

Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 3 (47). С. 82–89  
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2023; (3-47): 82–89

### Научная статья

УДК 631.86:504.064

Код ВАК 4.3.1

EDN: YZRMUN

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ПОЧВЕ С УПЛОТНЕННЫМ СЛОЕМ В ПРОЦЕССЕ УТИЛИЗАЦИИ СЖИЖЕННОГО БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА

Петр Алексеевич Смирнов<sup>1✉</sup>, Михаил Петрович Смирнов<sup>2</sup>, Виктор Васильевич Алексеев<sup>3</sup>,  
Владимир Петрович Филиппов<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Россия

<sup>3,4</sup> Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

<sup>1</sup> smirnov\_p\_a@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6643-6657>

<sup>2</sup> sttmo@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-7067-3583>

<sup>3</sup> av77@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

<sup>4</sup> filippov\_v\_p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>

**Аннотация.** Цель исследований – моделирование пространственной локализации при внесении жидких органических удобрений. Внесение органических удобрений в современном сельском хозяйстве – ключевой аспект успешного выращивания. Однако в процессе внесения возникают проблемы, связанные с избыточной концентрацией питательных веществ в одних областях и недостатком в других. В работе рассматриваются проблемы внесения и моделирования пространственной локализации удобрений при утилизации бесподстилочного навоза. Их решение позволяет точно определить области, в которых концентрируются питательные вещества и соответственно корректировать параметры разрабатываемых орудий. Разработанная программа позволяет задавать широкий ряд начальных и граничных условий: градиенты влажности по глубине, расстояния между областями подачи веществ. Расчеты производятся с учетом законов гидрофизики почвы. Исследования показали, что моделирование дает возможность прогнозирования и выявления нежелательных ситуаций, связанных с появлением избыточных или недостаточных концентраций и их динамики. Использование моделей и расчетов массопереноса позволяет более точно определить оптимальные периодичность и объемы подачи удобрений. Решаемая проблема требует дальнейших исследований, связанных с улучшением алгоритмов программы и ее универсализации. Программное средство имеет графический интерфейс для возможности точно задать начальные и граничные условия, описывающие состояние почвенного профиля и визуализации результатов. Актуальность темы исследования подтверждается перспективностью бесподстилочного навоза в обозримом будущем. Изготовлен глубокорыхлитель-дренер (патент на полезную модель № 217154 U1). Практическое изучение модели проведено на подпахотном внесении сжиженного бесподстилочного навоза при закладке хмельника (глубина 40 см) и внесении жидкой фракции навоза на глубину 20 см в почву теплицы. Опыты показали идентичность модели.

**Ключевые слова:** внесение удобрений, фильтрация, навоз, кольматация, подпахотный слой, моделирование.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках плана-задания по заданию НИР МСХ РФ на 2023 год по теме: «Разработка технологии и технических средств для внесения в подпахотный слой жидких органических удобрений».

**Для цитирования:** Смирнов П.А., Смирнов М.П., Алексеев В.В., Филиппов В.П. Моделирование массопереноса в почве с уплотненным слоем в процессе утилизации сжиженного бесподстилочного навоза // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 3 (47). С. 82–89. EDN: YZRMUN.

### Scientific article

## MODELING OF MASS TRANSFER IN SOIL WITH A HARDPAN WHEN UTILIZING LIQUID MANURE

Pyotr A. Smirnov<sup>1✉</sup>, Mikhail P. Smirnov<sup>2</sup>, Viktor V. Alekseev<sup>3</sup>, Vladimir P. Philippov<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Chuvash State Agricultural University, Cheboksary, Russia

<sup>3,4</sup> I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

<sup>1</sup> smirnov\_p\_a@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6643-6657>

<sup>2</sup> sttmo@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-7067-3583>

<sup>3</sup> av77@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

<sup>4</sup> filippov\_v\_p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>

**Abstract.** The purpose of the research is to simulate spatial localization when applying liquid organic fertilizers. The application of organic fertilizers in modern agriculture is a key aspect of successful cultivation. However, during the application process, problems arise associated with an excessive concentration of nutrients in some areas and nutrient lack in others. This work deals with the problems of applying and modeling the

spatial localization of fertilizers during utilization of liquid manure. The solution of these problems allows identifying accurately the areas in which nutrients are concentrated and, accordingly, adjust the parameters of the tools under development. The developed program makes it possible to preset a wide range of initial and boundary conditions such as humidity gradients in depth, distances between areas of substance application. The calculations are made according to the laws of hydro-physical properties of soil. The research has shown that modeling makes it possible to predict and identify undesirable situations associated with the appearance of excessive or insufficient fertilizer concentrations and their dynamics. The use of models and calculations of mass transfer makes it possible to more accurately determine the optimal frequency and volume of fertilizer application. This problem requires further research dealing with improving the algorithms of the program and its universalization. The software tool has a graphical interface to accurately set the initial and boundary conditions describing the state of the soil profile and visualization of the results. The relevance of the research topic is confirmed by the prospects of liquid manure application in the foreseeable future. A deep tillage cultivator, a mole blade, was manufactured (utility model patent No. 217154 U1). The pilot study of the model was carried out on the subsoil injection of liquid manure when establishing a hop-yard (40 cm deep) and the introduction of a liquid fraction of manure to a depth of 20 cm into the soil of the greenhouse. The trials have shown the identity of the model.

