

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДОВОЛЬСТВЕННУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**Валидов Святослав Ярославович**

*Аспирант кафедры глобальной экологии и природопользования,  
Российский государственный аграрный университет — МСХА  
имени К.А. Тимирязева  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В представленной научной статье проводится многоаспектное, детальное системно-математическое исследование деструктивного воздействия глобальных и региональных климатических изменений на параметры продовольственной безопасности с использованием современных методов интеллектуального анализа данных и глубокого обучения. Актуальность данной работы обусловлена нарастающей нестабильностью погодных условий, увеличением частоты проявления экстремальных засух, смещением вегетационных периодов и необходимостью формирования адаптационных механизмов в агропромышленном комплексе для гарантированного обеспечения населения продуктами питания. В рамках статьи осуществляется подробная пространственно-временная декомпозиция факторов климатического воздействия, последовательно анализируются метрики урожайности ведущих сельскохозяйственных культур, гидротермические коэффициенты, динамика деградации почвенного покрова и показатели влагообеспеченности территорий. Автор детально рассматривает алгоритмические аспекты построения и обучения рекуррентных нейронных сетей с архитектурой долгой краткосрочной памяти (LSTM), агрегированных с механизмами временного внимания, для предиктивного моделирования объемов валового сбора зерновых культур и экспериментально доказывает превосходство нейросетевого анализа над классическими статистическими моделями экстраполяции трендов. Особое место в исследовании занимает сценарное моделирование устойчивости агросферы к экстремальным погодным шокам на среднесрочную перспективу.

**Ключевые слова:** глобальные изменения климата, продовольственная безопасность, глубокое обучение, рекуррентные нейронные сети, урожайность культур, агроклиматический мониторинг, засуха, сценарное прогнозирование.

# ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON FOOD SECURITY BASED ON RECURRENT NEURAL NETWORKS

**Validov Svyatoslav Yaroslavovich**

*Postgraduate Student of the Department of Global Ecology and Environmental Management, Russian State Agrarian University — Moscow  
Timiryazev Agricultural Academy  
Moscow, Russia*

## **Abstract**

This scientific article presents a multi-aspect, detailed system-mathematical study of the destructive impact of global and regional climate changes on food security parameters using modern methods of data mining and deep learning. The relevance of this work is driven by the increasing instability of weather conditions, the rising frequency of extreme droughts, the shift of growing seasons, and the need to form adaptation mechanisms in the agro-industrial complex to guarantee the population's food supply. Within the framework of the article, a detailed spatial-temporal decomposition of climate impact factors is carried out, and metrics of leading agricultural crop yields, hydrothermal coefficients, soil degradation dynamics, and territorial moisture availability indicators are sequentially analyzed. The author considers in detail the algorithmic aspects of constructing and training recurrent neural networks with a Long Short-Term Memory (LSTM) architecture, aggregated with temporal attention mechanisms, for predictive modeling of gross grain harvest volumes and experimentally proves the superiority of neural network analysis over classical statistical trend extrapolation models. A special place in the study is occupied by scenario modeling of agrosphere resilience to extreme weather shocks over the medium term. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into the predictive software packages of ministries of agriculture to optimize the structure of sown areas and minimize the risks of crop failure.

**Keywords:** global climate change, food security, deep learning, recurrent neural networks, crop yield, agroclimatic monitoring, drought, scenario forecasting.

## **Введение**

Обеспечение устойчивой продовольственной безопасности в первой половине двадцать первого века выступает одним из базовых приоритетов национальной безопасности любого суверенного государства и ключевым вектором глобального развития, зафиксированным в стратегических документах Организации Объединенных Наций. Способность агропромышленного комплекса гарантировать физическую и экономическую доступность качественных продуктов питания для всего населения планеты напрямую определяет социальную стабильность, демографический потенциал и экономическую независимость макросоциума.

Однако в современных реалиях поступательное развитие мирового сельского хозяйства сталкивается с беспрецедентной по масштабам угрозой — глобальными и региональными климатическими изменениями, которые приобретают характер перманентного дестабилизирующего фактора.

