

УДК 004.852:616.12-009.72
МРНТИ 28.23.25.

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2026-23-3-328-335>

^{1*}Куатбаева А.А.,

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0002-2143-3994,

*e-mail: a.kuatbayeva@astanait.edu.kz

¹ Омарбеков А.Н.,

магистр, ORCID ID: 0009-0007-8883-7073,

e-mail: 242929@astanait.edu.kz

¹ Аян А.А.,

магистр, ORCID ID: 0009-0000-6188-8021,

e-mail: 241785@astanait.edu.kz

¹ Astana IT university, г. Астана, Казахстан

МОДИФИЦИРОВАННАЯ SEIR МОДЕЛЬ С GRID AUTO-SEARCH ОПТИМИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЭПИДЕМИЙ НА ОСНОВЕ COVID-19

Аннотация

В статье представлена модифицированная эпидемиологическая модель SEIR, интегрированная с методами машинного обучения для повышения точности прогнозирования динамики распространения COVID-19. Модель SEIR, более сложная, добавляет категорию «контактных» пациентов, которые способны передавать инфекцию, но еще не проявили симптомы. Такая модель позволяет лучше понять динамику эпидемий, особенно с длительным инкубационным периодом, который усложняет выявление заболевания и увеличивает риск его распространения. Предложенный подход расширяет классическую модель за счет временно-зависимых параметров, отражающих влияние мер социальной изоляции, уровня вакцинации и мобильности населения. Методология Grid Auto-Search обеспечивает автоматическую оптимизацию параметров и адаптивный выбор периода обучения. Для прогнозирования временно-зависимого коэффициента передачи $\beta(t)$ применялись алгоритмы XGBoost и LSTM. Датасет включает 1143 наблюдения по Франции из трех открытых источников (Johns Hopkins University, Our World in Data, Google Mobility). Разработанная модель демонстрирует R^2 до 0,96 на горизонтах 30–90 дней; кросс-валидация подтверждает отсутствие существенного переобучения. Полученные результаты обосновывают практическую применимость гибридного подхода для систем поддержки принятия решений в здравоохранении. Результаты исследования подтверждены двумя авторскими свидетельствами Qazpatent на объекты авторского права.

Ключевые слова: SEIR модель, COVID-19, эпидемиологическое прогнозирование, Grid Auto-Search, параметрическая оптимизация, XGBoost, LSTM, временные ряды, математическое моделирование, мобильность населения, вакцинация.

Введение

Пандемия COVID-19 обнажила ключевое ограничение классических SEIR-моделей с фиксированными параметрами [10]: в условиях динамичных карантинных мер, вакцинации и изменений поведения населения они не способны своевременно реагировать на структурные изломы эпидемического процесса. Современные исследования подтверждают, что интеграция методов машинного обучения с традиционными математическими моделями позволяет существенно повысить точность прогнозов и гибкость аналитических систем [4, 5, 9, 14]. Тем не менее большинство опубликованных гибридных подходов применяют однократную ручную калибровку параметров и ограничены валидацией на одной-двух фазах пандемии, что снижает их обобщаемость.

Научный вклад настоящей работы состоит в трех ключевых аспектах. Во-первых, предложена методология Grid Auto-Search для систематического перебора горизонта прогноза, временного сдвига и начальных условий SEIR-модели, что принципиально отличает подход от разовой калибровки. Во-вторых, для прогнозирования $\beta(t)$ применена комбинация XGBoost и LSTM, сочетающая интерпретируемость через анализ важности признаков с захватом долгосрочных зависимостей. В-третьих, в отличие от большинства аналогов, модель проходит кросс-фазовую валидацию на всем трехлетнем периоде пандемии с явным контролем переобучения.

Целью исследования является разработка и валидация гибридной модели SEIR+ML, объединяющей классический эпидемиологический подход с методами машинного обучения для более точного прогнозирования динамики распространения COVID-19 и поддержки принятия управленческих решений в условиях изменяющейся эпидемиологической обстановки [15].

