

УДК 502.5:004.89
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5289
Шифр специальности ВАК: 2.8.4
Научная статья



Проблематика совершенствования экологического мониторинга на нефтегазовых объектах с применением технологий искусственного интеллекта

А.И. Нурғалиев, А.А. Назарова✉, И.В. Шарф

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ Aan54@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена вызовами принятой климатической доктрины, ориентирующей российские нефтегазовые компании на реализацию стратегии устойчивого развития, в рамках которой экологический мониторинг окружающей среды занимает ключевое место и является основой инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности компаний на мировом рынке углеводородного сырья. Трансформация экологического мониторинга в направлении внедрения технологий искусственного интеллекта сопровождается комплексом проблем технико-технологического характера. *Цель:* анализ проблематики внедрения технологий искусственного интеллекта в систему мониторинга состояния атмосферного воздуха на действующих нефтегазовых объектах. *Информационная база:* материалы научных работ российских и зарубежных авторов, годовая и внутренняя отчетность нефтегазовых компаний, нормативно-правовая база. *Методы:* эмпирический, аналитический, экономико-статистический. *Результаты.* Авторами выявлено, что совершенствование экологического мониторинга на основе технологий искусственного интеллекта в рамках стратегической задачи технологического суверенитета и цифровизации нефтегазовой отрасли сдерживается триадой факторов в части качества информационной базы, измерительных устройств, пригодных для специфических географо-климатических условий, и имеющегося обеспечения технологий искусственного интеллекта. Обозначено, что для нивелирования двойственного влияния технологий искусственного интеллекта необходим комплекс мероприятий в части государственного регулирования для повышения инициативности нефтегазовых компаний по совершенствованию экологического мониторинга. Также обосновано, что разработка собственных программных продуктов, несмотря на длительность внедрения в связи с поиском технических, технологических и IT-решений, является перспективным бизнес-проектом, возможным для тиражирования на других нефтегазовых объектах со схожими географо-климатическими условиями.

Ключевые слова: нефтегазовый объект, парниковые газы, экологический мониторинг, газоаналитические системы, искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть

Для цитирования: Нурғалиев А.И., Назарова А.А., Шарф И.В. Проблематика совершенствования экологического мониторинга на нефтегазовых объектах с применением технологий искусственного интеллекта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 38–49. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5289

UDC 502.5:004.89
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5289
Scientific paper



Issues of improving environmental monitoring at oil and gas facilities using artificial intelligence technologies

A.I. Nurgaliev, A.A. Nazarova✉, I.V. Sharf

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ Aan54@tpu.ru

Abstract. Relevance. Challenges of the traditional climate doctrine, which guides Russian oil and gas companies in implementing development strategies. Within these strategies, environmental monitoring of the environment occupies a key place and is crucial for the investment attractiveness and competitiveness of companies in the global hydrocarbon raw materials market. The transformation of environmental development through artificial intelligence technologies is accompanied by a set of technical and technological problems. **Aim.** Analysis of the problems of developing artificial intelligence technologies in the Triad system «State of Atmospheric Air» at operating oil and gas facilities. **Information base.** Materials of scientific works by Russian and foreign authors, annual and interim reporting of oil and gas companies, regulatory framework. **Methods.** Empirical, analytical, economic, and statistical. **Results.** The authors established that the improvement of the environmental triad based on artificial intelligence technology within the framework of strategic tasks of technological sovereignty and digitalization of the oil and gas industry is determined by a triad of factors: the quality of information bases, measuring devices that provide characteristic geographic and climatic conditions, and real technical support for artificial intelligence technologies. It is indicated that in order to level the dual industrial technologies of artificial intelligence, a set of measures is needed in terms of state regulation to increase the initiative of oil and gas companies in improving the environmental monitoring system. It is also substantiated that the development of clean software products, despite the long relation to the search for technical, technological, and IT solutions, is a promising business project that can be replicated at other oil and gas facilities with similar geographic and climatic conditions.