**Keywords:** fertilization, filtration, manure, colmatation, hardpan, modeling.

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the program plan on research assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation for 2023 on the topic «Development of technology and technical means for applying liquid organic fertilizers into the hardpan».

**For citation:** Smirnov P.A., Smirnov M.P., Alekseev V.V., Philippov V.P. Modeling of mass transfer in soil with a hardpan when utilizing liquified manure. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2023; (3-47): 82–89. EDN: YZRMUN (In Russ).

**Введение.** Внесение удобрений в подпахотный слой почвы – весьма эффективный метод утилизации бесподстилочного навоза. В настоящее время этот метод незаслуженно имеет слабое распространение как в отечественном, так и в зарубежных агропромышленных животноводческих комплексах. Такой способ подачи растворенных питательных веществ дает возможность в большинстве случаев одновременно решить широкий круг проблем [1], связанных с обеспечением растений минеральными и органическими веществами [2]. Основными известными преимуществами такого подхода являются экологичность и минимизация затрат на внесение удобрения за счет возможности ограничения объема внесения удобрений в соответствующие области роста и развития корневой системы, а также высокая степень точности управления концентрацией и сроками внесения удобрений.

При этом остается достаточно вопросов, требующих внимания и своевременного решения [3–4]. Игнорирование пространственной неоднородности почвенных свойств [5] (как выяснилось, даже распределения влаги по глубине) может привести к нежелательному конечному распределению концентрации питательных веществ [6]. Давно известно, что частота подачи удобрений и их объемы влияют на динамику питательных веществ в корнеобитаемом слое [7], но детального учета вклада начальных условий на перераспределение питательных веществ до настоящего времени не имеется. В связи с этим моделирование массопереноса и использование численных методов вполне обосновано и может оказаться весьма полезным. Теоретические и прикладные проблемы орошения широко раскрыты в научных исследованиях. К ним относятся выбор нормы и частоты, различные тип моделирования геометрических контуров увлажнения (на основе физических законов), набор свойств учитываемых при прогнозировании контуров увлажнения. Это хорошо известные подходы, которые, однако, дают существенные рас-

хождения с практикой на конкретных почвах в их конкретном состоянии.

Подводя итог, можно отметить, что на данном этапе использование моделирования и численных методов позволяет существенно сократить затраты, связанные с прогнозом массопереноса и, что главное, повысить эффективность внесения удобрений. Цель исследования – моделирование пространственной локализации при внесении жидких органических удобрений.

**Материалы и методы.** Для исследования массопереноса при утилизации бесподстилочного навоза в качестве питательного вещества нами использовалась навозная жижа. Данное органическое удобрение широко распространено. Дозировка для культур различна, но в среднем варьируется в определенных пределах, которые служат критическими значениями при моделировании. Внесение жидкого навоза в подпахотный слой меняет ряд свойств почвы и почвенной влаги. Касательно данного исследования важными являются те величины, которые влияют на основную гидрофизическую характеристику почвы (ОГХ) и функцию ее влагопроводности. Это достаточно малые изменения, за исключением забивания пор в граничном слое, на порядок снижающем в этом тонком, практически сантиметровом слое коэффициент влагопроводности. Плотность снижается мало – на 2–5 %. Вязкость меняется на 3–8 %, контактный угол смачивания на 2–4 %. Осмотическое давление в данном интервале влажностей повышается на 1–2 %. На 12–17 % снижается коэффициент поверхностного натяжения [8].

То, как перемещается почвенная влага, содержащая растворенные жидкие органические удобрения, определяет функция влагопроводности. Основными ее аргументами выступают перечисленные выше характеристики и давление почвенной влаги, определяемое ОГХ. При рассмотрении ОГХ примем во внимание  $\psi'$  – потенциал, обусловленный взаимодействием влаги с твердой фазой почвы,  $\psi''$  – потенциал, обусловленный

взаимодействием влаги с почвенным воздухом, и  $\psi'''$  – потенциал, обусловленный осмотическим давлением, наличием растворенных органических удобрений. Тогда зависимость потенциала почвенной влаги может быть записана в виде [8]:

$$\psi = \psi' + \psi'' + \psi''' = \frac{A\Omega_0^3}{\rho w^3} + \frac{\Omega_0 \sigma_{lg}}{\rho} \cdot D(w, \Pi_0) + \frac{RT}{\rho} \left( \frac{C}{M^*} + \frac{C^2 \rho}{M(\rho^*)^2} \left( \frac{1}{2} - \mu \right) \right),$$

где  $\Omega_0$  – соответствующая рассматриваемому типу почв, удельная поверхность,  $w$  – влажность,  $\sigma_{lg}$  – поверхностное натяжение,  $\rho$  – плотность жидкости,  $M$  – молярная масса воды,  $\rho^*$  – плотность монофосфата калия,  $M^*$  – «эффективная» молярная масса органической части,  $C$  – концентрация органической части,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $\mu$  и  $A$  – константы,  $D(w, \Pi_0)$  – определяет почвенный гранулометрический состав.

