

**Рябов Артём Михайлович**, магистрант 2 курса, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия, г. Калининград

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕНДИНГОВОГО ПРОТОКОЛА  
НА БЛОКЧЕЙНЕ ETHEREUM МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ И АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена исследованию устойчивости и платёжеспособности лендингового протокола на базе блокчейна Ethereum методами имитационного моделирования и агентного моделирования. Разработан комплекс смарт-контрактов на языке Solidity, реализующий функционал депонирования цифровых активов, выдачи займов с избыточным залоговым обеспечением, ликвидации нездоровых позиций и социализации безнадёжного долга. Создана симуляционная среда, имитирующая работу децентрализованного рынка, с пятью типами агентов с детерминированными политиками, воспроизводящими поведение реальных пользователей рынка децентрализованных финансов (DeFi). Проведена серия из 80 симуляционных экспериментов со стохастическим генератором курса цены залогового актива на основе случайного процесса Орнштейна-Уленбека и параметрическим варьированием долгосрочного среднего. По результатам симуляционного эксперимента выявлены четыре режима функционирования протокола: режим безусловной устойчивости (падение цены не более 25% от начального уровня), режим управляемого риска (не более 50% от начального уровня), режим выживания (не более 75%) и режим коллапса (75% и более). Показано, что при глубоких обвалах рынка накапливаемого резервного фонда недостаточно для защиты депозиторов от убытков, а ключевую роль в устойчивости протокола

играет скорость ликвидации и закрытия проблемных позиций. Результаты работы применимы для параметрической оптимизации протоколов DeFi на этапе проектирования.

## ABSTRACT

This study investigates the stability and solvency of an Ethereum-based lending protocol using simulation and agent-based modeling methods. A suite of smart contracts was developed in the Solidity programming language, implementing digital asset deposits, issuance of overcollateralized loans, liquidation of undercollateralized positions, and socialization of bad debt. A simulation environment replicating the operation of a decentralized market was created, featuring five types of agents with deterministic policies designed to reproduce the behavior of real participants in a decentralized finance (DeFi) market. A series of 80 simulation experiments was conducted using a stochastic collateral asset price generator based on the Ornstein-Uhlenbeck process, with parametric variation of the long-term mean. The simulation results identified four protocol operating regimes: an unconditional stability regime (price decline not exceeding 25% of the initial level), a managed-risk regime (not exceeding 50% of the initial level), a survival regime (not exceeding 75%), and a collapse regime (75% or more). The findings demonstrate that under severe market downturns, the accumulated reserve fund is insufficient to protect depositors from losses, while the speed of liquidation and closure of distressed positions plays a critical role in maintaining protocol stability. The results are applicable to the parameter optimization of DeFi protocols during the design stage.

**Ключевые слова:** блокчейн, Ethereum, смарт-контракт, лендинговый протокол, DeFi, имитационное моделирование, агентное моделирование.

**Keywords:** blockchain, Ethereum, smart contract, lending protocol, DeFi, simulation modeling, agent-based modeling.

## **Введение**

Децентрализованные финансы (DeFi) – одна из наиболее активно развивающихся современных финансовых экосистем [2]. Совокупная стоимость активов ведущих блокчейнов, реализующих полноценный децентрализованный рынок, таких как Ethereum, на сегодняшний день составляет десятки миллиардов долларов [4]. В центре этой обширной экосистемы находятся лендинговые протоколы – смарт-контракты (самоисполняющиеся программы на блокчейне), реализующие функционал депонирования и выдачи кредитов в цифровых активах (токенах). Ведущие лендинговые протоколы, такие как Aave и Compound, продемонстрировали высокую эффективность, однако события крупных рыночных обвалов выявили риски каскадных ликвидаций и накопления безнадёжного долга.