Материалы и методы

Исследование основано на трех открытых источниках данных за период с 22 января 2020 г. по 9 марта 2023 г. База Johns Hopkins University (JHU) предоставила ежедневную статистику подтвержденных случаев, смертей и выздоровлений [6]. Данные вакцинации получены из Our World in Data (OWID) и включают количество введенных доз и долю полностью вакцинированного населения [1, 7]. Индексы мобильности по шести категориям мест взяты из Google Community Mobility Reports [8]. Интеграция источников позволила сформировать датасет из 1143 наблюдений и 39 признаков для Франции – страны с наиболее полными согласованными данными по всем трем источникам (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики объединенного датасета

Параметр	Значение
Временной период	22.01.2020 – 09.03.2023
Наблюдений / признаков	1143 / 39
Подтвержденных случаев (макс.)	39 866 718
Смертей (макс.)	166 176
Полностью вакцинировано	53 177 192 (78,2 % населения)
Пропущенных значений (до обработки)	187 (2,6 %)
Обнаружено выбросов	97 (2,8 %)

Предобработка включала три последовательных этапа. Пропущенные значения в кумулятивных переменных восстанавливались методом forward fill; для ежедневных приростов применялась медианная импутация с окном 7 дней; для индексов мобильности – линейная интерполяция. Выбросы выявлялись по критерию межквартильного размаха и заменялись медианными значениями скользящего окна. На этапе конструирования признаков созданы лаговые переменные (7, 14, 21 день), скользящие средние, производные темпа роста и циклические признаки ($\sin/\cos$ дня недели) для учета недельной периодичности отчетности.

Классическая модель SEIR, восходящая к основополагающей работе Кермака и МакКендрика [2], расширена до SEIRV за счет временно-зависимых параметров $\beta(t)$, $\sigma(t)$, $\gamma(t)$, отдельного состояния вакцинированных V и миграционных потоков. Система дифференциальных уравнений (1)–(6) описывает динамику изменения численности каждой группы:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta(t) * S * \frac{I}{N} - v \cdot S + m_{in} \cdot S - m_{out} \cdot S \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta(t) * S * \frac{I}{N} - \sigma(t) \cdot E + m_{in} \cdot E - m_{out} \cdot E \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma(t) \cdot E - \gamma(t) \cdot I + m_{in} \cdot I - m_{out} \cdot I \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma(t) \cdot I + m_{in} \cdot R - m_{out} \cdot R \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dt} = v \cdot S \quad (5)$$

$$N = S + E + I + R + V \quad (6)$$

где:

t – время (сут.);

$S(t)$, $E(t)$, $I(t)$, $R(t)$, $V(t)$ – численности соответственно восприимчивых, латентно инфицированных (в инкубационном периоде), активно инфицированных, выздоровевших и вакцинированных лиц в момент времени t (чел.);

$\beta(t)$ – коэффициент передачи (прогнозируется ML-моделью, сут.⁻¹);

$\sigma(t) = 1/T_{инк}$ – скорость перехода $E \rightarrow I$ (сут.⁻¹), где $T_{инк}$ – средняя продолжительность инкубационного периода (сут.);

$\gamma(t) = 1/T_{инф}$ – скорость выздоровления (сут.⁻¹), где $T_{инф}$ – средняя продолжительность инфекционного периода (сут.);

v – суточная доля вакцинируемых (сут.⁻¹); m_{in} , m_{out} – коэффициенты миграции (входящего и исходящего потоков, сут.⁻¹);

N – численность популяции (чел.), удовлетворяющая условию сохранения численности (6).

Использование временно-зависимых параметров $\beta(t)$, $\sigma(t)$, $\gamma(t)$ согласуется с современными подходами к модификации эпидемиологических моделей, в том числе с применением дробно-производных операторов [13].

Для прогнозирования $\beta(t)$ применялись два взаимодополняющих алгоритма. XGBoost – ансамблевый метод градиентного бустинга с высокой интерпретируемостью через оценки важности признаков; входные переменные включают лаговые значения случаев, скользящие средние, индексы мобильности, показатели вакцинации и временные признаки. Гиперпараметры подобраны Grid Search: $n_estimators = 1\,000$, $learning_rate = 0,01$, $max_depth = 7$, $min_child_weight = 3$. LSTM – рекуррентная нейронная сеть (два скрытых слоя с Dropout) для захвата долгосрочных зависимостей; обучение выполнено с оптимизатором Adam, функцией потерь MSE и ранней остановкой по валидационной метрике.