В результате добавления в жидкость органической части наблюдается коагуляция (забивание) пор в граничной зоне. Это приводит к экспоненциально убывающей во времени фильтрации:

$$K = K_0 e^{-Rt},$$

где  $K$  и  $K_0$  – текущее и начальное значения коэффициента фильтрации в почве,  $t$  – время,  $R$  – экспери-

ментально определяемый коэффициент.

При моделировании для реализации расчетов по формуле (1) разработана специализированная программа (рисунок 1). Она позволяет, используя формулу Дарси, моделировать динамику почвенной влаги с построением контуров увлажнения и изолиний концентрации питательных веществ [9–10]. В формуле Дарси разность давлений почвенной влаги между двумя соседними точками рассчитывается по формуле (1), таким образом для каждой точки рассматриваемого объема почвы происходит учет типа почв, пористости, гранулометрического состава и пр. Распределение этих величин и влажности по глубине задается в виде начальных условий [11–12].

При моделировании использована однородная сеточная функция. Алгоритм, реализующий вычисления, обрабатывает ее значения во всех  $n^3$  узлах, соответствующих координатам трехмерного пространства (где  $n$  – количество рассматриваемых точек вдоль каждой координаты). Использование современных многопоточных процессоров, позволяющих распараллеливать вычисления, дает возможность достаточно быстро (от 1 до 4–6 мин) получить визуализированный результат даже при достаточно большом количестве узлов, соответствующих линейным размерам

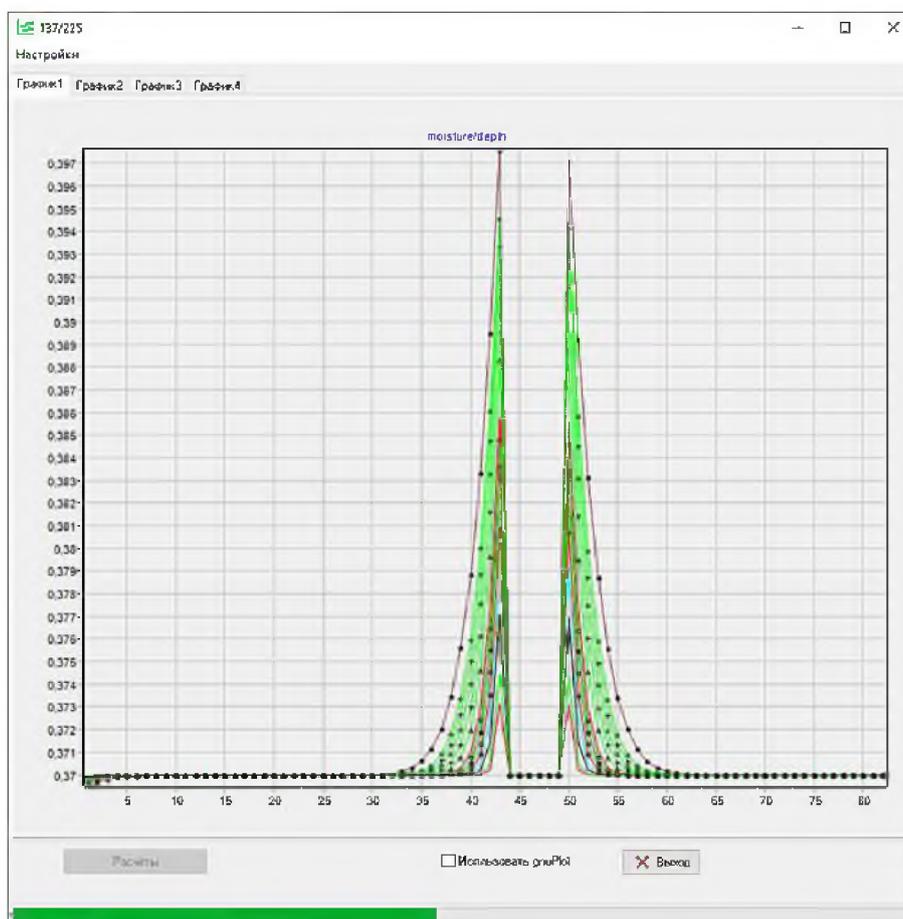


Рисунок 1 – Процесс отображения программой промежуточных вычислений

ячейки – 1 мм × 1 мм × 1 мм. Алгоритм, используя законы гидрофизики почв и грунтов, рассчитывает перераспределение жидкой фазы от ячейки к ячейке через задаваемый интервал времени. Промежуточные и конечные вычисления сохраняются в виде массивов с концентрациями и объемами жидкой компоненты. Пропорционально прошедшему объему, а следовательно, пропорционально массе застрявших в порах элементах, взвешенных в жидком навозе фракций, снижался коэффициент фильтрации влаги. Расчет объемов влаги, перетекаемой между соседними слоями, происходил исходя из уравнения Дарси. Постепенно снижающееся гидростатическое давление столба жидкости внутри полости учитывалось путем дополнительного давления обусловленного гравитацией  $\rho g \Delta h$ .