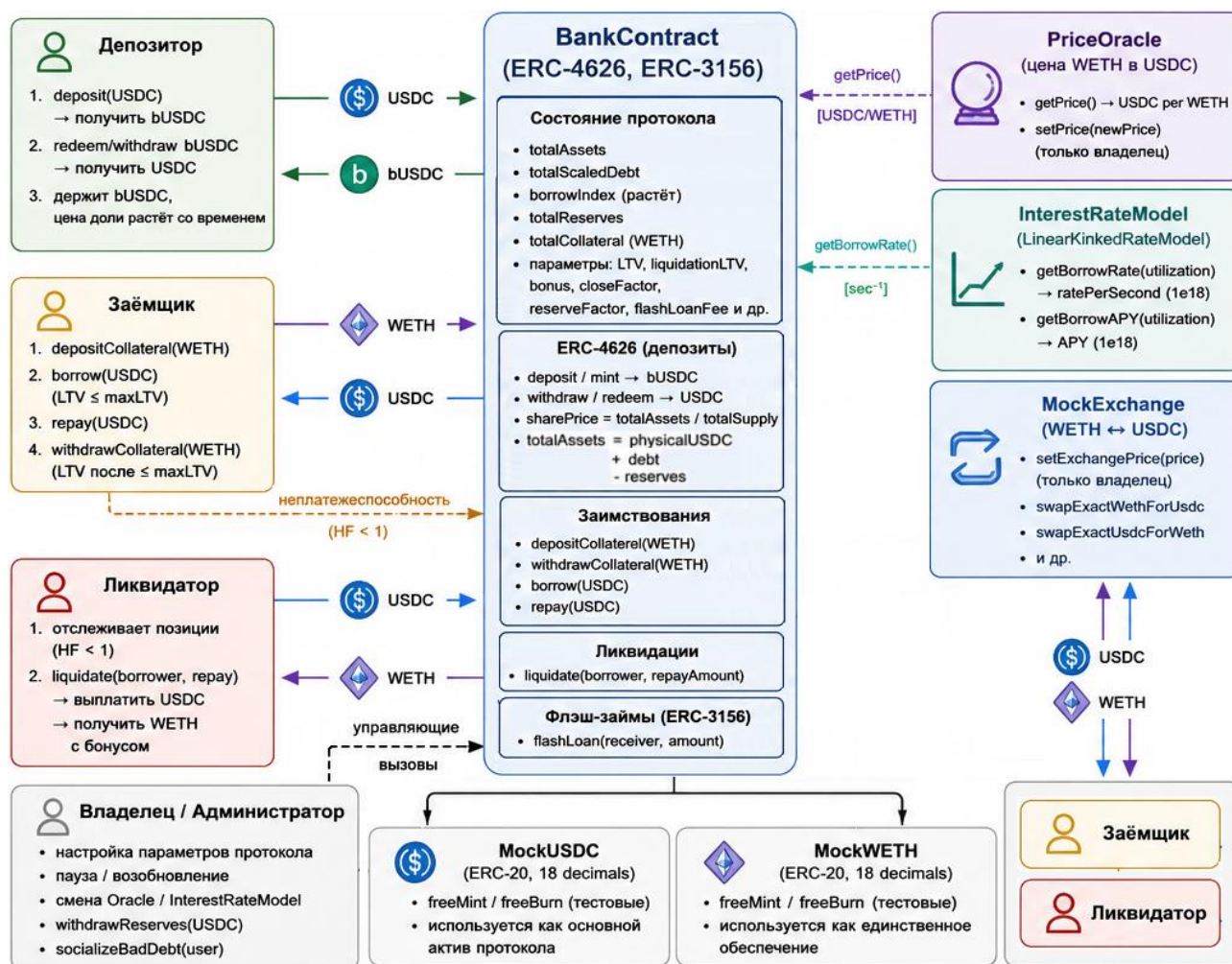
В силу высокой размерности пространства свободных параметров, стохастической природы финансовых рынков и сложной, комплексной природы взаимодействия агентов в финансовой системе аналитическое исследование работы лендинговых протоколов не представляется возможным [8]. Это обуславливает потребность в методах имитационного моделирования и агентного моделирования для предварительного анализа устойчивости и платёжеспособности лендинговых протоколов. Актуальность и научная новизна данной работы заключается в разработке воспроизводимой симуляционной среды, имитирующей неоднородную агентскую среду децентрализованного рынка, и её использовании для формулирования конкретных выводов об устойчивости разработанного лендингового протокола, опирающегося на идеи Compound и Aave [9; 10].

