Определение средневзвешенной влажности почвы в контурах капельного орошения // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации* [Электронный ресурс]. 2017. № 3(27). С. 97–111. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=286> (дата обращения: 01.05.2026). EDN: ZCQAPB.

References

1. Ivanov A.I., Yanko Yu.G., 2019. *Melioratsiya kak neobkhodimoe sredstvo razvitiya selskogo khozyaystva Nechernozemnoy zony Rossii* [Land reclamation as a necessary means of developing agriculture in the Non-Chernozem zone of Russia]. *Agrofizika* [Agrophysics], no. 1, pp. 67-78, DOI: 10.25695/AGRPH.2019.01.09, EDN: VWIUQU. (In Russian).

2. Novikov A.E., Drannikov A.V., 2024. *Pretsizionnye tekhnologii orosheniya v povyshenii ustoychivosti zemledeliya k prirodnym izmeneniyam* [Precision irrigation technologies in increasing the sustainability of agriculture to natural changes]. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture], no. 4(47), pp. 45-50, DOI: 10.35809/2618-8279-2024-4-7, EDN: AYRNAJ. (In Russian).

3. Awazi N.P., 2022. Assessing the role of irrigation as an adaptive measure to climate change induced water insecurity: Case study of the market gardening sector in parts of the northwest and west regions of Cameroon. *Frontiers in Water*, vol. 4, art. 902438, DOI: 10.3389/frwa.2022.902438, EDN: DGPAZM.

4. Polzikov D.A., 2023. *Osnovnye napravleniya politiki adaptatsii sel'skogo khozyaystva Rossii k klimaticheskim izmeneniyam* [Adaptation of Russian agriculture to climate change: policy objectives and main problems]. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development], no. 6(201), pp. 119-137, DOI: 10.47711/0868-6351-201-119-137, EDN: BIZBHC. (In Russian).

5. Prajapati H.A., Khushboo Y., Yamuna H., Margam B.K., Tanzeel K., Ningaraj B., Vimala T., Afshan J., Gomadhi G., Malathi G., 2024. Impact of climate change on global agriculture: Challenges and adaptation. *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 14, no. 4, pp. 372-379, DOI: 10.9734/ijecc/2024/v14i44123, EDN: RZQULT.

6. Novikov A.E., Dubenok N.N., Toropov A.Yu., 2024. *Vodopodgotovka na prirodnykh*

modifitsirovannykh zagruzkakh dlya sistem pretsizionnogo orosheniya [To the issue of water treatment by hydrocyclone on the systems of the combined irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 6(78), pp. 311-320, DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-34, EDN: MKCCVQ. (In Russian).

7. Wang H., Yin Z., Zhang L., Zhao F., Huang W., Wang X., Gao Y., 2022. Irrigation modulates the effect of increasing temperatures under climate change on cotton production of drip irrigation under plastic film mulching in southern Xinjiang. *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, art. 1069190, DOI: 10.3389/fpls.2022.1069190, EDN: PUWIJA.

8. Oiganji E., Igbadun H., Amaza P.S., Lenka R.Z., 2025. Innovative technologies for improved water productivity and climate change mitigation, adaptation, and resilience: A review. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 29, no. 1, pp. 123-136, DOI: 10.4314/jasem.v29i1.17, EDN: HSYUFG.

9. Vasiliev S.M., Shkura V.N., Shtanko A.S., 2019. *Ochertanie lokal'nykh zon uvlazhneniya podkapel'nogo pochvennogo prostranstva* [Local moisture zones profile of subdrip soil space]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 3, pp. 65-71, DOI: 10.28983/asj.y2019i3pp65-71, EDN: YZPHVZ. (In Russian).

10. Shkura V.N., Shtanko A.S., 2023. *Geometriya konturov kapel'nogo uvlazhneniya pochv* [Geometry of soil drip irrigation contours]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 2, pp. 55-74, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-55-74, EDN: ZQRYEJ. (In Russian).

11. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2018. *Sposob grafoanaliticheskogo postroeniya ochertaniya konturov kapel'nogo uvlazhneniya pochv* [Method of graphoanalytical design of moisture contour at drip irrigation]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 1(29), pp. 67-85, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=914> (accessed 01.05.2026), EDN: YOTSKC. (In Russian).

12. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2023. *O transformatsii konturov kapel'nogo uvlazhneniya pochvy v postpolivnoy period* [On transformation of drip soil moisture contour in after-irrigation period]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 3, pp. 69-86, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-69-86, EDN: AYRQFY. (In Russian).

13. Shkura V.N., Masny R.S., Shtanko A.S., 2023. *Sistemy kapel'nogo orosheniya sadov: nauch.-prakt. izd.* [Drip Irrigation Systems for Gardens: Scientific and Practical Publication]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 300 p. (In Russian).

14. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie* [Drip Irrigation]. Novochoerkassk, Lick Publ., 322 p., EDN: QLCBEP. (In Russian).

15. Ryzhakov A.N., Shkura V.N., 2017. *Opreделение srednevzveshennoy vlazhnosti pochvy v konturakh kapel'nogo orosheniya* [Determination of average-weighted soil moisture in drip humidification contours]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 3(27), pp. 97-111, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=286> (accessed 01.05.2026), EDN: ZCQAPB. (In Russian).

Информация об авторах

А. Е. Новиков – директор, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. о. Город-Герой Волгоград, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), ae_novikov@mail.ru, AuthorID: 619181, ORCID: 0000-0002-8051-4786;

П. С. Васильев – доцент кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет (400005, Волгоградская область, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28), nestorvv@mail.ru, AuthorID: 716749, ORCID: 0000-0003-0262-686X;

М. Ю. Шмелёва – аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. о. Город-Герой Волгоград, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9); ассистент агроинженерного департамента Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов имени имени Патриса Лумумбы (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), krushinova-myu@rudn.ru, ORCID: 0009-0005-4514-3827;

Р. В. Збукарев – лаборант-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. о. Город-Герой Волгоград, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), zbukarevr@mail.ru, AuthorID: 1209654, ORCID: 0000-0002-9237-547X.

Information about the authors

A. E. Novikov – Director, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Hero City Volgograd City District, Volgograd, Timiryazeva st., 9), ae_novikov@mail.ru, AuthorID: 619181, ORCID: 0000-0002-8051-4786;

P. S. Vasilyev – Associate Professor of Department of Processes and Equipment for Chemical and Food Production, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volgograd State Technical University (400005, Volgograd region, Volgograd, Lenin ave., 28), nestorvv@mail.ru, AuthorID: 716749, ORCID: 0000-0003-0262-686X;

M. Yu. Shmeleva – Postgraduate Student, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Hero City Volgograd City District, Volgograd, Timiryazeva st., 9); Assistant of the Agroengineering Department of the Agrarian and Technological Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (117198, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 6), krushinova-myu@rudn.ru; ORCID: 0009-0005-4514-3827;

R. V. Zbukarev – Laboratory Researcher, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Hero City Volgograd City District, Volgograd, Timiryazeva st., 9), zbukarevr@mail.ru, AuthorID: 1209654, ORCID: 0000-0002-9237-547X.

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

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

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

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.03.2026; одобрена после рецензирования 29.05.2026; принята к публикации 19.06.2026.

The article was submitted 27.03.2026; approved after reviewing 29.05.2026; accepted for publication 19.06.2026.