

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра информатики и программирования

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ В ТРЕЩИНОВАТО-
ПОРИСТЫХ ГРУНТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ
АВТОМАТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 441 группы
направления 02.03.03 Математическое обеспечение и администрирование
информационных систем
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Алексеева Олега Сергеевича

Научный руководитель:

профессор кафедры

информатики и

программирования, д.т.н.

А. С. Фалькович

подпись, дата

Зав. кафедрой:

к.ф.-м.н., доцент

М. В. Огнева

подпись, дата

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование природных процессов с использованием компьютерных технологий является одной из актуальных задач современной науки и техники. Одной из таких задач является изучение движения влаги в трещиновато-пористых грунтах, что имеет важное значение для сельского хозяйства, строительной индустрии и экологии. Точное понимание и прогнозирование поведения влаги в грунтах позволяет решать задачи рационального использования водных ресурсов, предотвращать негативные последствия эрозии и оползней, а также оптимизировать агротехнические мероприятия.

Клеточные автоматы(КА) представляют собой мощный инструмент для моделирования сложных систем и процессов. Они позволяют описывать динамику систем, состоящих из большого числа взаимодействующих между собой элементов, с помощью дискретных состояний и простых правил перехода. Применение клеточных автоматов к задаче моделирования движения влаги в грунтах предоставляет новые возможности для исследования этого процесса с учётом его нелинейности и пространственной неоднородности.

Язык программирования C# и платформа .NET предоставляют широкие возможности для разработки производительных и удобных в использовании приложений. Использование Windows Presentation Foundation (WPF) позволяет создавать интерактивные графические интерфейсы и визуализировать результаты моделирования, что является важным аспектом при разработке научно-исследовательских приложений.

Цель работы состоит в разработке и реализации на языке программирования C# модели клеточного автомата и ее применения для реализации алгоритмов, описывающих движение влаги в трещиновато-пористых грунтах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теорию клеточных автоматов, их классификацию и примеры использования в моделировании физических процессов.

2. Изучить особенности движения влаги в грунтах, включая механизмы фильтрации, капиллярного подъёма и влияние трещиноватости на водный режим грунтов.

3. Модифицировать алгоритм движения влаги на основе правил перехода состояний клеточного автомата, отражающих физические процессы влагообмена.

4. Выбрать инструментарий для реализации, включая среду разработки, библиотеки и фреймворки, обеспечивающие эффективную работу с графикой и пользовательским интерфейсом.

5. Реализовать модель и алгоритмы в приложении на языке C#.

Актуальность исследования обусловлена потребностью в простых и эффективных методах моделирования процессов движения влаги в грунтах, которые могут быть использованы в практических приложениях.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что клеточные автоматы предоставляют альтернативный подход, позволяющий проводить моделирование с высокой степенью детализации и гибкостью настройки параметров. В то время как традиционные методы, основанные на решении дифференциальных уравнений, часто требуют больших вычислительных ресурсов и сложны в реализации при учёте неоднородностей среды.

Бакалаврская работа состоит из введения, двух разделов, заключения, списка использованных источников и трёх приложений. Общий объём работы – 81 страница, из них 66 страниц – основное содержание, включая 8 рисунков и 2 таблицы. Список использованных источников содержит 25 наименований; цифровой носитель в качестве приложения – 1 шт.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Теоретическая часть».

В первой главе автореферата обоснована необходимость разработки клеточно-автоматной модели фильтрации и подробно описана научная база, на которой опирается исследование. Сначала даётся сравнительный анализ существующих численных пакетов HYDRUS 2D/3D и SWMS_2D, демонстрируется их высокая точность при использовании методов конечных разностей и конечных элементов, а также отмечается существенный недостаток — большие вычислительные затраты при детальной сетке и сложность настройки граничных условий. Далее приводятся результаты обзора публикаций Li и Cao (2010) и Furnari и соавт. (2021), в которых показано, как клеточные автоматы могут приближать уравнение Ричардса, но при упрощённых эмпирических правилах теряют количественную сопоставимость с экспериментом. На основании таблицы 1.1 диплома автор делает вывод, что комбинированный подход, основанный на строгой дискретизации закона Дарси в форме клеточного автомата, способен обеспечить баланс между физической корректностью и вычислительной экономичностью.