## **Материалы и методы**

Разработка смарт-контрактов протокола велась на языке Solidity. Использовались готовые реализации общепринятых стандартов (ERC-20, ERC-4626, Ownable, ReentrancyGuard) из библиотеки OpenZeppelin. Для запуска локальной тестовой сети блокчейн использовалась утилита Foundry/Anvil. Компиляция смарт-контрактов в байткод осуществлялась посредством фреймворка Ape. Логика симуляции и поведенческие политики агентов были описаны в скриптах Python. Взаимодействие между кодом симуляции и локальной сетью осуществлялось через фреймворк Ape.

Ядро протокола составляет контракт BankContract, который наследуется от стандарта ERC-4626 (токенизированное хранилище). Депозиторы могут размещать на счёт контракта стейблкоины USDC и получать взамен токены доли bUSDC. Цена одного токена доли всегда равна отношению всех активов банка к общему числу долей. Когда начисляются проценты заёмщикам, то активы протокола растут, цена доли увеличивается, и депозиторы могут извлечь прибыль, обменяв доли обратно на стейблкоины. Заёмщики могут вносить WETH (wrapped Ether) в качестве залога и получать кредит в USDC, обеспечение по займу всегда избыточное. Оракул PriceOracle возвращает текущую цену WETH (в эксперименте оракул получает данные о цене из симуляционного слоя). Модуль InterestRateModel возвращает процентную ставку заёмщиков по заданной утилизации (отношению дебиторской задолженности к стоимости всех активов протокола).

Архитектура разработанного комплекса смарт-контрактов представлена на Рисунке 1.



**Рисунок 1. Архитектура комплекса смарт-контрактов протокола**

В симуляции используется кусочно-линейная модель, воспроизводящая процентные ставки протокола Compound:

$$\text{rate}(u) = \begin{cases} b + s_1 u & (0 \leq u < k) \\ b + s_1 k + s_2 (u - k) & (k \leq u \leq 1) \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\text{rate}(u)$  – величина ставки заёмщика (в долях годовых),  $u$  – утилизация протокола,  $b = 0.02$  – начальная ставка,  $k = 0.8$  – оптимальное значение утилизации,  $s_1 = 0.04$  – коэффициента наклона кривой до оптимума,  $s_2 = 0.75$  – коэффициент наклона кривой после оптимума.

Биржа MockExchange в симуляции моделирует внешний рынок – на ней пользователи обменивают WETH на USDC и наоборот по текущему курсу. Контракты MockWETH и MockUSDC наследуются от стандарта ERC-20 и моделируют соответствующие реальные токены.

Для выдачи кредита его отношение к стоимости залога (loan-to-value, LTV) не может превышать порога  $\text{maxLTV} = 75\%$ . Если же LTV заходит за более высокий порог  $\text{liquidationLTV} = 80\%$  (например при падении цены эфира), такая позиция открывается для ликвидации. Ликвидатор выплачивает часть долга и получает за это пропорциональную по стоимости часть залога с бонусом  $\text{liquidationBonus} = 5\%$ . При малых LTV ликвидации улучшают здоровье позиции – уменьшают LTV – и протокол позволяет закрыть лишь её часть  $\text{liquidationCloseFactor} = 50\%$ , чтобы вернуть в здоровую зону. Если же LTV выше порога невозврата  $\text{doomedCap} = 1 / (1 + \text{liquidationBonus}) \approx 95.23\%$ , ликвидации ухудшают здоровье позиции – увеличивают LTV – и протокол разрешает закрыть позицию полностью. Долю  $\text{reserveFactor} = 10\%$  от всех начисленных замщикам процентов протокол накапливает в резервы. Они не входят в активы и служат для социализации долга, который остаётся после ликвидации безнадёжных позиций. Если резервов не хватает, то долг социализируется за счёт активов и цена доли bUSDC падает, а депозиторы терпят убытки.