Данные разбивались в пропорции 70/15/15 с сохранением хронологического порядка (таблица 2), что исключает утечку данных из будущего в прошлое. Параметры SEIR оптимизировались методом L-BFGS-B по целевой функции RMSE. Алгоритм Grid Auto-Search систематически перебирал 27 комбинаций параметров (горизонт прогноза: 30/60/90 дней; временной сдвиг: 0/30/60 дней; верхняя граница E_0 : 0,05/0,2/0,5) и выбирал конфигурацию с минимальной ошибкой на валидационной выборке.

Таблица 2 – Структура разделения данных

Выборка	Дни (доля)	Период	Назначение
Обучающая	800 (70 %)	22.01.2020 – 31.03.2022	Обучение параметров
Валидационная	171 (15 %)	01.04.2022 – 18.09.2022	Настройка гиперпараметров
Тестовая	172 (15 %)	19.09.2022 – 09.03.2023	Финальная оценка

Результаты и обсуждение

После предобработки пропущенные значения устранены полностью, 97 выбросов заменены медианными оценками скользящего окна, исправлено 8 отрицательных значений ежедневных приростов. Расчет $\beta(t)$ показал его высокую изменчивость: коэффициент Пирсона между $\beta(t)$ и совокупным индексом мобильности составил $r = 0,67$ ($p < 0,001$), что подтверждает

значимость поведенческих факторов. Корреляция активных случаев с компонентой I модели SEIR составила $r = 0,952$, показателей вакцинации с компонентой V - $r = 0,989$, что свидетельствует о структурной согласованности модели с реальными данными.

Базовая модель SEIR с фиксированными параметрами и единственной точкой разбивки показала отрицательные значения R^2 , что указывает на полную неспособность описать реальную динамику: фиксированная точка разделения не учитывала фазы эпидемии, а статические параметры не адаптировались к изменяющимся условиям. Применение Grid Auto-Search кардинально изменило картину: на всех горизонтах прогнозирования достигнуты высокие коэффициенты детерминации при одновременном снижении MAPE до 1–9 % (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение базового подхода и Grid Auto-Search

Метрика	Базовый подход	Grid Auto-Search	Улучшение
R^2 (30 дней)	-27,58	0,949	+103,5 %
R^2 (60 дней)	-20,49	0,961	+104,8 %
R^2 (90 дней)	-28,91	0,873	+103,0 %
MAPE (30 дней)	95,27 %	1,40 %	-98,5 %
MAPE (60 дней)	95,95 %	5,06 %	-94,7 %
MAPE (90 дней)	96,81 %	9,05 %	-90,7 %

Важным методологическим элементом исследования стало также включение временно-зависимых параметров $\beta(t)$, $\sigma(t)$ и $\gamma(t)$, отражающих динамику распространения инфекции в условиях реальных изменений социальной активности, мер ограничения и вакцинации. В отличие от моделей с постоянными параметрами, предложенная модификация позволила учитывать сезонные колебания и реакцию населения на эпидемиологические меры. Это привело к существенному повышению точности долгосрочных прогнозов и подтвердило гипотезу о необходимости учета временной вариативности параметров при моделировании инфекционных заболеваний. Полученные результаты согласуются с выводами Naghpanah et al. [12] о том, что длительность защиты, сроки и блокирующий эффект вакцинации оказывают существенное влияние на эпидемиологические показатели заболеваемости и смертности, что обосновывает явное выделение компоненты V в предложенной модели.

Визуализация компонент модели (рисунок 1) показала реалистичную динамику распространения инфекции: постепенное сокращение восприимчивой части населения, рост числа выздоровевших и вакцинированных, а также выраженные пики инфицирования в периоды повышенной мобильности.