Keywords: oil and gas facility, greenhouse gases, environmental monitoring, gas analysis systems, artificial intelligence, artificial neural network

For citation: Nurgaliev A.I., Nazarova A.A., Sharf I.V. Issues of improving environmental monitoring at oil and gas facilities using artificial intelligence technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 38–49. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5289

Введение

Глобальное потепление климата, обусловленное антропогенной деятельностью, стало вызовом всему человечеству, что направило усилия мирового сообщества на подписание Парижского соглашения, согласно которому ориентиром является сдерживание роста средней температуры на планете в пределах 1,5 °C относительно доиндустриального уровня [1]. Данная цель достижима при сокращении выбросов парниковых газов (ПГ) на 42 % к 2030 г. и на 57 % к 2035 г. [2].

Указом Президента РФ обозначено сокращение выбросов ПГ к 2035 г. до 65–67 % относительно уровня 1990 г., что реализуемо при эффективном использовании природных механизмов поглощения углерода (лесные массивы и экологические системы), недискриминационном доступе к оборудованию и технологиям, необходимым для сокращения выбросов ПГ при условии устойчивого и сбалансированного развития Российской Федерации [3], что позволит достичь углеродной нейтральности к 2060 г. [4].

Вызовы климатической повестки ориентируют нефтегазовый бизнес на реализацию ESG-стратегии (Environment/Экология и окружающая среда, Social/Социальное развитие, Governance/ Корпоративное управление), что является основой инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности компаний на мировом рынке углеводородного сырья. Включение в ESG-индекс подтверждает соответствие компании стандартам ответственного ведения бизнеса и позволяет позиционировать её как соответствующую критериям устойчивого развития. Одним из основных элементов ESG-

стратегии является экологический мониторинг, который играет ключевую роль при формировании ежегодной отчетности нефтегазовых предприятий по выбросам ПГ. Происходит трансформация подходов к проведению экологического мониторинга как комплексной системы постоянного наблюдения за состоянием природной среды и её компонентов в условиях активного внедрения цифровых технологий в соответствии с приоритетом «цифровой зрелости отрасли» [5] с учетом усиления санкционного давления и стратегий технологического суверенитета. Это обусловило актуальность данного исследования в части анализа проблематики внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в систему мониторинга состояния атмосферного воздуха на действующих нефтегазовых объектах [6].

Материалы и методы

Информационной базой исследования послужили официальные данные министерств и ведомств, годовая и внутренняя отчетность нефтегазовых компаний, обработанных экономико-статистическими и эмпирическими методами. Исследование базировалось на выявлении проблематики в использовании специализированного оборудования и внедрения программного обеспечения (ПО) на основе технологий ИИ для мониторинга состояния атмосферы в процессе производственной деятельности нефтегазовых компаний.

Результаты исследования

По результатам исследований Quilcaille установлено, что треть (33 %) всех зафиксированных исторических тепловых волн не могла бы произой-

ти без воздействия человеческого фактора на климатическую систему [7]. В период 2000–2022 гг. 62 зарегистрированные тепловые волны стали в 10000 раз более вероятными именно вследствие выбросов промышленных предприятий. По оценкам Carbon Majors, в 2023 г. совокупный объем выбросов ПГ от 169 действующих предприятий-производителей УВ, включенных в базу данных, достиг рекордного уровня и составил 33,9 гигатонн CO₂-экв., что составляет 80,3 % от общемирового объема эмиссий, связанных с использованием ископаемого топлива [8]. Более 50 % мировой эмиссии ПГ вызвано деятельностью 36 компаний, занимающихся добычей топливно-энергетических ресурсов, в числе которых присутствуют ПАО «Газпром» и «Роснефть» [9]. Нефтегазовый сектор обеспечивает 12 % всех выбросов ПГ в России.

Климатическая повестка является триггером востребованности и совершенствования экологического мониторинга, что обуславливает темпы роста данного рынка, охватывающего технологии и услуги, используемые для измерения параметров окружающей среды. Объем рынка мониторинга состояния окружающей среды в 2022 г. составил 13,7 \$ млрд, увеличившись до 14,7 \$ млрд в 2024 г. [10]. Согласно отчету по рыночной аналитике MarkWide Research ожидается, что к 2030 г. его объем достигнет примерно 20 \$ млрд, а среднегодовой темп роста составит около 8–10 % [11]. На рост мирового рынка экологического мониторинга, помимо изменений климата и императива нормативных параметров, индустриализации, влияют также технологические инновации в части сенсорных технологий, анализа данных, интернета вещей (Internet of Things, IoT) в рамках четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0).

