УДК 303.094.7; 621.039

1.8. Прототип агент-ориентированной модели Курской атомной электростанции с симуляцией возможных чрезвычайных происшествий во время ее эксплуатации

Черненко Д.В., Бартновский Н.А., ЦЭМИ РАН, Москва
Зорин М.Ю., Парагульгов С.М., ГБОУ г. Москвы «Школа на проспекте Вернадского», Москва

В статье рассмотрены современные тенденции развития мировой и российской атомной энергетики, проанализированы преимущества и недостатки использования ядерной энергии, а также отечественный и зарубежный опыт эксплуатации атомных электростанций. В качестве объекта исследования выбрана Курская АЭС, для которой проведен анализ возможных угроз безопасному функционированию, включая запроектные аварии, внешние воздействия и сценарии, аналогичные крупнейшим авариям в истории атомной энергетики. На основе проведенного анализа разработан прототип агент-ориентированной имитационной модели распространения радиоактивного загрязнения в 30-километровой зоне вокруг станции, реализованный в программной среде AnyLogic. Модель позволяет воспроизводить различные сценарии чрезвычайных происшествий и оценивать масштабы их последствий для населения и территории. В ходе вычислительных экспериментов были реализованы позитивный, случайный и негативный сценарии развития аварийной ситуации. Результаты моделирования показали, что при негативном сценарии в зону возможного радиоактивного загрязнения могут попасть до 13 населенных пунктов с общей численностью населения свыше 69 тыс. человек, тогда как при позитивном сценарии под угрозой оказываются только 3 населенных пункта с населением около 2 тыс. человек. Полученные результаты могут быть использованы при планировании мероприятий по обеспечению радиационной безопасности, подготовке планов эвакуации населения и совершенствовании систем реагирования на чрезвычайные ситуации на объектах атомной энергетики.

Введение

В настоящее время атомная энергетика играет значительную роль в мировом энергобалансе, насчитывая 440 энергоблоков на 192 АЭС в 31 стране[1] [2]. Особую актуальность этой отрасли придают серьезные последствия возможных аварий, ярким примером которых является катастрофа на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Выброс радиоактивных веществ и массовая эвакуация населения наглядно демонстрируют, почему непрерывный анализ подобных происшествий критически важен для повышения безопасности объектов и разработки эффективных мер защиты.

Россия является одним из ключевых игроков в сфере ядерной энергетики. На 11 действующих атомных станциях страны работают 35 энергоблоков, которые производят около 19% всего электроэнергии, внося существенный вклад в национальный энергобаланс [3]. Развитие отрасли продолжается активными темпами: госкорпорация «Росатом» ведет строительство трех новых энергоблоков внутри страны и обладает масштабным портфелем из 39 зарубежных проектов в десяти государствах. Стратегическое развитие подтверждается и планами по переходу на замкнутую топливную систему к 2030 году.

На глобальной арене Россия уверенно удерживает лидирующие позиции, занимая четвертое место в мире по объему выработки электроэнергии на АЭС. При этом по количеству строящихся энергоблоков в развивающихся странах российская корпорация «Росатом» занимает вторую строчку в международном рейтинге. Это подчеркивает не только внутреннюю значимость атомной генерации для страны, но и ее мощный экспортный потенциал, а также признанные компетенции в сооружении и развитии ядерной инфраструктуры по всему миру.

Роль атомной энергетики в современном мире

В современном мире остро стоит вопрос о нехватке ископаемых ресурсов, ограниченными возможностями гидроэнергетики и жесткими экологическими нормативами по выбросам парниковых газов. В свете этих вызовов именно ядерная энергетика, как одна из самых динамичных отраслей, может стать одним из ключевых решений.

Ядерная энергетика – это отрасль, занимающаяся производством электрической и тепловой энер-

[1] Сколько атомных станций работает в мире и в России? [Электронный ресурс] // Машиностроительный дивизион «Росатома». – URL: https://rosatommd.ru/mediacenter/informatoriy/skolko-atomnyix-stanczij-rabotaet-v-mire-i-v-rossii.html (дата обращения: 25.09.2025).

[2] Атомная энергетика в мире [Электронный ресурс] // Машиностроительный дивизион «Росатома». – URL: https://rosatommd.ru/mediacenter/informatoriy/atomnaya-energetika-v-mire.html (дата обращения: 25.09.2025).

[3] Генерация электроэнергии [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: https://rosatom.ru/production/generation/ (дата обращения: 25.09.2025).

гии за счет расщепления ядер тяжелых элементов в реакторах. Прогнозируется, что мировое потребление энергии вырастет на четверть в ближайшие 25 лет, а основными потребителями станут развитые страны [4].

Первая в мире АЭС была построена в СССР, и это был огромный научный и инженерный проект, в котором участвовали сотни умнейших людей страны. Главным человеком был академик Игорь Васильевич Курчатов. Его называют «отцом» советского атомного проекта. Он был тем, кто взял на себя всю ответственность и убедил руководство страны, что атом можно использовать не только в военных целях, но и для мира – чтобы давать электричество для бытового пользования. Под его общим научным руководством и шли все работы. Но одной идеи было мало. Нужно было создать «сердце» станции – сам реактор. Эту сложнейшую инженерную задачу решил выдающийся конструктор Николай Антонович Доллежаль. Именно он создал проект первого в мире реактора (Атом Мирный-1) для АЭС, который мог безопасно и стабильно работать, и превращать атомную энергию в электрическую.

Станцию построили в городе Обнинске (Калужская область), и теперь она известна как Обнинская АЭС. 27 июня 1954 года ее реактор был запущен, и впервые в истории энергия расщепленного атома была подана в обычную электрическую сеть для освещения и питания домов. Это событие открыло всему миру дорогу к мирному атому.