В следующем абзаце излагаются ключевые понятия теории клеточных автоматов. Решётка рассматривается как двумерная прямоугольная область, каждой ячейке которой приписывается дискретизированное значение объёмной влажности. Поясняются свойства локальности и параллелизма, а также принцип одновременного обновления всех ячеек по локальной функции перехода δ . Исторический экскурс связывает разработку фон Неймана и Улама с более поздними работами Конвея и Вольфрама, а доказанная М. Куком Тьюринг-полнота Правила 110 подчёркивает вычислительную мощь клеточных автоматов. Рассматривается классификация автоматов по размерности, типу соседства и характеру правил, а также описываются такие явления, как самоорганизация, эмерджентность и существование устойчивых аттракторов.

Затем автор реферата переходит к физическим основам движения влаги. Формулируется уравнение непрерывности, вводится закон Дарси и выводится нелинейное уравнение Ричардса, связывающее влагосодержание θ и гидравлический потенциал h . Для замыкания системы используются эмпирические зависимости ван Генухтена–Мюалема, позволяющие описать кривую водоудерживания $\theta(h)$ и функцию проводимости $K(\theta)$ для конкретного типа почвы. Описывается процесс дискретизации: производные заменяются разностями, поток между ячейками рассчитывается из градиента потенциала, а обновление θ выполняется по явной схеме Эйлера с контролем шага времени через условие CFL. Приведён графический материал диплома (фигуры 1.6 и 1.7), иллюстрирующий зависимости $\theta(h)$ и $K(\theta)$ для исследуемого суглинка.

В заключительной части теоретического раздела обосновывается выбранный инструментарий дискретизации: сеточный шаг $0,03 \times 0,02$ м обеспечивает приемлемый компромисс между разрешением и затратами ЦП, соседство Мура гарантирует изотропию фильтрационного потока, а адаптивный выбор Δt сохраняет устойчивость явной схемы даже при резком изменении K_s . Дополнительно рассматривается, каким образом в модель вводится вероятность трещины: ячейки-трещины получают увеличенную гидропроводность, что позволяет естественно воспроизводить макропоры в грунте.

Второй раздел «Практическая часть».

Практическая глава автореферата посвящена созданию программного комплекса, реализующего описанную выше клеточно-автоматную схему, и демонстрирует весь путь — от формальной постановки задачи до анализа численных экспериментов. Сначала формулируются цели моделирования: необходимо оценить, как интенсивность осадков, вероятность трещиноватости и значения коэффициента фильтрации влияют на скорость проникновения влаги и положение фронта насыщения. Для этого в дипломе выбраны три типа грунтов, параметры которых сведены в таблице 2.1, и заданы три характерные продолжительности эксперимента — 12 ч, 72 ч и 30 сут.

Далее описывается архитектура программного решения. Принципиальная схема включает три независимых проекта: графический интерфейс на WPF, ядро бизнес-логики, содержащее класс `SoilSimulator`, и вспомогательную библиотеку DTO-классов для конфигураций и ячеек грунта. Связь между слоями осуществляется через событие `StepCompleted`, позволяющее UI-компонентам и модулю логирования асинхронно получать результаты следующего шага расчёта.

Центральным элементом реализации является класс `SoilSimulator`. В тексте диплома приведён полный листинг метода `Step()`, который начинается с распределения дождевой воды по поверхностному ряду ячеек, затем последовательно вычисляет вертикальные, горизонтальные и диагональные потоки, а в конце обновляет влагосодержание каждой ячейки, ограничивая его интервалом $[\theta_r, \theta_s]$. Для повышения производительности массивы гидравлической проводимости и потенциала пересчитываются один раз в начале итерации и переиспользуются при расчёте потоков.

Конфигурация модели задаётся JSON-файлом, структура которого описана в дипломе листингом 2.3. Пользователь может изменить ширину и высоту сетки, значение K_s , начальную влажность, величину временного шага и вероятность образования трещин. После загрузки конфигурации интерфейс

позволяет запускать, останавливать и перезапускать симуляцию, а также сохранять её состояние на диск. Растровая визуализация выполняется через класс SliceRenderer, который генерирует изображение размером, совпадающим с сеткой, и окрашивает каждую ячейку в цвет от белого до насыщенного синего в зависимости от текущей влажности. Трещины отображаются чёрными пикселями, что делает их мгновенно различимыми на поле.

В дипломе подробно обсуждается работа таймера DispatcherTimer, обеспечивающего устойчивую частоту кадров около 30 Гц при сетке 100×100 . Окно «Diagnostics» выводит значение критерия Куранта и текущий номер шага, а отдельное окно графика, построенное на LiveCharts, показывает изменение средней влажности $\theta(t)$. Реализована возможность экспорта одномоментного распределения θ в CSV, что облегчает последующую обработку данных.