Объемная влажность почвы ( $w$ ) представляет собой объем жидкости в единице объема пространства почвы. При каждом цикле перерасчета эта величина меняется. В первом приближении будем рассматривать ее как сумму объемов жидкости уже находившейся в почве  $w_0$  с нулевой концентрацией жидких удобрений  $C_0$  и поступившей извне  $w^*$  с концентрацией жидких удобрений  $C^*$ . Тогда для изменения объема жидкости можно записать:

$$w = w_0 + w^* . \quad (2)$$

С учетом того, что процесс инфильтрации жидких удобрений проходит достаточно медленно (в нашем случае около недели), можно вполне уверенно считать, что жидкости успевают перемешаться. Поэтому для промежуточного значения концентрации в конце каждого такта расчета справедливо записать:

$$C = \frac{C_0 w_0 + C^* w^*}{w_0 + w^*} . \quad (3)$$

Из зарубежных исследований по внутрипочвенному распространению жидких форм удобрения нами сделано следующее заключение: продолжаются изучение пространственного распределения нитратов почвы, минерализуемого углерода и микробной биомассы [13], моделирование влияния жидкого навоза на грунтовые воды [14], влияния на потоки  $N_2$ ,  $N_2O$  и  $CO_2$  [15] и газовые потоки в почве, в частности в теплице. Также идет совершенствование технологии программ ЭВМ по теме и создание новых [16], но самих технологий [17]. Natasha Rayne, Lawrence Aula подошли к решению проникновения в почву с позиции объемной плотности, устойчивости агрегатов, инфильтрации, водоудерживающей способности, плодородия почвы и биологических свойств [18]. Наш подход к решению задачи основан на ОГХ почвы (1) и учете эффекта

кольматации. Конечная задача исследования – создание объемной модели не только проникновения навоза в почву, но и основных питательных веществ.

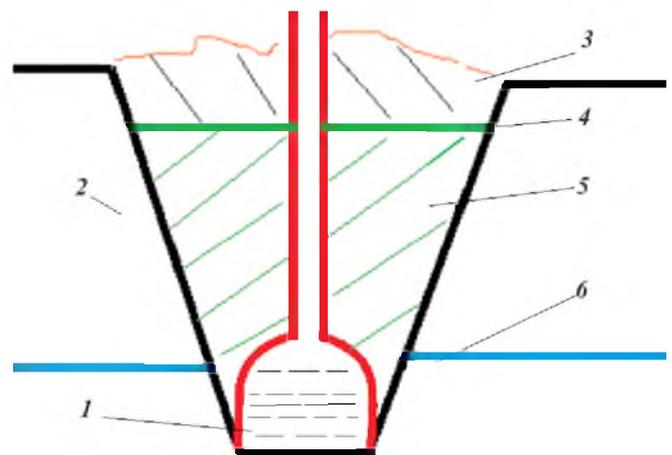
**Результаты исследований и их обсуждение.** При изучении пространственного распределения влияния жидких органических удобрений в данной работе использовались следующие граничные и начальные условия:

- влажность на границе внутренней полости соответствует полному заполнению пор жидкостью;

- плотность почвы практически линейно увеличивалась по глубине, за исключением уплотненного слоя, на котором значения плотности имели резкий скачок;

- удельная поверхность твердой фазы почв с глубиной нелинейно возрастала.

После прохода глубокорыхлителем и внесения жидкой фазы в почву на глубине 0,25... 0,35 см формируется дренажный канал в виде свода (рисунки 2, 3), который заполняется жидким или сжиженным навозом бесподстилочным. По сторонам под углом 25...27° образуется разрыхленная область с объемной массой  $\gamma = 0,95...1,0$  г/см<sup>3</sup>. Заполняется канал и частично разрыхленная зона, но без выхода навоза на поверхность поля [19]. Дно канала имеет объемную массу почвы  $\gamma = 1,45...1,55$  г/см<sup>3</sup>, твердость – приблизительно 3,5 МПа, т. е. на пределе шкалы твердомера Ревякина. Жидкая фракция навоза – по уже указанным параметрам.