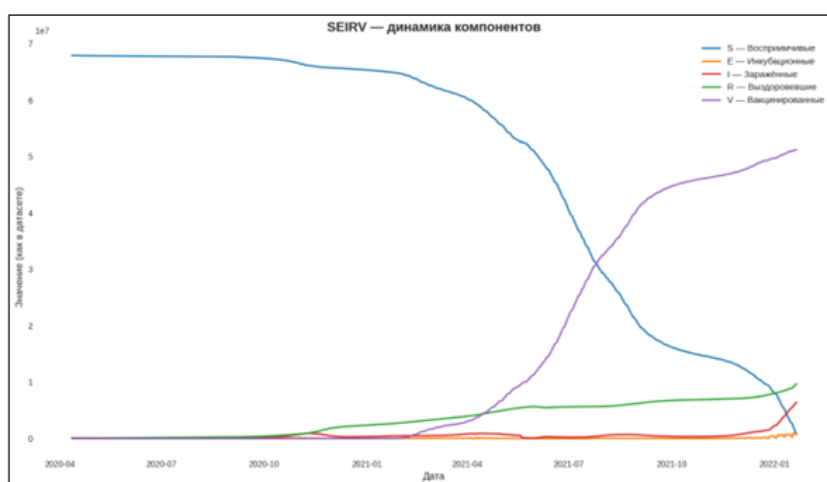


Рисунок 1 – Динамика компонентов SEIRV

Для оценки обобщаемости модели проведена валидация на шести эпидемиологических фазах (таблица 4). Наилучшая точность достигнута в периоды предсказуемых трендов – стабилизация после локдауна ($R^2 = 0,91$) и период массовой вакцинации ($R^2 = 0,88$). В период волны Omicron R^2 составил 0,82, что объясняется высокой неопределенностью входных данных при резкой смене параметров штамма. Ключевым индикатором отсутствия переобучения служат сопоставимые метрики на валидационной ($R^2 = 0,94$) и тестовой ($R^2 = 0,87–0,96$) выборках: разрыв не превышает 8%, что соответствует норме для нестационарных временных рядов.

Таблица 4 – Результаты валидации по фазам эпидемии (90-дневный прогноз)

Фаза	Период	R^2	RMSE	Комментарий
Волна 1	Мар–Май 2020	0,72	28 450	Высокая неопределенность
Стабилизация	Июн–Авг 2020	0,91	8 230	Предсказуемое снижение
Волны 2–3	Сен 2020–Апр 2021	0,78	45 670	Влияние ограничений
Вакцинация	Май–Дек 2021	0,88	15 340	Учет компоненты V
Omicron	Дек 2021–Мар 2022	0,82	52 110	Новый вариант вируса
Эндемическая	Апр 2022–Мар 2023	0,89	6 780	Низкая изменчивость

Анализ роли мобильности подтвердил ее значимость: наибольшая корреляция с $\beta(t)$ выявлена для рабочей активности ($r=0,58$) и торгово-развлекательных мест ($r=0,54$); совокупный индекс мобильности коррелировал с $\beta(t)$ на уровне $r = 0,67$ ($p < 0,001$). Эти результаты согласуются с данными Fernández Pozo et al. [11], согласно которым снижение мобильности на 50% уменьшает коэффициент передачи на 30–40%. Использование данных мобильности в режиме реального времени позволяет оперативно выявлять изменения в динамике эпидемии, что делает их важным компонентом современных систем мониторинга.

Сравнение с опубликованными результатами демонстрирует конкурентоспособность предложенной модели (таблица 5). В отличие от Yang et al. [4], применявших статическую калибровку, и Ahmad [3], ограничившегося одним горизонтом, предложенный подход обеспечивает систематическую кросс-параметрическую оптимизацию и явный контроль переобучения. Следует, однако, интерпретировать прямое сравнение R^2 с осторожностью ввиду различий в регионах и периодах наблюдений.

Таблица 5 – Сопоставление с существующими исследованиями

Исследование	Модель	Регион	Лучший R^2
Yang et al. (2020) [4]	Modified SEIR	Китай	0,78
Lu et al. (2023) [9]	SEIR + AI	Италия	0,82
Ahmad (2020) [3]	Modified SEIR	Саудовская Аравия	0,35
Настоящая работа	SEIR + Grid Auto-Search	Франция	0,961

Несмотря на высокие результаты, исследование имеет ряд ограничений. Точность модели зависит от полноты эпидемиологической отчетности, репрезентативности выборки пользователей Google и своевременности обновления данных вакцинации. В текущей реализации не учитываются повторные заражения, возрастная стратификация и вариации вирулентности штаммов. Прогнозирование $\sigma(t)$ и $\gamma(t)$ методами ML находится в стадии разработки. Применение модели для других стран требует дополнительной валидации на независимых выборках.