С каждым годом, начиная с 1954, когда была построена первая АЭС в СССР, в мире увеличивается количество энергии, вырабатываемой с помощью ядерного топлива. Атомная энергетика в XXI веке играет главную роль в обеспечении человечества энергией. На действующих энергоблоках вырабатывается 9% [5] мирового электричества.

Как можем наблюдать на рисунке 1, с 2010 по 2025 год выработка электроэнергии с помощью «мирного» атома увеличилась с 2406 до 2850 ТВт*ч (тераватт-час), побив предыдущий исторический максимум (в 2006 г. – 2660 ТВт*ч) [6].

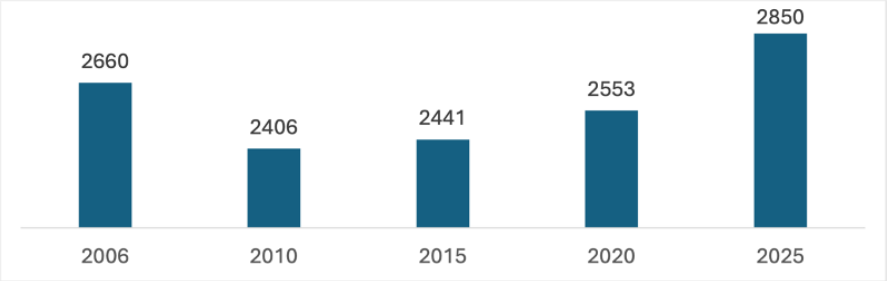


Рисунок 1. Динамика выработки электроэнергии на АЭС в мире за 2010-2024 гг., ТВт*ч

Источник – составлено на основе [7].

Ядерная энергетика в 2025 году остается ключевым элементом энергетической безопасности России, обеспечивая стабильную базовую нагрузку при росте потребления электроэнергии. АЭС произвели в 2025 году свыше 217 млрд кВт*ч электроэнергии [8], что составляет около 20% всей генерации страны с минимальными выбросами CO_2.

Использование атомных реакторов, в качестве альтернативного источника добычи энергии, имеет ряд преимуществ:

1. **Потребность в малом количестве топлива**. Для выработки энергии на АЭС нужно совсем небольшое по объему количество обогащенного урана [9]. В 2022 году для генерации 1000 МВт*час электроэнергии требовалось 517 кг каменного угля или 210 м^3 природного газа. В случае с атомной энергетикой для генерации того количества электроэнергии требуется около 3 кг обогащенного урана.

[4] Потребление энергии в мире к 2050 г вырастет на четверть за счет развивающихся стран – глава «Роснефти» [Электронный ресурс] // ПАО «НК «Роснефть». – URL: https://www.rosneft.ru/press/news/item/222339/ (дата обращения: 25.09.2025).

[5] Атомная генерация в 2023 году выработала 2600 ТВт-ч и составила 9% мирового производства электроэнергии [Электронный ресурс] // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». – URL: https://www.atomic-energy.ru/news/2024/08/28/148717 (дата обращения: 25.09.2025).

[6] The World Nuclear Industry Status Report 2010–2011 (HTML) [Электронный ресурс] // World Nuclear Industry Status Report. – URL: https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-51 (дата обращения: 16.10.2025).

[7] World Nuclear Industry Status Report 2025 (HTML version) [Электронный ресурс] // World Nuclear Industry Status Report. – URL: https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2025-HTML-version#_idTextAnchor025 (дата обращения: 30.11.2025).

[8] Производство электроэнергии АЭС РФ в 2025 году превысило 217 млрд кВт.ч [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России. – URL: https://www.eprussia.ru/news/base/2026/7905864.htm (дата обращения: 08.02.2026).

[9] Алексей Лихачев: "Атомная энергетика не только зеленая, но и самая устойчивая в мире" [Электронный ресурс] // Отраслевое издание госкорпорации "Росатом" "Страна Росатом". – URL: https://strana-rosatom.ru/2024/10/13/aleksej-lihachev-atomnaya-energetika/#p2 (дата обращения: 15.11.2025).



Рисунок 2. Количество топлива необходимого для генерации 1000 МВт*ч электроэнергии

Источник – составлено на основе [10]



Рисунок 3. Выбросы углекислого газа по странам за 2015 и 2024 гг., CO_{2eq}

Источник – составлено на основе [11]

2. Возможность повторного использования топлива. Уран-235 выгорает не полностью и может быть регенерирован (в отличие от золы и шлаков органического топлива) [12].

3. Снижение выбросов парниковых газов [13]. Как можем наблюдать на рисунке 3, многие страны, активно использующие атомную энергию, сокращают количество выбросов CO_2.

4. Стимулирование научно-технического прогресса. Разработка современных реакторов (включая реакторы на быстрых нейтронах) и технологий замкнутого топливного цикла требует проведения фундаментальных и прикладных исследований в области материаловедения, физики, химии и кибернетики [14].

Но у атомной энергетики также есть ряд недостатков [15] [16]:

1. Проблема радиоактивных отходов. Отработанное ядерное топливо сохраняет радиоактивность и представляет опасность в течение длительных сроков.

2. Высокая стоимость строительства. Сооружение типичной АЭС стоит от 6 до 10 млрд долларов. Реализация проектов может длится 6-8 лет, а вывод из эксплуатации и демонтаж объекта часто стоят дороже и занимают более 50 лет.

3. Риск техногенных катастроф. Аварии могут привести к заражению территорий на десятилетия, требуя эвакуации населения и масштабной ликвидации последствий.