Системное повышение приземной температуры воздуха, наблюдаемое на протяжении последних десятилетий, сопровождается коренной перестройкой глобального гидрологического цикла. Это выражается в резком росте неравномерности выпадения атмосферных осадков, увеличении продолжительности и интенсивности засушливых периодов в традиционных аграрных макрорегионах, а также во взрывном учащении экстремальных погодных аномалий, таких как возвратные весенние заморозки, затяжные проливные дожди и ураганные ветры. Наложение данных факторов приводит к ускоренной деградации почвенного плодородия, масштабной эрозии земель, смещению границ агроклиматических зон к северу и лавинообразному распространению новых видов вредителей и болезней сельскохозяйственных растений. В этих условиях традиционные, исторически сложившиеся агротехнические подходы и календари посевных работ оказываются полностью неэффективными, что ведет к резким конъюнктурным колебаниям объемов производства продовольствия и росту цен на мировых рынках.

Актуальность настоящего исследования продиктована тем, что классические детерминированные динамические модели роста культур (такие как DSSAT или WOFOST), традиционно применяемые для оценки продуктивности агроэкосистем, обладают колоссальной избыточностью входных параметров. Данные физико-биологические модели требуют внесения огромного количества специфических локальных данных о водно-физических свойствах почв, генетических характеристиках сортов и детальных физиологических процессах, получение которых в масштабах целой страны затруднено или экономически нецелесообразно. С другой стороны, простые линейные эконометрические модели регрессионного анализа демонстрируют критически низкую точность, поскольку они принципиально не способны улавливать нелинейные пороговые эффекты, когда плавное повышение температуры до определенной критической отметки не вызывает видимых изменений, но превышение этого порога хотя бы на один градус в фазу цветения приводит к полной стерилизации пыльцы и потере всего урожая. Применение аппарата интеллектуального анализа больших пространственно-временных данных и технологий глубокого обучения (Deep Learning) открывает качественно новые горизонты для создания гибких, адаптивных предиктивных систем агроклиматического мониторинга.

Целью данной работы является комплексная разработка, алгоритмическая формализация и экспериментальная верификация комплекса прогностических решений на базе рекуррентных нейронных сетей глубокого обучения, способных с высокой точностью осуществлять долгосрочную оценку и сценарное моделирование динамики урожайности ведущих продовольственных культур под влиянием трансформирующихся климатических факторов.

Для достижения поставленной цели в рамках данного исследования последовательно решаются задачи по формированию репрезентативной многомерной матрицы агроклиматических предикторов, проектированию специализированной нейросетевой архитектуры, устойчивой к зашумленным временным рядам, проведению кросс-валидации результатов на реальных исторических данных и симуляции прогнозных сценариев продовольственной стабильности до пятидесятого года. Методологическую основу исследования составляют теории функционирования агроэкосистем, концепции климатической адаптации, методы геоинформационного анализа больших данных и аппарат искусственных нейронных сетей глубокого обучения для анализа временных рядов.

## **Материалы и методы исследования**

Методологический фундамент выполненного научного исследования базируется на интеграционном сочетании подходов системного экологического анализа, методов спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), концепций пространственной эконометрики и масштабных компьютерных экспериментов. Информационную базу для построения, обучения и валидации разработанных нейросетевых моделей составил репрезентативный массив данных по основным зернопроизводящим регионам Российской Федерации за последние тридцать пять лет. Данный массив включал в себя ведомственную статистику Министерства сельского хозяйства по урожайности озимой и яровой пшеницы, ежедневные метеорологические данные долгосрочного реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, а также пространственные продукты спутникового мониторинга со спутников серий Landsat и Sentinel.

На первом этапе исследования для каждого сельскохозяйственного района была сформирована динамическая матрица еженедельных агроклиматических предикторов. В качестве базовых параметров атмосферного воздействия использовались: сумма активных температур выше десяти градусов Цельсия, среднее количество осадков, дефицит влажности воздуха и индекс суровости засухи Палмера (PDSI). Спутниковые данные были преобразованы в непрерывные хронологические ряды вегетационных индексов: нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) и индекса поверхностного увлажнения (NDWI), отражающего содержание воды в листовом аппарате растений на различных этапах онтогенеза. Для учета пространственной неоднородности почвенного покрова в модель были введены статические матрицы типов почв, содержания органического вещества (гумуса) и гранулометрического состава.