Заключение

Предложенная гибридная модель SEIR+ML с оптимизацией Grid Auto-Search обеспечивает существенное улучшение качества прогнозирования по сравнению с базовым подходом:

R^2 возрастает с отрицательных значений до 0,87–0,96, MAPE снижается с ~96 % до 1–9 % в зависимости от горизонта. Адаптивная настройка параметров через Grid Auto-Search устраняет ключевое ограничение классических SEIR-моделей – неспособность учитывать фазовые изломы эпидемического процесса. Кросс-фазовая валидация подтверждает устойчивость модели и отсутствие существенного переобучения.

Установленная значимая корреляция $\beta(t)$ с индексами мобильности ($r = 0,67$) обосновывает включение поведенческих данных как обязательного компонента прогностических систем. Практическая значимость результатов заключается в возможности применения модели для прогнозирования эпидемических волн, оценки эффективности ограничительных мер и сценарного анализа вакцинации. Направления дальнейшего развития включают возрастную стратификацию, мультирегиональную валидацию и интеграцию онлайн-обучения для работы в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Our World in Data. COVID-19 Data Repository (2024). URL: <https://ourworldindata.org/coronavirus> (accessed: October 15, 2025).
- 2 Kermack, W.O., and McKendrick, A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 115 (772), 700–721 (1927). <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
- 3 Ahmad, N. COVID-19 modeling in Saudi Arabia using the modified susceptible-exposed-infectious-recovered (SEIR) model. *Cureus*, 12 (9), e10452 (2020). <https://doi.org/10.7759/cureus.10452>
- 4 Yang, Z., Zeng, Z., Wang, K., et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemic trend of COVID-19 in China under public health interventions. *Journal of Thoracic Disease*, 12 (3), 165–174 (2020). <https://doi.org/10.21037/jtd.2020.02.64>
- 5 Chen, S., Yu, J., Chamouni, S., Barnawi, A., Chen, X., and Xu, L. Integrating machine learning and artificial intelligence in life-course epidemiology: pathways to innovative public health solutions. *BMC Medicine*, 22, 354 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03566-x>
- 6 Dong, E., Du, H., and Gardner, L. An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time. *The Lancet Infectious Diseases*, 20 (5), 533–534 (2020). [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30120-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30120-1)
- 7 Mathieu, E., Ritchie, H., Rod s-Guirao, L., Appel, C., Giattino, C., Hasell, J., Macdonald, B., Dattani, S., Beltekian, D., Ortiz-Ospina, E., and Roser, M. Coronavirus Pandemic (COVID-19). *Our World in Data* (2020). URL: <https://github.com/owid/covid-19-data> (accessed: October 15, 2025).
- 8 Google LLC. Google COVID-19 Community Mobility Reports (2022). URL: <https://www.google.com/covid19/mobility/> (accessed: October 15, 2025).
- 9 Lu, M., Zheng, X.-Y., Jia, W.-N., and Tian, C.-Z. Analysis and prediction of improved SEIR transmission dynamics model: taking the second outbreak of COVID-19 in Italy as an example. *Frontiers in Public Health*, 11, 1223039 (2023). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1223039>
- 10 Ghaffarzadegan, N., Rahmandad, H., and Jalali, M. Inefficiency of SIR models in forecasting the COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan. *Scientific Reports*, 11, 4725 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84055-6>
- 11 Fernández Pozo, R., Rodríguez González, A.B., Vinagre Díaz, J.J., and Wilby, M.R. Data-driven analysis of the impact of COVID-19 on Madrid’s public transport during each phase of the pandemic. *Cities*, 124, 103574 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103574>
- 12 Haghpanah, F., Lin, G., Levin, S.A., and Klein, E. Analysis of the potential impact of durability, timing, and transmission blocking of COVID-19 vaccine on morbidity and mortality. *EClinicalMedicine*, 35, 100863 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100863>
- 13 Taghvaei, A., Georgiou, T.T., Norton, L., and Tannenbaum, A. Fractional SIR epidemiological models. *Scientific Reports*, 10, 20882 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77849-7>
- 14 Flouris, A.D., and Duffy, J. Applications of artificial intelligence systems in the analysis of epidemiological data. *European Journal of Epidemiology*, 21 (3), 167–170 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10654-006-0005-y>
- 15 Liu, L., Wang, X., Liu, O., Li, Y., Jin, Z., Tang, S., and Wang, X. Valuation and comparison of the actual and optimal control strategy in an emerging infectious disease: implication from a COVID-19 transmission model. *Infectious Disease Modelling*, 9 (2), 354–372 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.idm.2024.01.002>