В условиях мирового тренда на устойчивое развитие российский рынок экологического мониторинга характеризуется значительным потенциалом роста, чему способствует как законодательство, так и стремление нефтегазовых компаний сократить выбросы ПГ. Согласно данным Российского национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции [12], ежегодный уровень выбросов ПГ от деятельности, связанной с нефтью

и газом, в период 2019–2022 г. вырос с 125,9 до 133,6 млн т CO₂-экв. (табл. 1).

До середины предыдущего десятилетия наблюдалось снижение выбросов благодаря увеличению утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) на нефтегазовых месторождениях. Однако к 2022 г. ситуация ухудшилась из-за замедления этих процессов и увеличения доли сжигаемого ПНГ вследствие активизации разработки месторождений Восточной Сибири, характеризующихся недостаточной производственной и инфраструктурной обустроенностью. В то же время Росприроднадзор отмечает тенденцию к уменьшению выбросов таких веществ, как оксиды серы (SO₂), азота (N₂O), летучие органические соединения, твердые вещества, отходящих от стационарных и передвижных источников [13]. Это стало возможным за счет реализации экологических программ нефтегазовыми компаниями [14]. Так, объем инвестиций в охрану окружающей среды в 2024 г. в ПАО «Газпром» составил 87,9 млрд р. [15], ПАО «НК «Роснефть» – 74 млрд р. [16], ПАО «НОВАТЭК» – 3,5 млрд р. [17], при этом наблюдается тенденция к изменению подходов к проведению экологического мониторинга с учетом цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли [18].

В нефтегазовом секторе традиционно экологический мониторинг осуществляется посредством комплекса инструментальных и лабораторных исследований [19]. При этом специалистами выделяется ряд факторов, негативно влияющих на эффективность традиционного подхода. В частности, временные задержки в получении результатов измерений из-за особенностей проведения, что может повлечь проблему, связанную с принятием решений и экстренным реагированием в случае аварийной ситуации [20]. Влияние человеческого фактора приводит к несогласованности сбора данных, искажению результатов измерений и погрешностям в оценке состояния окружающей среды [21], что в совокупности приводит к фрагментарности мониторинга, которая проявляется в ограниченном охвате исследуемых территорий, недостаточном объеме выборок и неполноте получаемых данных о состоянии экосистем.

Таблица 1. Совокупные выбросы парниковых газов* (миллионов тонн CO₂-экв./год)

Table 1. Total greenhouse gas emissions* (million tons CO₂-eq/year)

Год/Year	2005	2010	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Всего**/Total**	1953,6	1997,1	2006,9	1997,2	1988,4	1984,5	2024,9	2087,3	2077,3	2001,3	2098,1	2042,0
CO ₂ **	1561,9	1632,3	1638,4	1637,7	1635,8	1631,8	1662,5	1710,5	1702,6	1629,5	1711,2	1658,9
CH ₄ **	319,3	298,5	288,0	280,1	273,5	269,5	274,8	283,7	284,8	277,0	289,7	281,8
N ₂ O**	48,4	50,2	52,6	53,3	54,6	57,4	58,3	57,7	59,4	61,5	63,7	65,9
гидрофторуглероды/hydrofluorocarbons	16,8	11,8	19,5	22,2	20,3	21,5	25,6	32,7	27,9	30,6	30,8	33,0
перфторуглероды/perfluorocarbons	5,7	3,3	3,1	2,7	3,2	3,3	2,4	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4
гексафторид серы/sulfur hexafluoride	1,6	1,0	5,3	1,1	1,1	0,9	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,0

В экономическом аспекте наблюдается рост операционных издержек, обусловленных ручным пробоотбором, лабораторными анализами, а также затратами на привлечение высококвалифицированного персонала, приобретение и обслуживание специализированного оборудования, обеспечение расходными материалами и реагентами [22, 23].

В условиях императивов международного и российского законодательства и приоритета технологического суверенитета происходит активное внедрение цифровых технологий с использованием технологий ИИ в проведении мониторинга качества атмосферного воздуха [24].

В контексте исследования отметим, что трансформация экологического мониторинга сопровождается рядом проблем, связанных как с методологией проводимых исследований по качеству воздушной среды и выбросам ПГ, так и с техническим обеспечением.