Рассмотренные выше параметры являются свободными параметрами симуляции и в реальной рыночной среде устанавливаются владельцем протокола. Также для симуляции были разработаны поведенческие политики следующих типов агентов:

- **Депозитор:** При комфортных (достаточно высоких) ставках покупает доли bUSDC. При некомфортных (низких) ставках продаёт доли. Если цена доли падает ниже критической отметки, паникует и пытается немедленно выйти из позиции.
- **Консервативный заёмщик:** При комфортной (низкой) ставке однократно закладывают часть стартового капитала WETH, чтобы занять USDC. Поддерживают LTV на низком уровне (30-50%). Если LTV растёт и защитить позицию не удаётся, паникуют и стремятся как можно скорее выплатить долг и выйти из позиции.

- **Агрессивный заёмщик:** Использует циклическое кредитование: закладывает WETH, занимает USDC, конвертирует в WETH на бирже, снова закладывает и т.д., до достижения персонального мультипликатора залога (1.2 – 3.5). Поддерживает высокий LTV (60-72%) и обычно не может защитить позицию при падении цены залогового актива.
- **Ликвидатор:** Регулярно сканирует часть пула заёмщиков и ликвидирует нездоровые позиции.
- **Владелец:** Периодически сканирует часть пула заёмщиков и социализирует остаточный безнадёжный долг, не покрытый залогом.

Было проведено 80 симуляций, каждая из которых охватывала промежуток в 833 дня (~2 года) симулированного времени. Каждая симуляция наполнялась пулом из 1000 агентов (45% депозиторы, 25% консервативные заёмщики, 25% агрессивные заёмщики, 5% ликвидаторы) + аккаунт владельца протокола и технический аккаунт, размещающий в сети mock-токены и mock-биржу. Политики агентов детерминированы, однако пороговые значения параметров, дающие сигнал к тем или иным действиям, выбирались для каждого агента случайно из фиксированных равномерных распределений, отражающих неоднородность пула пользователей в реальных рынках. Стартовые балансы каждого аккаунта в USDC и WETH также генерировались случайным образом из логнормальных распределений. Шаг симуляции состоял в случайном выборе 10 агентов пропорционально их концентрации в пуле и индивидуальным для каждого класса агентов коэффициентам активности; каждый из них проверяет свою политику и выполняет на её основе не более одной транзакции. Выполненные транзакции составляют один блок симуляции.

Курс залогового актива описывался случайным процессом Орнштейна-Уленбека (OU): геометрическое броуновское движение (GBM) с дрейфом к

долговременному среднему  $\mu$ . Процесс описывается стохастическим дифференциальным уравнением:

$$d \ln S = \theta(\ln \mu - \ln S)dt + \sigma dW \quad (2)$$

Здесь  $S(t)$  – цена залогового актива,  $\mu$  – долгосрочное среднее цены,  $\theta$  – скорость возврата к среднему,  $\sigma$  – волатильность актива, и  $W(t)$  – стандартный винеровский процесс. Выбор OU-процесса вместо классического GBM обусловлен необходимостью задавать различные качественные сценарии поведения курса актива, при этом сохраняя характерную форму временного ряда цены. Для симуляции положены  $\sigma = 0.68 \text{ год}^{-1}$ ,  $\theta = 3.0 \text{ год}^{-1}$ , что соответствует типичным значениям для Ethereum. Начальный курс всегда был равен 2000 USDC/WETH, а  $\mu$  между симуляциями менялось от 2000 до 25 USDC/WETH с шагом 25 USDC/WETH.

## Результаты

В ходе 80 симуляционных сценариев, отличающихся только значением долгосрочного среднего  $\mu$  цены залогового актива, были выявлены четыре качественно различных режима поведения протокола. Следует отметить, что картина для каждой отдельной симуляции была индивидуальна, и влияние случайных параметров могло вызывать поведение протокола, не характерное для соответствующего значения  $\mu$ ; приведённые далее наблюдения отражают именно общий тренд для указанных диапазонов значений.

