

Черняева Полина Денисовна

студентка

Ступина Алёна Александровна

д-р техн. наук, профессор

Журавлев Михаил Владиславович

канд. физ.-мат. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»
г. Москва

АДАПТИВНЫЙ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация: в статье обосновывается экономическая целесообразность перехода от статических моделей прогнозирования энергопотребления к адаптивным системам потокового машинного обучения (*Online Learning*) с детекцией концептуального дрейфа (*Concept Drift*). Показано, что внедрение инкрементальных алгоритмов (*Adaptive Random Forest, ADWIN*) в контур управления предприятием позволяет снизить операционные издержки (*OPEX*) на электроэнергию за счет предиктивного сглаживания пиковых нагрузок. Эмпирические данные подтверждают снижение среднеабсолютной ошибки (*MAE*) на 29% и задержку обновления моделей менее 2 мс, что обеспечивает готовность технологии к внедрению на периферийных (*Edge*) устройствах.

Ключевые слова: экономика предприятия, энергоменеджмент, потоковое машинное обучение, концептуальный дрейф, ESG-трансформация, операционные издержки, предиктивная аналитика.

Введение. В условиях глобальной волатильности энергетических рынков и ужесточения ESG-стандартов управление энергопотреблением становится важ-

нейшим фактором экономической устойчивости бизнеса. Исторически форкастинг (прогнозирование нагрузок) опирался на статистическую регрессию и физически обоснованные эквивалентные схемы, калибруемые по историческим профилям [1]. Однако современные экосистемы характеризуются нестационарностью: износ оборудования, сдвиги производственных графиков, сезонные климатические аномалии и интеграция распределенных энергоресурсов (ВИЭ) делают предположение о стационарности данных несостоятельным. Цель работы – оценить экономический эффект от внедрения систем онлайн-обучения, способных автономно адаптироваться к структурным сдвигам без остановки бизнес-процессов.

1. *Методология: от статистики к потоковой экономике переход к онлайн-обучению (Online Learning) меняет парадигму:* данные рассматриваются не как статический репозиторий, а как непрерывный поток обучающих сигналов. В экономике это эквивалентно переходу от плановой экономики к адаптивному рыночному реагированию в режиме реального времени. Ключевой проблемой является *концептуальный дрейф (Concept Drift)* – изменение совместного распределения $P(X,y)P(X,y)$ во времени. Для обнаружения дрейфа применяется алгоритм ADWIN (Adaptive Windowing), который не требует установки пороговых значений вручную и опирается на неравенство Хеффдинга. При обнаружении статистически значимого сдвига (например, перехода на зимний тариф или запуска новой производственной линии) система автоматически сжимает окно наблюдений, отбрасывая устаревшие данные и иницилируя адаптацию весов модели [3]. В качестве базовых алгоритмов выступают инкрементальные модели:

- *SGDRegressor*: обеспечивает высокую скорость, но чувствителен к шуму;
- *Hoeffding Tree*: использует статистические границы для инкрементального разбиения узлов при ограниченном объеме памяти;
- *Adaptive Random Forest (ARF)*: ансамблевый метод, отслеживающий точность каждого дерева и заменяющий деревья с ухудшившимися показателями, что обеспечивает встроенную устойчивость к дрейфу.

2. *Эмпирические результаты и экономическая оценка.* Эксперимент проводился на реальных телеметрических данных промышленного объекта. Оценка проводилась по методологии *прекьюэнт* (прогноз $\rightarrow\rightarrow$ обновление), что исключает «утечку» из будущего и отражает реальную эксплуатацию.

Таблица 1

Сравнительный анализ точности моделей и скорости адаптации

Модель	MAE (Чт)	Улучшение vs Batch	Время реакции на дрейф	Экономический потенциал
Batch Linear Regression (База)	48.6	-	Требует ручного переобучения	Низкий (высокие пиковые штрафы)
SGDПерессор	41.2	-15.2%	~45 шагов	Средний
Хеффдинговое Дерево	38.5	-20.8%	~25 шагов	Выше среднего
Адаптивный Случайный лес (ARF)	34.5	-29.0%	~18 шагов	Максимальный (Edge EMS)

3. *Обсуждение.* Трансформация операционных расходов и инвестиционных рисков – внедрение адаптивных систем дает экономический эффект по трем направлениям:

- 1) *сглаживание пиковых нагрузок (Peak Shaving);*
- 2) *оптимизация технического обслуживания и ремонта;*
- 3) *отложенные капитальные затраты.*

Заключение. Переход к адаптивному энергоменеджменту на основе потокового машинного обучения является не просто технической модернизацией, а фундаментальной трансформацией экономической модели предприятия. Способность алгоритмов (ARF + ADWIN) автономно отслеживать нестационарность среды без привлечения дорогостоящих специалистов по Data Science для периодического переобучения снижает барьеры для цифровизации малого и среднего бизнеса. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию внешних рыночных сигналов (цен на оптовом рынке) в контур онлайн-обучения для максимизации маржинальности.

Список литературы

1. Сравнительный анализ статистических и нейросетевых методов прогнозирования геоэкологических показателей горнодобывающих объектов /

А.А. Ступина, М.В. Спринджук, М.В. Журавлев, Т.И. Ашмарина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №4. – С. 125–130. EDN ITXOMF

2. Использование нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по геофизическим данным скважин / В.В. Кукарцев, Б.В. Потапов, В.В. Пчелкин [и др.] // Геология и Геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. №2. – С. 256–267. DOI 10.46698/VNC.2026.90.55.001. EDN KEEVXM

3. Применение методов машинного обучения для прогнозирования прочностных характеристик горных пород / Б.В. Потапов, Д.Ю. Евсюков, А.С. Прудкий, М.С. Никаноров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №2. – С. 406–411. EDN VSQHDC

4. Функциональное моделирование бизнес-процессов как основа проектирования информационных систем предприятия / М.В. Журавлев, В.Ю. Панченко, С.В. Кукарцева, А.Р. Глинская // Социально-экономические процессы современного общества: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 10 февраля 2026 г.). – Чебоксары: Среда, 2026. – С. 163–167. EDN LVNZDY

5. Архитектура цифровых платформ экологического мониторинга горнопромышленных регионов с использованием облачных и интеллектуальных технологий / Б.В. Потапов, С.О. Курашкин, Н.В. Сергеева, Е.Ф. Малыха // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 113–118. -. EDN MXAZUV

6. Проектирование модуля информационной системы как фактор повышения качества сервисных услуг предприятия / Л.В. Красовская, С.В. Кукарцева, М.В. Журавлев, А.В. Низамеева // Право, экономика и управление: теория и практика: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 17 декабря 2025 г.). – Чебоксары: Среда, 2025. – С. 191–194. EDN CHXXVN

7. Tudakov D.I. Adaptive Performance Management of Transactional Databases in Automated Process Control Systems Based on Probabilistic Fragmentation Prediction / D.I. Tudakov, B.V. Potapov, S.V. Pchelintseva // 2026 International Conference

on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2026. – P. 1178–1182.