Концепция программного продукта

Для достижения поставленной цели проблематика внедрения технологий ИИ в экологический мониторинг проанализирована в рамках реализации инвестиционного проекта на нефтегазовом объекте, расположенном на территории Ханты-Мансийского автономного округа–Югра. Необходимость создания собственного программного продукта обуславливается климатическими условиями, географическими, производственными и инфраструктурными особенностями, что приводит к востребованности технических и технологических решений с такими ключевыми параметрами, как точность, скорость обработки данных и интеграция с существующими системами. Кроме того, стоит задача учета архивных исторических показателей концентраций ПГ, в том числе метана (CH_4) и пропана (C_3H_8), на открытой площадке групповой замерной установки цеха по добыче нефти и газа (ЦДНГ), которые обеспечивают необходимую базу для обучения и тестирования искусственной нейронной сети (ИНС).

На исследуемом нефтегазовом объекте реализована система постоянного мониторинга уровня загазованности посредством стационарных газоанализаторов, предназначенных для обнаружения горючих газов. Измерительные приборы собирают информацию о концентрации газов в контролируемых зонах, а все зафиксированные случаи превышения нормы сохраняются в памяти управляющих станций, размещённых в специализированных помещениях. Тем не менее в настоящее время на объекте не внедрено ПО, которое могло бы обеспечивать комплексный экологический мониторинг атмосферы с функцией предиктивной аналитики.

Статистической фактурой для моделирования ИНС послужили замеры, полученные с оптического

абсорбционного газоанализатора СГОЭС (Стационарный газоанализатор экологичный стандартный), входящего в состав газоаналитической системы СГАЭС-ТГ ЦДНГ, в период 05.2024–06.2025 гг. При нормальной работе газоанализатора обновление показаний происходило каждые 60 с.

Часть выборки статистических параметров концентраций газов за весь период (с мая 2024 г. по июнь 2025 г.) представлена в табл. 2.

Таблица 2. Выборка из массива статистических данных по выбросам метана и пропана

Table 2. Sample from the dataset of statistical data on methane and propane emissions

Параметр/Parameter	CH_4	C_3H_8
	мг/м ³ mg/m ³	мг/м ³ mg/m ³
Среднее значение/Mean	1,92	0,48
Стандартное отклонение/Standard deviation	0,54	0,16
Минимум/Minimum	0,85	0,12
Максимум/Maximum	3,85	1,25
Медиана/Median	1,88	0,45
Коэффициент вариации/Coefficient of variation, %	28,1	33,3
Количество измерений (за весь период) Number of measurements (for the entire period)	567	567
	360	360

Концентрации CH_4 и C_3H_8 в целом находились в допустимых пределах, хотя и демонстрировали умеренную вариабельность. Наблюдались кратковременные пики концентраций, связанные с технологическими процессами, при этом корреляция между пиками концентраций газов указывает на их общие источники выбросов. Анализ временной динамики показал, что в дневной период отмечалось повышение концентраций данных веществ, в ночной период происходило снижение показателей до фоновых значений. Сезонные колебания были наиболее выражены в весенний и осенний периоды. C_3H_8 демонстрировал более резкие пики концентраций по сравнению с CH_4 с коротким периодом восстановления после выбросов и зависимостью от метеорологических условий.

Выбор модели искусственной нейронной сети

В настоящее время на нефтегазовых объектах для мониторинга состояния атмосферного воздуха в России используются такие ПО, как СЭМОС (Система экологического мониторинга окружающей среды), Merusoft Ecology, «Русь», «Мониторинг», ГИАС (Государственная информационно-аналитическая система) «Экобезопасность». Наиболее активно внедряемыми методами ИИ являются системы машинного обучения, основанные на использовании различных ИНС, которые эффективно работают с большими массивами данных и решают сложные задачи. В отличие от традицион-

ных программ, которые работают по заранее заданным алгоритмам, ИНС самостоятельно формируют алгоритмы обработки данных на основе выявленных закономерностей и значимых параметров.