Мировой и отечественный опыт применения атомной энергетики

На 2026 год энергию, которая вырабатывается на АЭС, используют по всему миру. По суммарной чистой электрической мощности первое место занимает США, вырабатывая 96,952 МВт. Второе место занимает Франция (63 МВт), третье – Китай (58,056 МВт), а четвертое – Япония (31,679 МВт) [17].

США начали использовать ядерную энергию в мирных целях в 1958 году, запустив первую коммерческую АЭС мощностью 60 МВт в Пенсильвании. Китай приступил к этому позже – в 1991 году с пуском Циньшань-1 , хотя стратегическое решение о развитии программы было принято 15 января 1955 года КПК, а уже в апреле подписано соглашение с СССР о помощи в строительстве экспериментального реактора и циклотрона для исследований.

Этот путь Китая от первых шагов при поддержке СССР к самостоятельному лидерству напрямую связан с положением на рынке атомной энергетики в 2025 году, где он уверенно входит в число мировых лидеров наряду с США.

---

[10] How many pounds of uranium are needed to generated a MWh in a nuclear plant? [Электронный ресурс] // Freeing Energy. – URL: https://www.freeingenergy.com/math/nuclear-fuel-uranium-weight-pound-kwh-mwh-m125/ (дата обращения: 06.12.2025).

[11] GHG emissions of all world countries [Электронный ресурс] // European Commission. – URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025#emissions_table (дата обращения: 06.12.2025).

[12] Росатом: технология замкнутого ядерно-топливного цикла готова к промышленной реализации [Электронный ресурс] // ТАСС. – URL: https://tass.ru/ekonomika/19191153 (дата обращения: 29.12.2025).

[13] Как мир борется с глобальным потеплением с помощью энергии мирного атома [Электронный ресурс] // ЛУЧ. – URL: https://goroda.media/kak-mir-boretsya-s-globalnym-potepleniem-s-pomoschyu-energii-mirnogo-atoma/ (дата обращения: 06.12.2025).

[14] Преимущества атомной энергетики [Электронный ресурс] // Русатом Оверсиз. – URL: https://rusatom-overseas.com/ru/nuclear-energy/benefits-of-nuclear-energy/ (дата обращения: 29.12.2025).

[15] Что такое АЭС: принцип работы, преимущества и недостатки [Электронный ресурс] // РБК. – URL: https://www.rbc.ru/base/28/05/2025/6835e58a9a7947ba339552a2 (дата обращения: 06.12.2025).

16 Аварии и инциденты на атомных электростанциях : учебное пособие / под общ. ред. С. П. Соловьева. – Обнинск : ИАТЭ, 1992. – 300 с. – URL: https://elib.biblioatom.ru/text/avarii-i-intsidenty-na-aes_1992/p1/ (дата обращения: 29.12.2025).

[17] Reactor Database [Электронный ресурс] // World Nuclear Association. – URL: https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary (дата обращения: 15.01.2026).

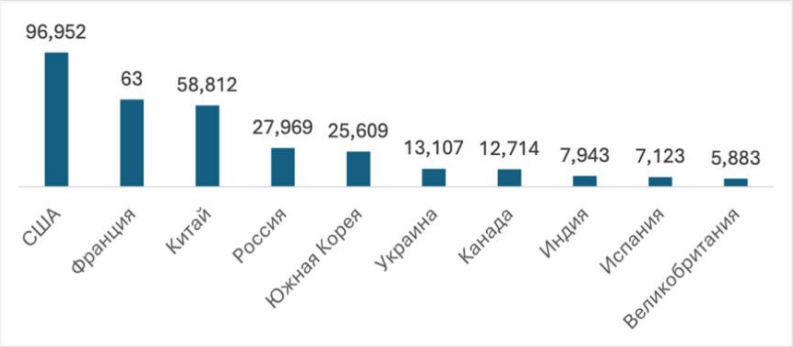


Рисунок 4. Суммарная чистая электрическая мощность по странам на 2026 год, МВт

Источник – составлено на основе [19]

В России, несмотря на катастрофу в Чернобыле и распад СССР, атомная отрасль получила мощный импульс для развития в начале 2000-х годов. Ключевой точкой стало решение Президента России Владимира Путина о создании в 2007 году госкорпорации «Росатом». Это был стратегический ход, позволивший собрать все звенья цепочки – от добычи урана до вывода объектов из эксплуатации [18].

За 7-8 лет (с 2018 года) российская атомная энергетика достигла значительного прогресса в экспорте. Если в середине 2010-х экспортная программа основывалась на реакторах ВВЭР-1000 советской разработки, то в 2026 году основным экспортным продуктом стал ВВЭР-1200 нового поколения, полностью разработанный российскими специалистами.

Параллельно развитию ВВЭР-1200 был совершен прорыв (в 2017 году) в создании атомных технологий малой мощности – реакторная установка РИТМ-200, созданная для новейших ледоколов проекта 22220 (серия «Арктика», «Сибирь», «Урал» и другие). Ее компоновка открыла дорогу не только для ледоколов, но и для плавучих АЭС, а также наземных станций малой мощности. В 2024 году этот успех был подкреплен первым в мире экспортным контрактом на строительство такой АЭС в Узбекистане.

На 2026 год Россия является одной из стран, которая активно возводит новые проекты атомной энергетики в различных странах – Турции, Беларуси, Египте, Индии, Венгрии, Китае и Бангладеш.

Хотя мировая практика демонстрирует высокую надежность атомной энергетики с минимальным числом серьезных инцидентов, анализ последствий аварий на АЭС, таких как Чернобыль и Фукусима, подчеркивает необходимость строгих мер безопасности для будущего развития отрасли.