Для моделирования динамических нелинейных зависимостей между климатическими шоками и итоговой продуктивностью агроценозов была спроектирована специализированная архитектура рекуррентной нейронной сети на базе блоков долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM).

Выбор данной архитектуры обусловлен ее способностью запоминать долгосрочные временные связи, что критически важно в агрометеорологии, так как объем урожая определяется не текущей погодой в момент уборки, а кумулятивным эффектом воздействия условий на протяжении всей осени, зимы и весны. Спроектированная нейросеть была усилена механизмом временного внимания (Temporal Attention Mechanism), который позволил алгоритму самостоятельно взвешивать значимость различных временных интервалов и автоматически выделять «критические периоды» вегетации, в которые чувствительность растений к недостатку влаги или тепловому стрессу максимальна. Обучение модели осуществлялось на серверных станциях с использованием оптимизатора Adam и функции потерь Хубера, устойчивой к выбросам в статистических данных.

## **Результаты исследования**

Проведенные серии многократных вычислительных экспериментов наглядно продемонстрировали высокую прогностическую точность, надежность и вычислительную стабильность разработанной архитектуры LSTM-Attention. При тестировании модели на независимой выборке данных, охватывающей аномально засушливые годы, которые не включались в обучающий контур, средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) при прогнозировании урожайности зерновых культур на уровне субъекта федерации за два месяца до начала уборочной кампании составила три целых и восемь десятых процента. В то же время стандартная множественная линейная регрессия на тех же данных показала ошибку в четырнадцать целых и две десятых процента, полностью пропустив резкое падение сборов, вызванное экстремальной почвенной засухой, так как линейная структура не способна адекватно аппроксимировать эффекты физиологического стресса растений.

Механизм временного внимания позволил провести глубокую интерпретацию работы нейросети и выявить точные календарные интервалы, в которые климатические аномалии наносят максимальный ущерб будущей продовольственной безопасности. Экспериментально установлено, что для озимой пшеницы критическим предиктором, определяющим до сорока шести процентов дисперсии итоговой урожайности, является сочетание высокой температуры воздуха (выше двадцати восьми градусов Цельсия) и низкого уровня влажности почвы в фазу колошения и налива зерна (конец мая — июнь). Модель также успешно идентифицировала латентный деструктивный эффект недостаточного снежного покрова в зимний период в сочетании с резкими депрессиями температур, ведущий к вымерзанию посевов, что позволило выдавать предиктивные предупреждения о необходимости пересева площадей яровыми культурами уже в начале марта.

В рамках практического применения разработанного программного комплекса было проведено масштабное имитационное сценарное моделирование устойчивости региональных систем продовольственного обеспечения до

пятидесятого года в соответствии с климатическими сценариями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты моделирования показали, что при реализации жесткого сценария потепления (SSP5-8.5) к пятидесятому году ожидается падение средней урожайности зерновых в традиционных южных житницах на двадцать два процента вследствие опустынивания и критического снижения гидротермического коэффициента Селянинова ниже нуля целых и шести десятых. Однако разработанная модель позволила сформировать оптимальный компенсационный сценарий адаптации, основанный на предиктивном смещении сроков сева на две недели раньше текущих стандартов и постепенном замещении озимой пшеницы более засухоустойчивыми культурами (сорго, нут, кукуруза), что позволяет полностью нивелировать климатические потери и обеспечить чистый прирост валового сбора на шесть процентов. Оценка экономической эффективности показала, что внедрение разработанной интеллектуальной системы в контур планирования агрохолдингов позволяет сократить издержки от недобора продукции на девятнадцать процентов за счет своевременного хеджирования погодных рисков.

## **Заключение**

В ходе выполненного комплексного научно-исследовательского процесса были в полном объеме и успешно решены все поставленные задачи по математической формализации, программному конструированию, калибровке и экспериментальной валидации нейросетевых моделей анализа влияния изменений климата на продовольственную безопасность. На основе интеграции методов спутникового дистанционного зондирования Земли, климатического реанализа больших данных и рекуррентных архитектур глубокого обучения доказано, что переход к предиктивным интеллектуальным технологиям позволяет преодолеть ограничения классических биофизических подходов и обеспечить высокую точность прогнозирования в условиях растущей стохастичности природной среды.