Режим 1 – безусловная устойчивость ( $\mu \approx 1500\text{-}2000 \text{ USDC/WETH}$ ). Когда  $\mu$  сопоставим с начальной ценой, протокол работает в равновесном самоподдерживающемся состоянии. Утилизация колеблется вблизи оптимального значения 0.8, ставка заёмщика большую часть времени остаётся в диапазоне 5-7% годовых, ставка депозитора 3-5%. Ликвидации происходят эпизодически, их объём не превышает долей процента от общего размера пула; безнадёжный долг практически не формируется, резервы



увеличиваются, а цена доли bUSDC равномерно растёт. В этом режиме все защитные механизмы протокола работают безотказно.

Режим 2 – управляемый риск ( $\mu \approx 1000-1500$  USDC/WETH). При умеренном понижении долгосрочного среднего относительно начальной цены в протоколе появляются первые социализации безнадёжного долга. Число ликвидаций заметно растёт, однако их абсолютный объём остаётся ограниченным. Накопленный резервный буфер компенсирует списания, не допуская снижения курса bUSDC (либо снижение не превышает 1-2% и быстро восстанавливается за счёт процентов). Утилизация временами отклоняется от оптимума, но протокол продолжает выполнять кредитную функцию.

Режим 3 – выживание ( $\mu \approx 500-1000$  USDC/WETH). При дальнейшем углублении ценового шока резервы перестают справляться: после их исчерпания каждое новое списание безнадёжного долга непосредственно уменьшает активы протокола, что приводит к устойчивому снижению цены доли (в среднем до 5-6%, иногда до 10%). Агрессивные и консервативные заёмщики массово паникуют и покидают протокол, утилизация к концу симуляции часто не превышает 0.1-0.3. Протокол остаётся платёжеспособным формально, однако экономическая активность в нём угасает, а депозиторы несут прямые потери.

Режим 4 – коллапс ( $\mu < 500$  USDC/WETH). Когда долгосрочное среднее цены на порядок ниже начального значения, кредитная деятельность прекращается. Заёмщики исчезают (залоговые позиции либо ликвидированы, либо социализированы), утилизация обнуляется, ставка депозитора падает до нуля. Небольшая часть наиболее терпеливых вкладчиков может оставлять средства в пуле, но они уже не приносят дохода. В отдельных симуляциях наблюдалась полная потеря ликвидности: волна панических изъятий депозитов, вызванная падением цены доли, приходила раньше, чем ликвидаторы успевали закрыть накопившиеся проблемные позиции, из-за чего

физический баланс пула временно обнулялся. Наступала экономическая смерть протокола.

Анализ симуляций показал, что ключевым фактором, определяющим устойчивость протокола к ценовому шоку, является не столько абсолютный размер накопленных резервов, сколько оперативность реакции агентов на ценовой шок. Если ликвидаторы и заёмщики успевают преобразовать залоги в USDC до того как долговые позиции становятся безнадёжными, протокол сохраняет платёжеспособность даже при существенном падении цены. Напротив, замедление этой реакции (например, из-за ограниченной скорости обработки проблемных позиций ликвидаторами) приводит к ускоренному накоплению безнадёжного долга и экономическому коллапсу протокола. Резервы эффективно выполняют свою защитную функцию при умеренных колебаниях цены, защищая протокол от кратковременного снижения стоимости доли, однако они неспособны целиком впитать в себя урон от катастрофического обвала рынка.

## **Заключение**

Проведённый в данной работе анализ методами имитационного и агентного моделирования позволил получить цельную картину чувствительности лендингового протокола к глубине ценового шока. Было выявлено четыре режима функционирования протокола – от безусловно устойчивого до полного коллапса ликвидности. Было установлено, что резервный фонд играет лишь вспомогательную роль: при сильных рыночных падениях накопленные средства истощаются, и потери ложатся на депозиторов. Решающим условием живучести протокола оказывается оперативность, с которой ликвидаторы и сами заёмщики закрывают проблемные позиции, превращая залоги в ликвидные токены. Результаты работы демонстрируют, что при проектировании защитных механизмов DeFi-

приложений недостаточно опираться на один лишь механизм резервирования – необходимо также оценивать способность самой системы поглощать шоки в заданном темпе. Это наблюдение обосновывает важность экономического стимулирования ликвидаторов к активному закрытию позиций, такого как введение бонуса за ликвидацию.