Анализ гипотетических угроз на Курской АЭС

Объектом исследования была выбрана Курская АЭС, запущенная в эксплуатацию в 1976 году и состоящая из 4 блоков типа РБМК-1000 [20]. Станция является основным энергетическим источником Черноземья, обеспечивая более 50% выработки электроэнергии региона. В числе ключевых потребителей – ведущие предприятия Курской области, такие как горно-обогатительные комбинаты Оскольский и Михайловский в районе Курской магнитной аномалии, а также другие крупные заводы и фабрики региона [21]. Установленная мощность Курской АЭС составляла 4000 МВт (по 1000 МВт на каждый блок).

В период с 1994 по 2009 годы на Курской АЭС была проведена модернизация всех четырех энергоблоков. В рамках модернизации была полностью заменена система контроля и управления реакторной установкой, модернизированы системы аварийного охлаждения реактора, информационного обеспечения и надежного технического водоснабжения. После аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 году был проведен дополнительный анализ устойчивости станции, который подтвердил эффективность выполненных модернизационных работ [22]. Энергоблок №1 и №2 был остановлен 19 декабря 2021 года и 31 января 2024 года соответственно в связи с окончанием их проектного срока службы (45 лет).

В связи с высокой потенциальной опасностью объектов ядерной энергетики особое значение имеет анализ возможных угроз их безопасному функционированию.

Запроектные аварии, связанные с повреждением активной зоны реактора, подразумевают сочетание нескольких неблагоприятных факторов, включая отказ системы охлаждения, потерю теплоносителя и неработоспособность иных элементов системы безопасности (Букринский, 2010).

Второй группой угроз можно назвать внешние воздействия на энергоблок и объекты инфраструктуры станции. К ним относятся природные катастрофы, техногенные аварии соседних объектов и прочие

[18] Эволюция безопасности отечественных АЭС от Чернобыля до наших дней [Электронный ресурс] // Отраслевое издание госкорпорации «Росатом» «Страна Росатом». – URL: https://strana-rosatom.ru/2021/04/26/evoljuciya-bezopasnosti-otechestvennyh/ (дата обращения: 15.01.2026).

[19] In Operation & Suspended Operation [Электронный ресурс] // IAEA Power Reactor Information System (PRIS). – URL: https://pris.iaea.org/pris/worldstatistics/operationalreactorsbycountry.aspx (дата обращения: 09.06.2026).

[20] Люди, годы, киловатты: 45 лет назад заработал первый блок Курской АЭС [Электронный ресурс] // Отраслевое издание госкорпорации «Росатом» «Страна Росатом». – URL: https://strana-rosatom.ru/2021/12/19/ljudi-gody-kilovatty-45-let-nazad-zarabo/ (дата обращения: 15.01.2026).

[21] Росатом намерен в 2026 году ввести Курскую АЭС-2 в промышленную эксплуатацию [Электронный ресурс] // ТАСС. – URL: https://tass.ru/ekonomika/26206939 (дата обращения: 25.01.2026).

[22] Курская АЭС [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-power-plants/kurskaya-aes (дата обращения: 15.01.2026).

чрезвычайные происшествия. Курская АЭС оснащена энергоблоками РБМК-1000, которые не имеют толстой железобетонной оболочки (контейнмента), предназначенной для удержания пара внутри помещения реактора в случае его разгерметизации. Отсутствие такой конструкции повышает уязвимость АЭС к внешним воздействиям [23].

К третьей группе угроз можно отнести повторение уже произошедших, на других АЭС, аварий. Поскольку на Курской АЭС действуют реакторы типа РБМК-100, которые действовали и на Чернобыльском объекте, возникают опасения о возникновении похожего сценария [24]. Следует учитывать, что после трагедии 26 апреля 1986 года, конструкция реактора была существенно модернизирована, а некоторые энергоблоки и вовсе выведены из эксплуатации в связи с окончанием их срока службы. Также не исключают возможность возникновения «station blackout» – полную потерю внешнего электроснабжения станции, как это было на «Фукусима-1».

Структура и программное исполнение модели

Цель моделирования – наглядно воспроизвести распространение радиационного облака после аварии на Курской АЭС в пределах контрольной зоны радиусом 30 км и оценить число затронутых населенных пунктов и населения по зонам 0-15 км и 15-30 км для выбранного сценария.

Модель реализована в программном обеспечении AnyLogic с помощью агент-ориентированного подхода. Ключевые элементы представлены отдельными агентами: станция как источник, облако как носитель загрязнения, населенные пункты как объекты воздействия.

В качестве пространства моделирования используется карта Курчатовского района, где расположена Курская АЭС и прилегающих территорий. На карте отображаются контрольные окружности R15 и R30, соответствующие зонам 0-15 км и 15-30 км от станции.

В ходе исследования была создана блок-схема модели, которая описывает ее работу. Выделим основные этапы работы модели (рис. 5):

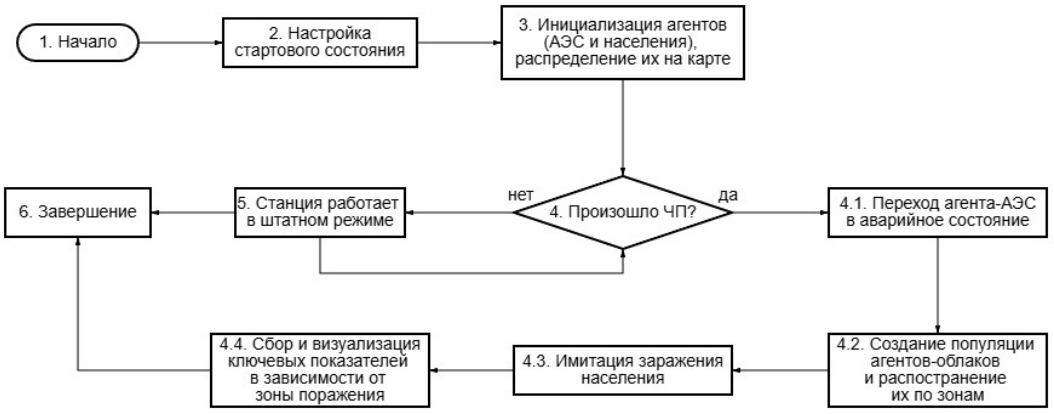


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма работы модели.