Заключительная часть раздела содержит результаты численных экспериментов. Для каждого сценария в таблице 2.4 приведено время достижения фронтом глубины 40 см, а на рисунках 2.7–2.9 — серии снимков поля влажности, демонстрирующие, как трещиноватость ускоряет пропускание воды и формирует неоднородные «пальцы» инфильтрации. Графики изменения $\theta(t)$ показывают, что при дождевой нагрузке 5 мм на шаг равновесное состояние устанавливается через 24 часа, тогда как при удвоенном K_s насыщение достигается уже через 4 часа.

Таким образом, практическая часть подтверждает работоспособность разработанной модели и иллюстрирует её потенциал для инженерных расчётов, связанных с прогнозом динамики влажности в неоднородных грунтах, оценкой устойчивости склонов и проектированием противоэрозионных мероприятий.

Разработанное приложение обеспечивает наглядное моделирование движения влаги в трещиновато-пористых грунтах и даёт возможность исследовать влияние ключевых механических и гидрофизических параметров

среды на процесс инфильтрации. наглядное моделирование движения влаги в трещиновато-пористых грунтах и даёт возможность исследовать влияние ключевых механических и гидрофизических параметров среды на процесс инфильтрации. наглядное моделирование движения влаги в трещиновато-пористых грунтах, позволяет гибко изменять параметры модели и исследовать влияние трещиноватости, интенсивности осадков и гидрофизических характеристик почвы на процесс инфильтрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы была достигнута поставленная цель — разработана и реализована модель клеточного автомата для численного решения уравнения Ричардса и исследовано движение влаги в трещиновато-пористых грунтах на языке C#.

Проведён анализ теории клеточных автоматов: рассмотрены их основные понятия, история развития, классификация, свойства и примеры классических моделей. Также изучены физические законы движения влаги в грунтах: уравнение непрерывности, закон Дарси и нелинейное уравнение Ричардса, а для замыкания задачи изучены эмпирические зависимости $\theta(h)$ и $K(\theta)$ по модели ван Генухтена–Мюалема.

Далее была сформулирована функция перехода δ : выбрано соседство Мура, рассчитаны гидравлический потенциал и проводимость в каждой клетке, потоки между соседями определяются дискретизированным законом Дарси, а влажность обновляется по явной схеме Эйлера с учётом источников и стоков. Введён адаптивный шаг по времени для обеспечения выполнения CFL-условия и численной устойчивости.

Для визуализации и управления моделью применены технологии .NET 8.0 и WPF (графический интерфейс), WriteableBitmapEx (эффективная растровая отрисовка клеток) и Newtonsoft.Json (конфигурационные файлы). Архитектура решения разделена на три слоя — UI, бизнес-логику и общие компоненты — что обеспечивает модульность, простоту тестирования и расширяемость системы.

Была реализована модель и алгоритмы в приложении на языке C# с использованием WPF и библиотеки WriteableBitmapEx. Приложение позволяет интерактивно настраивать коэффициент фильтрации, интенсивность осадков, начальную влажность и вероятность трещиноватости, визуализировать эволюцию поля влажности в реальном времени и отслеживать среднюю влажность во времени.

Таким образом, все поставленные задачи выполнены в полном объёме, а полученная программная система отвечает целям работы и может быть использована для прикладных задач моделирования влагообмена в грунтах.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Šimůnek, J., van Genuchten, M. T. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-2d=> (дата обращения: 03.02.2025).
2. Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. T. The SWMS-2D code for simulation of water flow and solute transport in 2-D variably saturated media using finite elements [Электронный ресурс]. URL: https://www.pc-progress.com/Documents/programs/SWMS_2D.pdf (дата обращения: 02.02.2025).
3. Найденов, А. С., Василько, В. П., Терехова, С. С. Почвенная влага: принципы и пути регулирования водного режима почвы. — Краснодар : КубГАУ, 2020. — 77 с.
4. Шеин, Е. В. Движение воды в почве // *Природа*. — 2001. — № 10. — С. 56–60.
5. Документация по Windows Presentation Foundation (WPF) [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/desktop/wpf/> (дата обращения: 18.02.2025).
6. Рабочие процессы конечного автомата (Windows Workflow Foundation) [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/windows-workflow-foundation/state-machine-workflows> (дата обращения: 05.03.2025).
7. Теория автоматов / ВШЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hse.ru/data/2012/01/09/1262052475/Автоматы.pdf> (дата обращения: 22.02.2025).