Ограничения модели (единственный залоговый актив, упрощённый оракул, отсутствие газовых издержек и проскальзывания на внешней бирже) допущены сознательно для фокусирования внимания на макродинамике рынка, и указывают направления дальнейших исследований. Учёт этих факторов, скорее всего, обострит кризисные эффекты, но уже сейчас предложенный подход может использоваться как инструмент предварительного стресс-тестирования DeFi-протоколов, позволяя разработчикам обоснованно выбирать параметры и предвидеть условия, при которых система теряет устойчивость.

### **Список литературы**

1. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум / А. С. Акопов. – Москва : Юрайт, 2015. – 389 с. – (Бакалавр. Академический курс ; сер. 58). – ISBN 978-5-9916-5549-1. – Текст : непосредственный. – EDN VTVYDB.
2. Ахметшина, Д. И. DeFi-технологии: преимущества и недостатки / Д. И. Ахметшина. – Текст : непосредственный // Научные исследования 2023: актуальные теории и концепции : сборник материалов XXIX-ой международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 24 мая 2023 года. Т. 1. – Москва : Научно-издательский центр «Империя», 2023. – С. 15–16. – EDN IILXJK.
3. Бутерин, В. Жёлтая книга Ethereum (Ethereum Yellow Paper) : формальная спецификация Ethereum [Электронный ресурс] / В. Бутерин,

- Г. Вуд ; ред. Г. Вуд. – 2023. – URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf> (дата обращения: 18.05.2026). – Текст : электронный.
4. Гараев, Т. М. У. Перспективы развития модели организации финансов DeFi / Т. М. У. Гараев, Н. И. Быканова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные науки сегодня : материалы XXX международной научно-практической конференции, Bengaluru, Karnataka, India, 26–27 декабря 2022 года. – Bengaluru : Pothi.com, 2022. – С. 156–159. – EDN WFWTUG.
  5. Жихарев, А. Г. Системно-объектное моделирование смарт-контрактов / А. Г. Жихарев, В. В. Киданов, Н. И. Корсунов. – Текст : электронный // Экономика. Информатика. – 2023. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemno-obektnoe-modelirovanie-smart-kontraktov> (дата обращения: 21.05.2026).
  6. Казнин, А. А. Смарт-контракты и их программирование с помощью языка Solidity / А. А. Казнин. – DOI 10.18411/trnio-11-2023-495. – Текст : непосредственный // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 103, ч. 8. – С. 147–150. – EDN ZIBQJR.
  7. Купцов, Д. А. Блокчейн и смарт-контракты как основа прозрачности в цифровой экономике / Д. А. Купцов ; науч. рук. Ф. Р. Ахмадуллин. – Текст : непосредственный // Тенденции развития интернет и цифровой экономики : труды VIII Международной научно-практической конференции, Симферополь-Алушта, 29–31 мая 2025 года. – Симферополь : ИП Зуева Т. В., 2025. – С. 124–128. – EDN IKPMZR.
  8. Пантелеева, А. И. Анализ устойчивости финансовых систем с использованием агентного моделирования и искусственного интеллекта / А. И. Пантелеева. – Текст : электронный // Вестник науки. – 2025. – № 1 (82). – С. 1–6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz->

- ustoychivosti-finansovyh-sistem-s-ispolzovaniem-agentnogo-modelirovaniya-i-iskusstvennogo-intellekta (дата обращения: 22.05.2026).
9. Aave Protocol Whitepaper V1.0 [Electronic resource] / S. Kulechov [et al.] ; Aave (LendingPool V1). – 2020. – URL: [https://github.com/aave/aave-protocol/blob/master/docs/Aave\\_Protocol\\_Whitepaper\\_v1\\_0.pdf](https://github.com/aave/aave-protocol/blob/master/docs/Aave_Protocol_Whitepaper_v1_0.pdf) (дата обращения: 14.05.2026). – Text : electronic.
  10. Compound: The Money Market Protocol. Whitepaper v1.0 [Electronic resource] / R. Leshner, G. Hayes ; Compound Finance. – 2019. – URL: <https://compound.finance/documents/Compound.Whitepaper.pdf> (дата обращения: 15.05.2026). – Text : electronic.