Источник – составлено авторами.

На **этапе 3** происходит инициализация агентов и распределение их по карте. **Этап 4** подразумевает два состояния агента-АЭС: штатный (**этап 5**) или аварийный режим (**этап 4.1**). **Этап 4.2** означает создание популяции агентов-облаков, которые впоследствии распространяются по зонам 15 и 30 км с последующей имитацией заражения населения (**этап 4.3**). На **этапе 4.4** происходит сбор и вывод информации на экран.

В рамках модели приняты следующие ограничения и допущения:

- население рассматривается как стационарное (перемещение и эвакуация не учитываются);
- заражение фиксируется по факту попадания пункта в область воздействия облака;
- используется разделение территории на зоны 0-15 км и 15-30 км, а также суммарная зона 0-30 км;
- не учитываются распад изотопов, дозовая нагрузка и время воздействия (модель предназначена для сравнительной оценки сценариев).

Для имитации процесса распространения радиационного облака были созданы несколько типов агентов при помощи программной среды AnyLogic на языке Java. Рассмотрим ключевые элементы модели, взаимодействующие между собой и с окружающим пространством:

1. *Агент Main*. Агент Main является агентом верхнего уровня, где расположены иные объекты и

[23] «Повторение Чернобыльского сценария на Курской АЭС невозможно» [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/6890609 (дата обращения: 16.01.2026).

[24] Авария на Курской АЭС – предвестник нового Чернобыля? [Электронный ресурс] // BELLONA. – URL: https://ru.bellona.org/2010/08/26/avariya-na-kurskoj-aes-predvestnik-n/ (дата обращения: 15.01.2026).

популяции агентов: изображение карты Курчатовского района и прилегающих территорий, зоны поражения 15 и 30 км, популяции агентов-людей, агентов-облаков и другие элементы (рис. 6).

Во время моделирования пользователь выбирает один из выбираемых сценариев (RANDOM, NEGATIVE, POSITIVE), после чего вызывается функция «applyScenario()», которая устанавливает параметры «scenWindSpeed», «scenWindDirIndex», «scenReleasePower», «scenCloudN» и «scenCloudStartRadius».

Воспроизведение чрезвычайного происшествия выполняется через функцию «startAccident()»: агент-станция переходит в аварийный режим и в точке KURSKAES создается популяция clouds. Каждый агент Cloud перемещается по карте в случайном направлении ветра и увеличивает радиус во время движения.

На каждом шаге моделирования выполняется пересчет функции заражения «recalcInfection()»: для всех агента People проверяется попадание в радиус хотя бы одного агента Cloud, после чего обновляются переменные «infected15», «infected30», «infectedAll» и переменные зараженного населения «infectedPeople15», «infectedPeople30», «infectedPeopleAll». По завершении прогона итоговые значения фиксируются в «totalRandom», «totalNegative» и «totalPositive» после чего сохраняются в соответствующих переменных для дальнейшей визуализации.

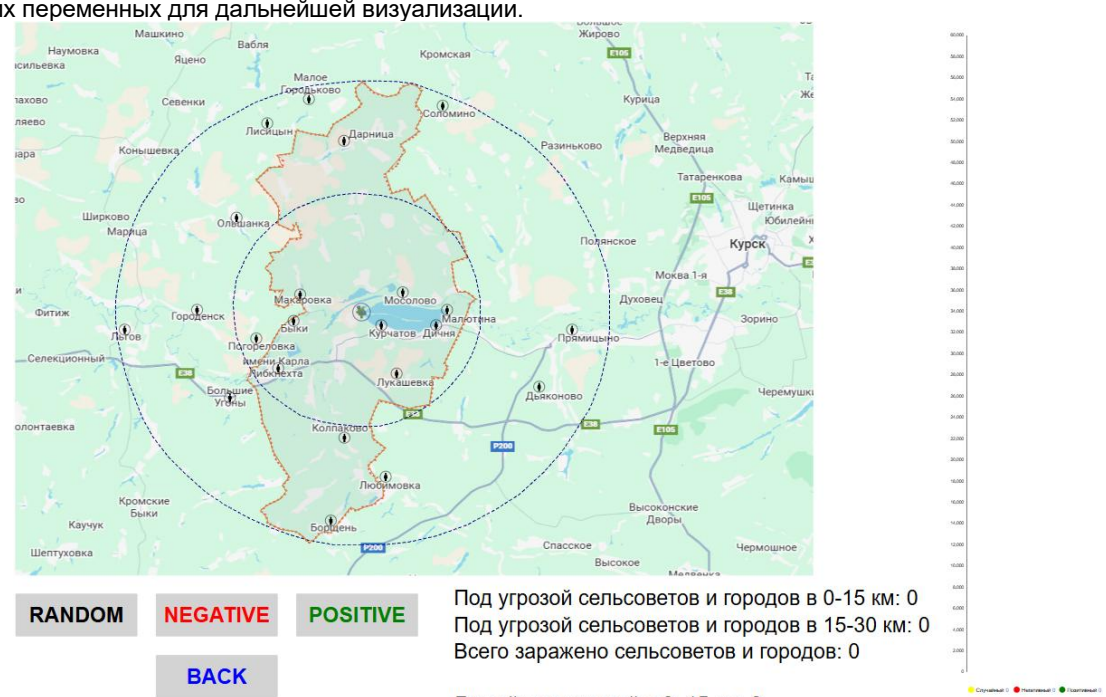


Рисунок 6. Рабочее окно агента Main

Источник – составлено авторами.