- 1 – жидкий (сжиженный) навоз;  
 2 – не разрушенный пласт;  
 3 – защитный (запахоизолирующий) слой толщиной 0,08 м;  
 4 – максимальный уровень заполнения навоза;  
 5 – пахотный (поглощающий) слой толщиной 0,2 м);  
 6 – плужная подошва

Рисунок 2 – Исходная схема для моделирования

На рисунках 4 и 5 приведены результаты моделирования при наличии уплотненного слоя на различных глубинах – 20 см и 40 см. Из рисунков видны повышенные локальные концентрации органических удобрений в почве. Результаты почвенных разрезов на вторые сутки после внесения (рисунок 2 б) подтверждают этот факт. Формы контуров, описывающих содержание питательных веществ, по окончании процесса инфильтрации концентрируются именно в областях границы области уплотнения. Моделирование позволяет точно подобрать такие расстояния между каналами, при которых происходит смыкание контуров от соседних каналов и формируется относительно однородное распределение питательных веществ в подпахотном слое в целом по полю.



а



б

а) и б) глубокорыхлитель-дренер для внесения навоза [19]

Практическое изучение модели проведено на подпахотном внесении сжиженного бесподстилочного навоза при закладке хмельника (0,40 м) и внесении жидкой фракции навоза на глубину 0,20 м в теплице [16]. При этом посредством почвенного разреза оценивалась разница в абсолютной влажности почвы между внесенным и не внесенным жидкой фракции навоза участками. Ширина почвенного разреза составила на хмельнике не менее 1,30 м, 0,85 м – в теплице. Почвенные пробы на хмельнике брали начиная с глубины 0,15 до 0,85 м, через каждые 0,10 м. При этом по поперечной горизонтали интервал проб было 0,20 м. В теплице определяли влажность почвы на глубине с 0,10 м и до 0,80 м также через каждые 0,10 м. По поперечной горизонтали интервал 0,10 м. Также взяты пробы с участков с невнесенным навозом в указанных координатах для сравнения в качестве базового параметра.

В теплице, как в изолированном участке от атмосферных осадков и со средней абсолютной влажностью почвы  $w_a = 19,1\%$ , разработанная модель показала сходимость с полученными практическими данными, причем во времени распространение жидкой фракции навоза (впитывание) происходит быстрее, чем на модели. На хмельнике опыты проведены осенью ( $w_a = 23,4\%$ ) перед посадкой хмеля. С учетом неустойчивых погодных условий, эксперимент признан достоверным, хотя прошедший дождь увеличил насыщенность почвы влагой. При этом в целом картина распространения жидкого навоза соответствовала модели.

**Заключение.** В зависимости от начальных и граничных условий распределение по глубине плотности, влажности, глубины и толщины уплотненного слоя форма и геометрические размеры контуров инфильтрации жидких органических удобрений существенно различаются. Эти различия могут быть спрогнозированы, рассчитаны и использованы при конструировании рабочих органов специализированных обрабатывающих машин. Незначительно различающиеся начальные условия совокупно могут значительно повлиять на конечный результат. Разработанная авторами программа позволяет учитывать достаточно широкие диапазоны начальных и граничных условий значительно перекрывающие реально осуществимые в природе. Гидрофизика почв в исследовании представлена ОГХ и функцией влагопроводности. Исследования показали, что моделирование дает возможность прогнозирования и выявления нежелательных ситуаций, связанных с появлением избыточных или недостаточных концентраций питательных веществ и их динамики.