## References

1. Akopov, A. S. Simulation Modeling: Textbook and Practicum / A. S. Akopov. – Moscow : Yurayt, 2015. – 389 p. – (Bachelor. Academic Course ; ser. 58). – ISBN 978-5-9916-5549-1. – Text : print. – EDN VTVYDB.
2. Akhmetshina, D. I. DeFi Technologies: Advantages and Disadvantages / D. I. Akhmetshina. – Text : print // Scientific Research 2023: Current Theories and Concepts : Proceedings of the 29th International In-Person/Correspondence Scientific-Practical Conference, Moscow, May 24, 2023. Vol. 1. – Moscow : Scientific Publishing Centre "Imperiya", 2023. – P. 15–16. – EDN IILXJK.
3. Buterin, V. Ethereum Yellow Paper: A Formal Specification of Ethereum [Electronic resource] / V. Buterin, G. Wood ; ed. G. Wood. – 2023. – URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf> (accessed: 18.05.2026). – Text : electronic.
4. Garaev, T. M. U. Prospects for the Development of the DeFi Financial Organization Model / T. M. U. Garaev, N. I. Bykanova. – Text : print // Fundamental and Applied Sciences Today : Proceedings of the 30th International Scientific-Practical Conference, Bengaluru, Karnataka, India,

- December 26–27, 2022. – Bengaluru : Pothi.com, 2022. – P. 156–159. – EDN WFWTUG.
5. Zhikharev, A. G. System-Object Modeling of Smart Contracts / A. G. Zhikharev, V. V. Kidanov, N. I. Korsunov. – Text : electronic // Economics. Informatics. – 2023. – No. 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemno-obektnoe-modelirovanie-smart-kontraktov> (accessed: 21.05.2026).
  6. Kaznin, A. A. Smart Contracts and Their Programming Using the Solidity Language / A. A. Kaznin. – DOI 10.18411/trnio-11-2023-495. – Text : print // Trends in the Development of Science and Education. – 2023. – No. 103, pt. 8. – P. 147–150. – EDN ZIBQJR.
  7. Kuptsov, D. A. Blockchain and Smart Contracts as the Basis of Transparency in the Digital Economy / D. A. Kuptsov ; scientific supervisor F. R. Akhmadullin. – Text : print // Trends in the Development of the Internet and the Digital Economy : Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference, Simferopol–Alushta, May 29–31, 2025. – Simferopol : IE Zueva T. V., 2025. – P. 124–128. – EDN IKPMZR.
  8. Panteleeva, A. I. Stability Analysis of Financial Systems Using Agent-Based Modeling and Artificial Intelligence / A. I. Panteleeva. – Text : electronic // Bulletin of Science. – 2025. – No. 1 (82). – P. 1–6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ustoychivosti-finansovyh-sistem-s-ispolzovaniem-agentnogo-modelirovaniya-i-iskusstvennogo-intellekta> (accessed: 22.05.2026).
  9. Aave Protocol Whitepaper V1.0 [Electronic resource] / S. Kulechov [et al.] ; Aave (LendingPool V1). – 2020. – URL: [https://github.com/aave/aave-protocol/blob/master/docs/Aave\\_Protocol\\_Whitepaper\\_v1\\_0.pdf](https://github.com/aave/aave-protocol/blob/master/docs/Aave_Protocol_Whitepaper_v1_0.pdf) (accessed: 14.05.2026). – Text : electronic.
  10. Compound: The Money Market Protocol. Whitepaper v1.0 [Electronic resource] / R. Leshner, G. Hayes ; Compound Finance. – 2019. – URL:

<https://compound.finance/documents/Compound.Whitepaper.pdf> (accessed: 15.05.2026). – Text : electronic.