Алгоритмы машинного обучения способны выявлять источники и уровни загрязнения, а также рекомендовать действия по минимизации экологических рисков, обучаясь распознавать закономерности и тенденции в данных. Принятие решений на основе информации, предоставляемой ИИ-системами, позволяет предприятиям эффективно координировать действия по снижению уровня загрязнения атмосферы [25]. Оперативность реагирования на критические изменения параметров воздушной среды повышается благодаря точности и скорости обработки поступающих данных. Преимущество ИНС заключается в минимальном количестве предварительных допущений [26], высокой точности результатов [27] и устойчивости к неопределённости данных. В современных исследованиях качества воздуха технологии ИИ стали приоритетным направлением [28], позволяя создавать более точные модели оценки и прогнозирования состояния атмосферы.

Ключевой задачей для проведения экологических исследований атмосферы является выбор оптимальной ИНС. Для обучения некоторых моделей ИИ требуется большой объем и качество информационного массива, а также весомая вычислительная мощность аппаратной инфраструктуры, в то время как другие можно обучать на меньших наборах данных с меньшими вычислительными затратами [29], поэтому выбор модели ИНС во многом зависит от требуемой информации и характера загрязнителей воздуха в данной местности. Отметим, что модель ИНС – это, по существу, архитектура ИНС, т. е. план или схема построения нейронной сети. Создание модели обусловливается сложностью исследования временных рядов фактологических данных вследствие нелинейной зависимости между характеристиками газовой воздушной среды и экологическими параметрами в части загрязнения окружающей среды. Архитектура ИНС предполагает оптимальное количество весовых коэффициентов связей (числовых параметров, определяющих силу взаимодействия между нейронами) и механизм передачи информации внутри сетевой структуры [30].

В процессе создания ПО для экологического мониторинга в рамках инвестпроекта особое внимание было уделено выбору архитектуры ИНС, так как каждый тип сети имеет свои особенности. Так, рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Network, RNN) используют механизм обратной связи, где результаты предыдущих вычислений влияют на последующие, что обеспечивает учёт

исторической информации и повышает точность прогнозирования [31]. Для разработки прототипа модели ИНС была выбрана архитектура TLRN (Time-Lagged Recurrent Neural Network) в рамках класса RNN. Такое решение обосновано двумя ключевыми достоинствами: компактностью сети при работе с временными рядами по сравнению с многослойными перцептронами и эффективной фильтрацией шумовых помех в исходных данных (табл. 3).

В целом при атмосферном моделировании необходимо создать синтетические данные (искусственно сгенерированная информация, которая имитирует реальные данные, но не создается в результате реальных событий), статистически схожие с реальными атмосферными рядами. При формировании модели важно сохранение ключевых характеристик исторических записей, включая статистические параметры и зависимости. Сгенерированные последовательности должны отражать возможные сценарии изменения показателей (концентрации компонентов) при условии схожести будущих процессов с прошлыми.

Выбор технического обеспечения

Вместе с тем качество полученных результатов зависит от достоверности фактических данных от установленных газоаналитических устройств [32–34], которые обеспечивают оперативный мониторинг концентраций компонентов в газовых средах и выполняют широкий спектр измерений: определяют состав газовой среды и количественно оценивают содержание компонентов, представляя результаты в цифровом или графическом виде. Помимо этого, газоаналитические устройства используются для своевременного обнаружения утечек, например, вызванных коррозией, что способствует продлению срока службы оборудования. Так, в США коррозионные изменения явились причиной в 35,14 % всех аварий за период 2020–2023 гг. [35]. В России более 50 % прорывов нефтепроводов происходит по причине коррозии.

Отечественные приборы характеризуются ограниченным ресурсом сенсорных элементов и повышенной чувствительностью к температурным колебаниям. Требуется регулярный метрологический контроль, а качество электропитания оказывает значительное влияние на стабильность работы. Иностранные газоаналитические системы демонстрируют высокую стоимость жизненного цикла и существенные затраты на сервисное обслуживание, при этом они не способны работать в экстремальных климатических условиях, которыми характеризуются нефтегазовые провинции Западной и Восточной Сибири и Арктической зоны.