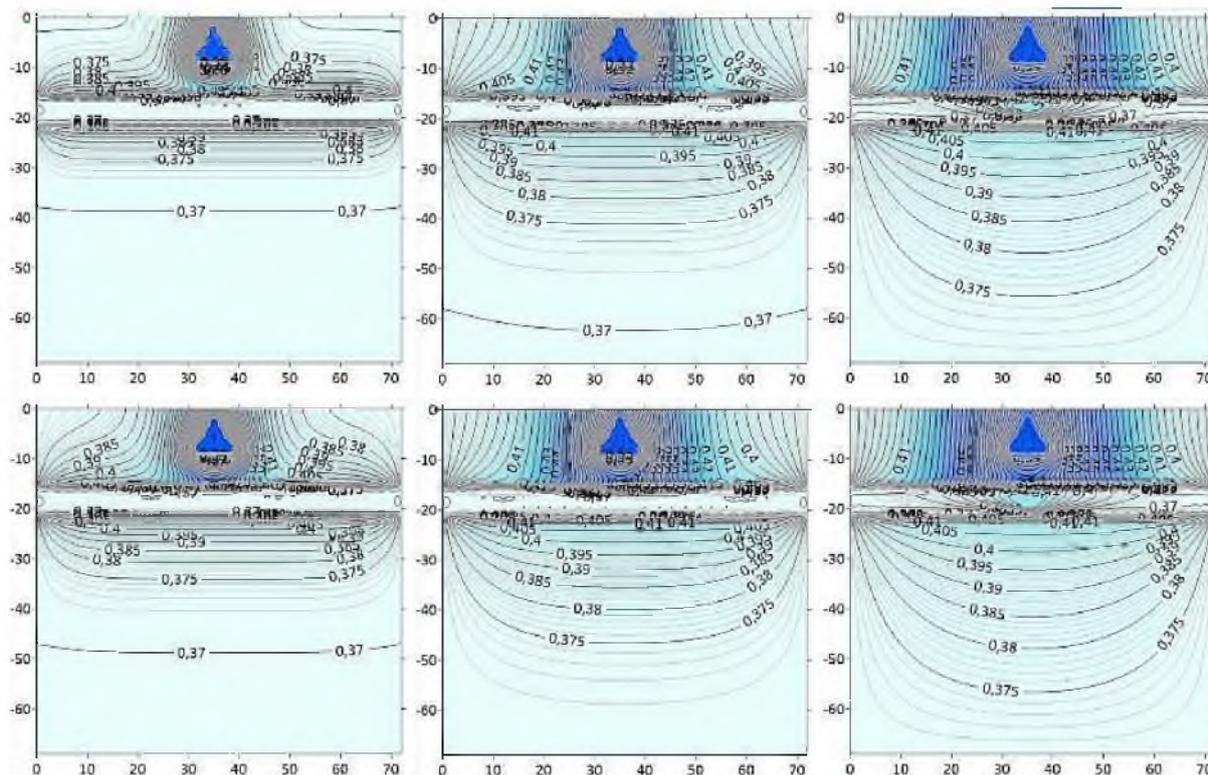


Рисунок 4 – Динамика распределения жидкой фазы (глубина уплотненного слоя 0,2 м)

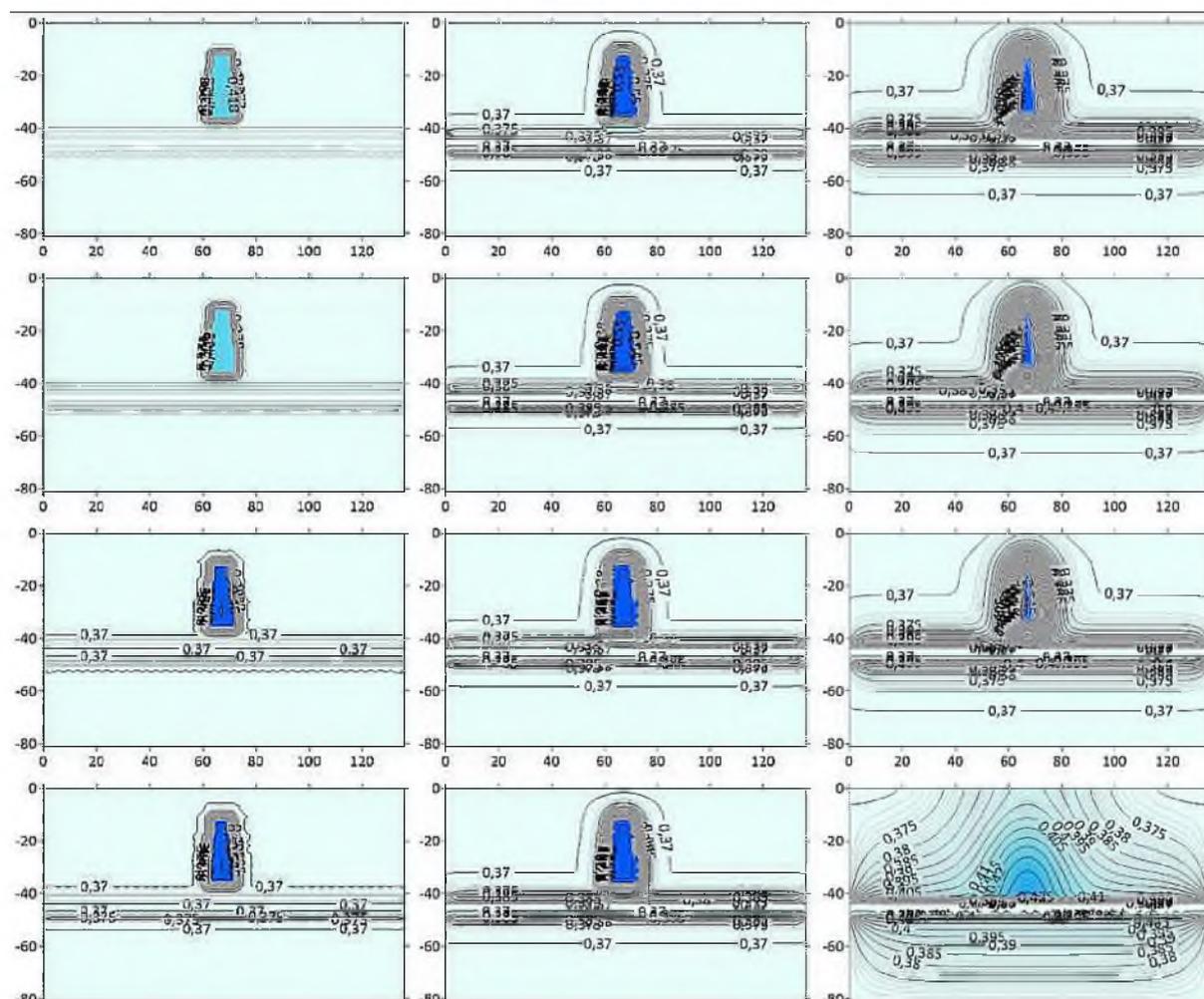


Рисунок 5 – Динамика распределения жидкой фазы (глубина уплотненного слоя 0,4 м)