2. *Агент KURSKAES* задает положение станции на карте и служит опорной точкой для расчетов расстояний до облаков и отнесения населенных пунктов к зонам R15 и R30. Во время запуска модели на уровне агента-станции параметр «parameter» становится равен 1 и совершается переход от состояния NORMAL к EMERGENCY (рис. 7).

3. Агент Cloud (популяция clouds) моделирует радиационное облако как движущийся источник воздействия с радиусом. Популяция clouds создается в точке KURSKAES при запуске аварийного сценария.

На каждом шаге моделирования выполняется перемещение облака, скорость которого задается переменной «scenWindSpeed», а направление – «scenWindDirIndex» с шагом 45 градусов. Вместе с этим рассчитываются проекции скорости и обновляются координаты «setXY(getX() + vx, getY() + vy». Радиус воздействия хранится в переменной «radius (double)» и может изменяться во времени, что описывает расширение и рассеивание облака.

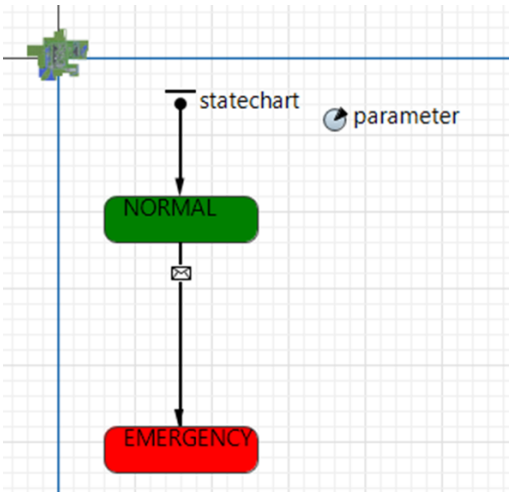


Рисунок 7. Структура агента KURSRAES

Источник – составлено авторами.

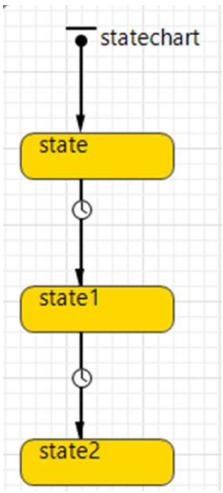


Рисунок 8. Диаграмма состояния агента *Cloud*

Источник – составлено авторами

Диаграмма состояний (рис. 8) задает последовательность фаз поведения облака: создание и начальная инициализация, перенос облака ветром, а также изменение радиуса воздействия. Переходы между состояниями выполняются по таймаутам, что позволяет моделировать движение облака во времени.

4. Агент People представляет собой населенные пункты и сельсоветы на карте и хранит данные, необходимые для расчета заражения и формирования статистики (таблица 1).

Таблица 1. Численность населения городов и сельских поселений в Курчатовском районе

Наименование	Численность населения
г Курчатов	38543
г Льгов	16554
Соломин	упразднено
ПТ Прямицыно	5145
Сельское поселение Костельцевский сельсовет	599
Сельское поселение Малогородковский сельсовет	436
Сельское поселение Иванчиковский сельсовет	955
Сельское поселение Городенский сельсовет	1193
Сельское поселение Макаровский сельсовет	870
Сельское поселение Чаплинский сельсовет	993
Сельское поселение Большеугонский сельсовет	1959
Сельское поселение Дичнянский сельсовет	2811
Сельское поселение Катыринский сельсовет	1652
Сельское поселение Колпаковский сельсовет	735
Сельское поселение Любимовский сельсовет	1672
Сельское поселение Волоконский сельсовет	1022
Сельское поселение Дьяконовский сельсовет	4945

Источник – составлено авторами на основе [25]

Симуляция в модели завершается при условии, когда агент Cloud достигает конечной точки своего пути или когда пользователь нажимает кнопку «BACK».

Результаты моделирования

Для сравнительной оценки последствий чрезвычайного происшествия реализованы три сценария: RANDOM, NEGATIVE и POSITIVE. Каждый сценарий задает набор параметров выброса, после чего моделирование выполняется до завершения симуляции.

Результаты фиксируются по двум показателям: число зараженных населенных пунктов (н. п.) и сельсоветов, а также число зараженного населения в зоне 0-15 км, 15-30 км и суммарно в пределах 0-30 км.

При моделировании любого из сценариев на информационном табло появляется информация о количестве н. п. и сельсоветов, а также людей, которые находятся под угрозой. На график (рис. 9) выводится визуализация численности населения, находящиеся в опасной ситуации.

[25] Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2025 года [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – URL: https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Chisl_MO_01-01-2025.xlsx (дата обращения: 16.01.2026).

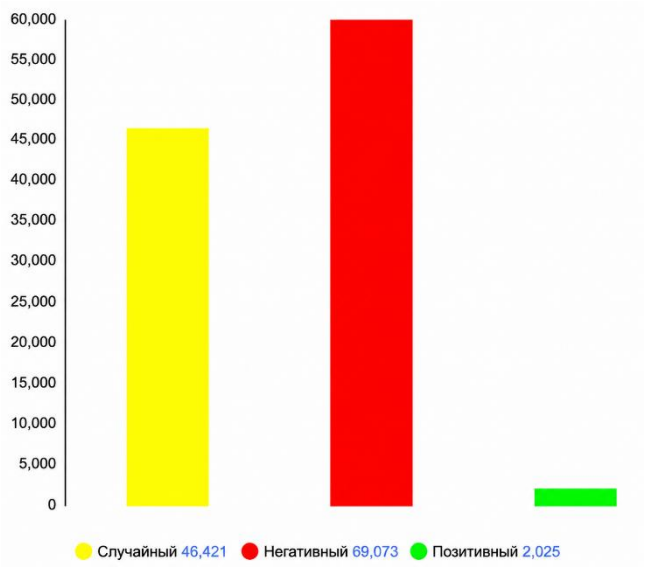


Рисунок 8. Диаграмма состояния агента Cloud

Источник – составлено авторами

Негативный (NEGATIV) сценарий предполагает выход из рабочего состояния реактора РБМК-1000 из-за высокой нагрузки, вследствие чего происходит сбой в системе управления и системе охлаждения реактора.