Таблица 3. Рекуррентные нейронные сети

Table 3. Recurrent neural networks

Архитектура/Architecture	Преимущества/Advantages	Недостатки/Disadvantages
LSTM (Long Short-Term Memory)	- интеграция механизма ячейки памяти для оценки релевантности информации integration of the memory cell mechanism for assessing the relevance of information; - высокая эффективность на разнородных наборах данных/high efficiency on heterogeneous datasets; - умеренная вычислительная сложность в гибридных реализациях LSTM-RNN moderate computational complexity in hybrid LSTM-RNN implementations	- рост числа параметров при обработке длинных последовательностей/increase in the number of parameters when processing long sequences; - повышенные вычислительные затраты/increased computational costs; - риск переобучения модели/risk of model overfitting
TLRN (Time-Lagged Recurrent Neural Network)	- низкая чувствительность к шумам low sensitivity to noise; - адаптивная глубина хранения информации adaptive storage depth	требование детальной математико-статистической формализации/requirement for detailed mathematical and statistical formalization
NARX (Nonlinear Autoregressive Networks with Exogenous Inputs)	- способность устанавливать долговременные временные зависимости ability to establish long-term temporal dependencies; - наличие рекуррентных связей от выходного слоя/presence of recurrent connections from the output layer	- сложность определения оптимального порядка модели difficulty in determining the optimal model order; - ограниченная адаптивность к различным входным сигналам/limited adaptability to various input signals; - высокая вычислительная сложность/high computational complexity; - чувствительность к качеству входных данных/sensitivity to input data quality
Elman Neural Network	- наличие контекстного слоя для хранения внутренних состояний/presence of a context layer for storing internal states; - высокая чувствительность к историческим данным входных сигналов high sensitivity to historical input signal data	- чувствительность к выбору параметров обучения sensitivity to learning parameters selection; - сложности с обработкой нелинейных зависимостей challenges in handling nonlinear dependencies; - низкая масштабируемость на больших наборах данных low scalability on large datasets
ESN (Echo State Network)	- трёхслойная структура/three-layer structure; - случайная разреженная связность нейронов в резервуарном слое/random sparse connectivity of neurons in the reservoir layer; - зависимость внутренних состояний от входных данных/dependence of internal states on input data	- сложность достижения баланса между памятью и стабильностью/difficulty in achieving balance between memory and stability; - высокая чувствительность к параметрам затухания и обратной связи/high sensitivity to damping and feedback parameters; - ограниченные возможности обработки нелинейных зависимостей/limited capacity for handling nonlinear dependencies

Одной из проблем формирования массива данных является их интеграция с ИНС, так как не все измерительные системы обладают данной функцией. Успешность подключения определяется комплексом технических и функциональных характеристик приборов. Основными критериями совместности являются наличие цифрового интерфейса связи (RS-485, ModBus, HART), достаточный вычислительный потенциал и объём оперативной памяти, а также возможность обновления ПО [36]. Ключевым вектором совершенствования газоаналитического оборудования является использование микросистемных технологий и нанотехнологий, в том числе создание компактных сенсорных систем типа «электронных носов» для распознавания сложных газовых смесей в экологическом мониторинге [37].

Были рассмотрены предлагаемые технологические решения в области экологического мониторинга, существующие на современном российском рынке. Они представлены как собственными разработками ведущих нефтегазовых компаний в сфере информацион-

ных технологий (Газпром, НОВАТЭК, ЛУКОЙЛ, Роснефть), так и конкурентными решениями от сторонних поставщиков оборудования. Отечественные производители предлагают специализированное оборудование, ПО и комплексные системы экологического контроля. Из них наиболее значимыми на отечественном рынке являются: URUS, СервисСофт, Научно-Производственная Фирма «ДИЭМ».

Но быстрое развитие технологий ИИ приводит к тому, что многие существующие решения быстро устаревают, не успевая адаптироваться к новым требованиям, с учетом того, что приведённые выше компании используют традиционные аналитические и численные методы моделирования. Помимо этого, климатические особенности и специфика промышленных объектов требуют специализированных решений, которые не всегда доступны в существующих продуктах. ИИ-системы часто не обеспечивают достаточной точности в анализе данных, что может приводить к ошибкам в принятии решений.

Интеграция собственного ПО планируется с уже установленным на нефтегазовом объекте комплексом измерительных приборов СГАЭС-ТГ, что позволяет максимально эффективно использовать имеющиеся технические ресурсы. Существующая инфраструктура коммуникаций и монтажа останется неизменной, что существенно упростит процесс внедрения технологии. Важным преимуществом является то, что при модернизации не нарушится заводская калибровка и сертификация приборов, при этом внедрение алгоритмов ИИ существенно повысит точность измерений и скорость реагирования системы на изменения концентраций CH_4 и C_3H_8 , сохраняя все преимущества уже установленного оборудования.