**Список источников**

1. Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении / И.А. Успенский [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 1. С. 97-108.
2. Разработка рабочего органа для внесения жидких мелиорантов в почву при плоскорезной обработке / С.А. Васильев [и др.] // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2014. № 1. С. 55-58.
3. Оптимальное управление поливами на основе современных вычислительных алгоритмов / В.В. Бородычев [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 4 (40). С. 21-28.
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.
5. Причины вторичного засоления орошаемых почв нижнего Поволжья и его прогнозирование на основе математического моделирования влагопереноса / А.С. Овчинников [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2 (50). С. 9-17.
6. Шкура В.Н., Штанько А.С. Об учете почвенных водно-физических характеристик при определении параметров контуров капельного увлажнения почвы // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 4 (28). С. 137-153.
7. Vasiliev S.A., Fedorova A.A., Alekseev V.V. Method for measuring a surface profile using a mechatronic profiler with parallel control of sensor drives // Measurement Techniques. 2022. Т. 64. № 12. С. 978-984.
8. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н.В. Бышов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 2 / С. 295-305. DOI:10.15507/2658-4123.029.201902.295-305.
9. Алексеев В.В., Максимов И.И., Мишин П.В. Изучение влияния механического воздействия на скорость и объем поглощения влаги почвой // Вестник НГИЭИ. 2018. № 7 (86). С. 18-28.
10. Simulation of drip irrigation on slope lands / V.V. Alekseev [et al.] // BIO Web of Conferences (FIES 2019). 2020. Vol. 17. No 5. 00218. DOI: 10.1051/bioconf/20201700218.
11. Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе идеализированных моделей / В.А. Сысуев [и др.] // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 5. С. 63-66.
12. Алексеев В.В. Исследование профилей увлажнения почвы с уплотненным слоем при

дождевании и поверхностном поливе // Природообустройство. 2016. № 4. С. 92-96.

13. Manure injection alters the spatial distribution of soil nitrate, mineralizable carbon, and microbial biomass / A.M. Bierer [et al.] // Journal of Soil and Water Conservation. 2021. No 76 (2). Pp. 175-189. DOI: 10.2489/jswc.2021.00002.

14. Sokolova E., Lindström G., Pers C. Water quality modelling: microbial risks associated with manure on pasture and arable land // Journal of Water and Health. 2018. No 16 (4). Pp. 549-561. DOI: 10.2166/wh.2018.278.

15. Understanding the Impact of Liquid Organic Fertilisation and Associated Application Techniques on N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Fluxes from Agricultural Soils / B. Grosz [et al.] // Agriculture. 2022. No 12. P. 692. DOI: 10.3390/agriculture12050692.

16. How Do Sand Addition, Soil Moisture and Nutrient Status Influence Greenhouse Gas Fluxes from Drained Organic Soils? / A. Säurich [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. 2019. No 135. Pp. 71-84.

17. Assessment of Manure Compost Used as Soil Amendment – A Review / E. Goldan [et al.] // Processes. 2023. No 11. P. 1167. DOI: 10.3390/pr11041167.

18. Natasha Rayne, Lawrence Aula Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review // Soil Systems. 2020. No 4. P. 64. DOI: 10.3390/soilsystems4040064.

19. Энергосберегающая подготовка почвы под посадку хмеля / П.А. Смирнов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 4 (64). С. 68-74. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-68-74. EDN: BIVSUI.

**References**

1. Uspensky I.A. et al. Modelirovanie vliyaniya udobrenii na dinamiku konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii [Modeling the effect of fertilizers on the dynamics of humidification contours during drip irrigation]. Engineering technologies and systems. 2021; (31-1): 97-108. (In Russ).
2. Vasiliev S.A. et al. Razrabotka rabocheho organa dlya vneseniya zhid-kikh meliorantov v pochvu pri ploskoreznoi obrabotke [Development of a working organ for introducing liquid fertilizers into the soil during flat-cutting processing]. Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. 2014; (1): 55-58. (In Russ).
3. Borodychev V.V. et al. Optimal'noe upravlenie polivami na osnove sovremennykh vychislitel'nykh algoritmov [Optimal irrigation management based on modern computational algorithms]. Proceedings of Nizhnevolskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2015; (4-40): 21-28. (In Russ).
4. Rogachev A.F., Melikhova E.V. Komp'yuternoe modelirovanie i para-metrizatsiya v srede MathCad konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii

[Computer modeling and parametrization in the MathCad environment of humidification contours during drip irrigation]. Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2021; (4-64): 367-378. (In Russ).