Позитивный (POSITIVE) сценарий подразумевает, что возникшее чрезвычайное происшествие вызвано человеческим фактором, но находится под контролем. Системы охлаждения и управления реакторами стабилизируют возможную утечку радиации и снижают ее распространение.

Сценарий RANDOM представляет непредсказуемое развитие событий и во время сценарных экспериментов может показывать значения как выше негативного сценария, так и ниже позитивного. Эта особенность делает его полезным в отработке мер по ликвидации возможных чрезвычайных происшествий, предлагая вариативность предположительных угроз. Сводные результаты сценарных экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сводные результаты по трем сценариям

Сценарий	Пункты 0-15	Пункты 15-30	Пункты 0-30	Люди 0 -15	Люди 15 -30	Люди 0 - 30
RANDOM	9	1	10	45466	955	46421
NEGATIVE	8	5	13	45466	23607	69073
POSITIVE	3	0	3	2025	0	2025

Источник – составлено авторами.

Дальнейшее улучшение модели связано с внедрением более детализированных погодных условий, добавлением новых возможных неисправностей в системе обслуживания Курской АЭС, а также добавление процессов эвакуации и перемещения населения.

Заключение

В рамках проведенного междисциплинарного исследования учеников экономического и инженерного направлений «Школы на проспекте Вернадского» при кураторстве молодых ученых ЦЭМИ РАН были проанализированы мировые тенденции развития ядерной энергетики. К 2025 году отрасль достигла нового исторического максимума: выработка электроэнергии на атомных станциях устойчиво растет, и ведущие позиции по суммарной чистой электрической мощности уверенно удерживают США, Франция, Китай и Россия. Однако использование «мирного» атома представляет собой баланс между преимуществами и серьезными рисками. С одной стороны, это малый объем топлива, низкие выбросы CO_2 и возможность регенерации урана, а с другой – проблема радиоактивных отходов, высокая стоимость строительства и сохраняющаяся угроза техногенных катастроф, о чем свидетельствуют трагедии в Чернобыле и Фукусиме. Применительно к Курской АЭС, рассмотрение ее устройства позволило выделить три ключевые группы угроз: запроектные повреждения активной зоны, внешние воздействия (отсутствие защитной оболочки делает станцию более уязвимой), а также возможность повторения уже случившихся сценариев, вплоть до полного обесточивания станции.

На основе проведенного анализа был разработан прототип агент-ориентированной имитационной модели распространения радиоактивного загрязнения при гипотетической аварии на Курской АЭС. Модель, реализованная в программном обеспечении AnyLogic, позволяет в наглядной форме оценить пространственные масштабы заражения в 30-километровой зоне, а также количество попадающих под воздействие населенных пунктов и численность населения для трех сценариев (позитивный, случайный, негативный).

Вычислительные эксперименты показали, что даже при управляемом аварийном выбросе (позитивный сценарий) возможно заражение трех ближайших населенных пунктов с общим числом жителей около 2 тыс. человек. При тяжелой запроектной аварии (негативный сценарий) зона поражения расширяется до 15-30 км, охватывая до 13 населенных пунктов, а число потенциально пострадавших достигает 69 тыс. человек. Сценарий со случайными параметрами (RANDOM) демонстрирует широкий диапазон последствий, что подчеркивает важность учета неопределенности при планировании мер защиты.

Полученные результаты подтверждают, что даже после модернизации реакторы РБМК-1000 сохраняют уязвимости, и любое чрезвычайное происшествие на Курской АЭС может привести к серьезным

последствиям для населения Черноземья. Разработанная модель может использоваться органами гражданской обороны, эксплуатирующей организацией (Концерн Росэнергоатом) и учебными заведениями для отработки сценариев реагирования, оптимизации планов эвакуации и повышения готовности к радиационным авариям.

Дальнейшее совершенствование модели предполагает учет реальных розы ветров, рельефа местности, процессов эвакуации, а также интеграцию с подсистемой расчета индивидуальных доз облучения. Расширение базы сценариев (включая отказ систем аварийного охлаждения, потерю внешнего энергоснабжения) позволит повысить достоверность прогнозов и выработать более эффективные меры по снижению рисков.

Дополнительная информация

Статья подготовлена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема «Программно-аналитические комплексы для повышения эффективности принимаемых управленческих решений в Российской Федерации» № FMGF-2025-0001, № ЕГИСУ НИОКТР 125031003392-3

Список литературы:

1. Атомные электростанции России [Электронный ресурс] // АО «Концерн Росэнергоатом». – URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/ (дата обращения: 25.09.2025).
2. Букринский, А. М. Управление запроектными авариями в действующих нормативных документах России / А. М. Букринский // Ядерная и радиационная безопасность. – 2010. – № 1(55). – С. 16-24. – EDN GPSHUD.
3. Генплан действий: утверждена схема размещения объектов электроэнергетики в РФ [Электронный ресурс] // Отраслевое издание госкорпорации «Росатом» «Страна Росатом». – URL: https://strana-rosatom.ru/2025/01/13/genplan-dejstvij-utverzhdena-shema-ra/ (дата обращения: 08.11.2025).
4. Китайский атомный путь: что успела страна за 70 лет [Электронный ресурс] // Отраслевое издание госкорпорации «Росатом» «Страна Росатом». – URL: https://strana-rosatom.ru/2025/12/25/kitajskij-atomnyj-put-chto-uspela-str/ (дата обращения: 15.01.2026).
5. Курчатов Игорь Васильевич [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: https://www.biblioatom.ru/persons/kurchatov_igor_vasilevich/ (дата обращения: 16.10.2025).
6. Обнинская АЭС [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-power-plants/obninskaya-aes/ (дата обращения: 16.10.2025).
7. Первый энергоблок ВВЭР-1200 АЭС «Аккую» в Турции готов на 95% и начнет работу в 2026 году [Электронный ресурс] // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». – URL: https://www.atomic-energy.ru/news/2026/01/16/162609 (дата обращения: 16.01.2026).
8. РИТМ-200 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-reactors/ritm-200/ (дата обращения: 15.01.2026).

References in Cyrillics

1. Atomnye elektrostancii Rossii [Elektronnyj resurs] // AO «Koncern Rosenergoatom». – URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/ (data obrashcheniya: 25.09.2025).
2. Bukrinskij, A. M. Upravlenie zaproektnymi avariyami v dejstvuyushchih normativnyh dokumentah Rossii / A. M. Bukrinskij // YAdernaya i radiacionnaya bezopasnost'. – 2010. – № 1(55). – S. 16-24. – EDN GPSHUD.
3. Genplan dejstvij: utverzhdena skhema razmeshcheniya ob"ektov elektroenergetiki v RF [Elektronnyj resurs] // Otraslevoe izdanie goskorporacii «Rosatom» «Strana Rosatom». – URL: https://strana-rosatom.ru/2025/01/13/genplan-dejstvij-utverzhdena-shema-ra/ (data obrashcheniya: 08.11.2025).
4. Kitajskij atomnyj put': chto uspela strana za 70 let [Elektronnyj resurs] // Otraslevoe izdanie goskorporacii «Rosatom» «Strana Rosatom». – URL: https://strana-rosatom.ru/2025/12/25/kitajskij-atomnyj-put-chto-uspela-str/ (data obrashcheniya: 15.01.2026).
5. Kurchatov Igor' Vasil'evich [Elektronnyj resurs] // Gosudarstvennaya korporaciya po atomnoj energii «Rosatom». – URL: https://www.biblioatom.ru/persons/kurchatov_igor_vasilevich/ (data obrashcheniya: 16.10.2025).
6. Obninskaya AES [Elektronnyj resurs] // Gosudarstvennaya korporaciya po atomnoj energii «Rosatom». – URL: https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-power-plants/obninskaya-aes/ (data obra-shcheniya: 16.10.2025).
7. Pervyj energoblok VVER-1200 AES «Akkuyu» v Turcii gotov na 95% i nachnet rabotu v 2026 godu [Elektronnyj resurs] // Nauchno-delovoj portal «Atomnaya energiya 2.0». – URL: https://www.atomic-energy.ru/news/2026/01/16/162609 (data obrashcheniya: 16.01.2026).

8. RITM-200 [Elektronnyj resurs] // Gosudarstvennaya korporaciya po atomnoj energii «Rosatom». – URL: https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-reactors/ritm-200/ (data obrashcheniya: 15.01.2026).

Ключевые слова
Атомная энергетика, Курская АЭС, имитационное моделирование, агент-ориентированное моделирование, радиационная безопасность, AnyLogic, РБМК-1000.

Черненко Дмитрий Витальевич – младший научный сотрудник, ЦЭМИ РАН
melon20042@gmail.com
ORCID 0009-0008-4944-9876

Бартновский Никита Алексеевич - старший лаборант, ЦЭМИ РАН,
nbartnovskii@gaugn.ru

Зорин Матвей Юрьевич – ученик 10 класса, ГБОУ г. Москвы «Школа на проспекте Вернадского»
matveyzorin86@gmail.com

Парагульгов Саид Муслимович – ученик 10 класса, ГБОУ г. Москвы «Школа на проспекте Вернадского»
saidparag21@gmail.com

Dmitry Chernenko, Matvey Zorin, Said Paragulgov. Prototype of an agent-based model of the Kursk nuclear power plant with simulation of possible emergencies during its operation

Keywords
Nuclear power, Kursk NPP, simulation modeling, agent-based modeling, radiation safety, AnyLogic, RBMK-1000.
DOI: 10.34706/DE-2026-05-08
JEL: L86

Abstract
This article examines current trends in the development of global and Russian nuclear energy, analyzing the advantages and disadvantages of nuclear energy, as well as domestic and international experience in operating nuclear power plants. The Kursk Nuclear Power Plant (NPP) was chosen as the object of study, for which an analysis of potential threats to safe operation was conducted, including beyond-design-basis accidents, external impacts, and scenarios similar to the largest accidents in the history of nuclear energy. Based on this analysis, a prototype agent-based simulation model for the spread of radioactive contamination within a 30-kilometer zone around the plant was developed, implemented in the AnyLogic software environment. The model allows for the simulation of various emergency scenarios and the assessment of the scale of their consequences for the population and the surrounding area. Computational experiments were conducted that included positive, random, and negative scenarios for the development of an emergency. Modeling results showed that, under a negative scenario, up to 13 settlements with a total population of over 69,000 people could be in the zone of potential radioactive contamination, while under a positive scenario, only three settlements with a population of approximately 2,000 people are at risk. These results can be used in planning radiation safety measures, preparing evacuation plans, and improving emergency response systems at nuclear power facilities.