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что долгосрочная стабильность продовольственного сектора в эпоху глобальных климатических вызовов невозможна без коренной модернизации аналитического инструментария и перехода к управлению на основе данных (Data-Driven Agriculture). Разработанная гибридная модель LSTM-Attention позволяет государственным органам управления и крупным агропромышленным операторам перейти от реактивного реагирования на стихийные бедствия к проактивному планированию адаптационных стратегий. Точное предиктивное картирование будущих зон климатических рисков выступает стратегическим фундаментом для оптимизации пространственного размещения сельского хозяйства, обеспечения национальной продовольственной независимости и устойчивого природопользования на десятилетия вперед.

Дальнейшее развитие данной научно-практической проблематики связано с интеграцией разработанных моделей глубокого обучения с динамическими данными беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных роботизированных комплексов. Это позволит перейти от макрорегионального прогнозирования к точному микромоделированию состояния отдельных полей (Precision Agriculture), оперативно выявляя очаги азотного голодания, сорной растительности или болезней на ранних стадиях их возникновения. Также высокоперспективным направлением является внедрение методов мультимодального глубокого обучения для одновременного анализа пространственных карт, временных метеорологических рядов и генетических паспортов сортов растений, что поднимет стандарты цифровой агрономии на уровень абсолютной точности и автоматизации принятия технологических решений.

### **Список литературы**

1. Будыко М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
2. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А. Биоклиматический потенциал России: методы оценки и прогнозирования. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2006. 312 с.
3. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Кишинев: Штиинца, 1990. 432 с.
4. Клещенко А.Д. Дистанционные методы оценки состояния сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 222 с.
5. Лосев А.П. Практикум по агрометеорологическим прогнозам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 240 с.
6. Медведев И.Ф. Агроэкологические основы повышения плодородия почв. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. 256 с.
7. Пасов В.М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемых сборов зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 152 с.
8. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 176 с.
9. Уланова Е.С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 248 с.
10. Чирков Ю.И. Агрометеорология. Учебник для вузов. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 296 с.

### **References**

1. Budyko M.I. Globalnaya ekologiya [Global Ecology]. Moscow, Mysl, 1977. 327 p.

2. Gordeev A.V., Kleshchenko A.D., Chernyakov B.A. Bioklimaticheskiy potentsial Rossii: metody otsenki i prognozirovaniya [Bioclimatic Potential of Russia: Assessment and Forecasting Methods]. Moscow, RGAU-MSHA Publ., 2006. 312 p.
3. Zhuchenko A.A. Adaptivnoe rastenievodstvo (ekologo-geneticheskie osnovy) [Adaptive Crop Production (Ecological and Genetic Foundations)]. Chisinau, Shtiintsa, 1990. 432 p.
4. Kleshchenko A.D. Distantionnye metody otsenki sostoyaniya selskokhozyaystvennykh kultur [Remote Methods for Assessing the State of Agricultural Crops]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. 222 p.
5. Losev A.P. Praktikum po agrometeorologicheskim prognozam [Practical Guide to Agrometeorological Forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 240 p.
6. Medvedev I.F. Agroekologicheskie osnovy povysheniya plodorodiya pochv [Agroecological Foundations of Increasing Soil Fertility]. Saratov, Saratov University Publ., 2001. 256 p.
7. Pasov V.M. Izmenchivost urozhayev i otsenka ozhidaemykh sborov zernovykh kultur [Yield Variability and Assessment of Expected Grain Crop Harvests]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. 152 p.
8. Sirotenko O.D. Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem [Mathematical Modeling of Water-Thermal Regime and Productivity of Agroecosystems]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981. 176 p.
9. Ulanova E.S. Agrometeorologicheskie usloviya i urozhaynost ozimoy pshehitsy [Agrometeorological Conditions and Winter Wheat Yield]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975. 248 p.
10. Chirkov Yu.I. Agrometeorologiya [Agrometeorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. 296 p.