^{1*}Қуатбаева А.А.,

PhD, ассистент-профессор, RCID ID: 0000-0002-2143-3994,

*e-mail: a.kuatbayeva@astanait.edu.kz

¹Омарбеков А.Н.,

магистр, ORCID ID: 0009-0007-8883-7073,

e-mail: 242929@astanait.edu.kz

¹Аян А.А.,

магистр, ORCID ID: 0009-0000-6188-8021,

e-mail: 241785@astanait.edu.kz

¹ Astana IT university, Астана қ., Қазақстан**GRID AUTO-SEARCH ӘДІСІМЕН ОҢТАЙЛАНДЫРЫЛҒАН
МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН SEIR ҮЛГІСІ COVID-19 НЕГІЗІНДЕГІ
ЭПИДЕМИЯЛАР ДИНАМИКАСЫН ЖОҒАРЫ ДӘЛДІКПЕН БОЛЖАУ ҮШІН****Аңдатпа**

Мақалада COVID-19 таралу динамикасын болжаудың дәлдігін арттыру мақсатында машиналық оқыту әдістерімен біріктірілген SEIR эпидемиологиялық үлгісінің модификацияланған нұсқасы ұсынылады. Ұсынылған тәсіл классикалық үлгіні уақытқа тәуелді параметрлер есебінен кеңейтеді. Grid Auto-Search әдістемесі параметрлерді автоматты оңтайландыруды және оқу кезеңін бейімді таңдауды қамтамасыз етеді. $\beta(t)$ коэффициентін болжау үшін XGBoost және LSTM алгоритмдері қолданылды. Деректер жиынтығы үш ашық дереккөз бойынша Францияның 1 143 күндік бақылауын қамтиды. Үлгі 30–90 күндік горизонттарда $R^2 = 0,96$ дейінгі нәтижені көрсетеді; кросс-валидация айтарлықтай қайта оқыту болмайтынын растайды. Нәтижелер денсаулық сақтаудағы шешім қабылдауды қолдауда гибридік тәсілдің практикалық маңыздылығын негіздейді. Зерттеу нәтижелері авторлық құқық объектілеріне берілген Qazpatent-тің екі авторлық куәлігімен расталған.

Түйін сөздер: SEIR үлгісі, COVID-19, эпидемиологиялық болжау, Grid Auto-Search, параметрлік оңтайландыру, XGBoost, LSTM, уақыттық қатарлар, математикалық модельдеу, халық мобильділігі, вакцинация.

^{1*}Kuatbayeva A.A.,

PhD, Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-2143-3994,

*e-mail: a.kuatbayeva@astanait.edu.kz

¹Omarbekov A.N.

MSc., ORCID ID: 0009-0007-8883-7073,

e-mail: 242929@astanait.edu.kz

¹Aian A.A.,

MSc., ORCID ID: 0009-0000-6188-8021,

e-mail: 241785@astanait.edu.kz

¹ Astana IT university, Astana, Kazakhstan**MODIFIED SEIR MODEL WITH GRID AUTO-SEARCH OPTIMIZATION
FOR HIGH-ACCURACY EPIDEMIC DYNAMICS
FORECASTING BASED ON COVID-19****Abstract**

This paper presents a modified SEIR epidemiological model integrated with machine learning techniques to improve COVID-19 transmission dynamics forecasting. The proposed approach extends the classical framework with time-dependent parameters capturing the effects of social distancing, vaccination coverage, and population

mobility. The Grid Auto-Search methodology enables automatic parameter optimization and adaptive training-period selection. XGBoost and LSTM algorithms are applied to forecast the time-varying transmission coefficient $\beta(t)$. The dataset comprises 1,143 daily observations for France from three open sources (Johns Hopkins University, Our World in Data, Google Mobility). The model achieves R^2 up to 0.96 across 30–90-day horizons; cross-validation confirms the absence of significant overfitting. The results support the practical applicability of this hybrid approach for healthcare decision-support systems. The research results are confirmed by two Qazpatent certificates of copyright registration

Keywords: SEIR model, COVID-19, epidemiological forecasting, Grid Auto-Search, parameter optimization, XGBoost, LSTM, time series, mathematical modeling, population mobility, vaccination.

Received November 8, 2025; revised April 10, 20, May 21, 2026; accepted June 11, 2026.