5. Ovchinnikov A.S. et al. Prichiny vtorichnogo zasoleniya oroshaemykh pochv nizhnego Povolzh'ya i ego prognozirovaniye na osnove matematicheskogo modelirovaniya vlagoperenosa [The causes of secondary salinization of irrigated soils of the Lower Volga region and its prediction based on mathematical modeling of moisture transfer]. Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2018; (2-50): 9-17. (In Russ).

6. Shkura V.N., Shtanko A.S. Ob uchete pochvennykh vodno-fizicheskikh kharakteristik pri opredelenii parametrov konturov kapel'nogo uvlazhneniya pochvy [On the consideration of soil water-physical characteristics in determining the parameters of the contours of drip moistening of the soil]. Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii. 2017; (4-28): 137-153. (In Russ).

7. Vasiliev S.A., Fedorova A.A., Alekseev V.V. Method for measuring a surface profile using a mechatronic profiler with parallel control of sensor drives. Measurement Techniques. 2022; (64-22): 978-984.

8. Byshov N.V. et al. Izmeneniye kontaktnykh uglov smachivaniya pri do-bavlenii v moyushchie rastvory poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Change of contact angles of wetting when surface-active substances are added to washing solutions]. Engineering technologies and systems. 2019; (29-2): 295-305. DOI:10.15507/2658-4123.029.201902.295-305. (In Russ).

9. Alekseev V.V., Maksimov I.I., Mishin P.V. Izuchenie vliyaniya mekhanicheskogo vozdeistviya na skorost' i ob'em pogloshcheniya vlagi pochvoi [Study of the influence of mechanical action on the rate and volume of moisture absorption by soil]. Vestnik NGIEI. 2018; (7-86): 18-28. (In Russ).

10. Alekseev V.V. et al. Simulation of drip irrigation on slope lands. BIO Web of Conferences (FIES 2019). 2020; (17): 00218. DOI: 10.1051/bio-conf/20201700218.

11. Sysuev V.A. et al. Poluchenie osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristiki pochv na osnove idealizirovannykh modelei [Obtaining the main hydrophysical characteristics of soils based on idealized models]. Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk. 2013; (5): 63-66. (In Russ).

12. Alekseev V.V. Issledovanie profilei uvlazhneniya pochvy s uplotnen-nym sloem pri dozhdevanii i poverkhnostnom polive [Investigation of soil moisture profiles with a flattened layer during sprinkling and surface watering]. Priro-doobustrojstvo. 2016; (4): 92-96. (In Russ).

13. Bierer A.M. et al. Manure injection alters the spatial distribution of soil nitrate, mineralizable carbon, and microbial biomass. Journal of Soil and Water Conservation. 2021; (76-2): 175-189.

DOI: 10.2489/jswc.2021.00002. (In Russ).

14. Sokolova E., Lindström G., Pers C. Water quality modelling: microbial risks associated with manure on pasture and arable land. Journal of Water and Health. 2018; (16-4): 549-561. DOI: 10.2166/wh.2018.278. (In Russ).

15. Grosz B. et al. Understanding the Impact of Liquid Organic Fertilisation and Associated Application Techniques on N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Fluxes from Agricultural Soils. Agriculture. 2022; (12): 692. DOI: 10.3390/agriculture12050692.

16. Säurich A. et al. How Do Sand Addition, Soil Moisture and Nutrient Status Influence Greenhouse Gas Fluxes from Drained Organic Soils? Soil Biology and Biochemistry. 2019; (135): 71-84.

17. Goldan E. et al. Assessment of Manure Compost Used as Soil Amendment – A Review. Processes. 2023; (11): 1167. DOI: 10.3390/pr11041167.

18. Natasha Rayne, Lawrence Aula Live-stock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. Soil Systems. 2020; (4): 64. DOI: 10.3390/soilsystems4040064.

19. Smirnov P.A. et al. Energoberegayushchaya podgotovka pochvy pod posadku khmelya [Energy-saving soil preparation for planting hops]. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2021; (16-4-64): 68-74. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-68-74. EDN: BIVSUI. (In Russ).

#### Информация об авторах

П.А. Смирнов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 438540.

М.П. Смирнов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 981963.

В.В. Алексеев – доктор технических наук, профессор; AuthorID 677466.

В.П. Филиппов – кандидат физико-математических наук, доцент; AuthorID 785154.

#### Information about the author

P.A. Smirnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 438540.

M.P. Smirnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 981963.

V.V. Alekseev – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 677466.

V.P. Philippov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor; AuthorID 785154.

Статья поступила в редакцию 25.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 25.08.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for publication 15.11.2023.