Проблематика внедрения технологий ИИ в экологический мониторинг

В процессе создания модели экологического мониторинга на основе ИНС с использованием данных оптического абсорбционного газоанализатора СГОЭС выявлены проблемные аспекты, связанные с особенностями исходных данных. Периодичность дискретизации данных (интервал 60 секунд) в некоторых случаях приводила к потере значимых временных паттернов.

Помимо этого, важным фактором, определяющим качество входных данных для нейросетевого моделирования, являются метрологические характеристики используемых стационарных газоанализаторов. Основная приведённая погрешность измерений не превышает $\pm 5\%$ от нижнего концентрационного предела распространения пламени (минимальная концентрация горючего газа в воздухе, при которой ещё возможно его воспламенение и дальнейшее горение), при этом дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры окружающей среды на каждые 10°C в рабочем диапазоне (от -60 до $+85^\circ\text{C}$), составляет не более 0,5 долей основной [38].

Конструктивной особенностью СГОЭС является модульная замена сенсорных элементов без необходимости демонтажа всего прибора. Средний цикл эксплуатации сенсорного модуля составляет 12–18 месяцев, после чего он подлежит замене при проведении поверки. При этом срок службы всего газоанализатора – около 10 лет, по завершении срока службы необходима полная замена устройства для сохранения метрологической надёжности.

Помимо этого, существовала необходимость в предварительной обработке данных для устранения шумовых компонентов и учет потенциальных систематических погрешностей измерительного оборудования. Для устранения шумовых компонентов использовался метод медианной фильтрации, так как он сохраняет резкие переходы и важные особенности сигнала, а также легко программируется

и не требует сложных вычислений. Для выявления и устранения трендов погрешностей применялся регрессионный анализ. На данном этапе создания модели происходит подбор калибровочных коэффициентов, таких как температурный (учитывает влияние температуры на показания прибора), линейности (корректирует нелинейность отклика сенсора), чувствительности (отражает реальную чувствительность прибора к определяемым компонентам), нулевой (корректирует фоновые показания прибора) и дрейфовый (отражает постепенное изменение показаний прибора со временем). А также необходимо произвести учет температурных зависимостей работы измерительного комплекса и специфики калибровки и настройки газоанализатора СГОЭС.

Помимо обозначенных выше, уже встреченных на начальном этапе сложностей реализации, возникли следующие технико-технологические моменты, увеличивающие длительность внедрения ИНС.

1. Проблема недостатка фактологической статистики, несмотря на наличие исторических архивов, что не позволяет создать надёжную модель ИНС с возможностью точной предиктивной аналитики. Для повышения надёжности рассматривается создание централизованных хранилищ измеренных и переданных показателей. А на данном этапе применяются методы дообучения на небольших выборках и использования синтетических данных. После создания и обучения прототипа модели по имеющимся данным с одного газоанализатора для ее дообучения планируется использование и обработка показаний с других газоаналитических устройств, установленных в пределах объекта исследования.
2. Качество фактологической информации, получаемой с газоанализаторов, ограничено её неполнотой, наличием ошибок и недостаточной структурированностью. Решение данной проблемы видится в применении статистического анализа, который выявляет наличие пропусков, аномальных значений и несоответствий в метаданных, что требует применения комплексных методов предобработки и валидации информации.
3. Наличие вычислительных ресурсов соответствующей мощности, необходимых для разработки и обучения сложных моделей. Для преодоления этого барьера планируется использовать облачные платформы и методы оптимизации модели, разрабатывать легковесные архитектуры и внедрять распределённые вычисления (технология обработки данных, при которой задачи распределяются между несколькими вычислительными узлами, объединёнными в сеть).

4. Сложность интеграции. Разрабатываемая система на основе ИНС будет работать как дополнительный аналитический модуль, который получает данные от СГАЭС-ТГ через доступные интерфейсы (такие как RS-485 или аналоговый выход 4-20 мА). При этом важно понимать, что прямое вмешательство во встроенное ПО СГАЭС-ТГ недопустимо, поскольку это может привести к нарушению работы всей системы и потере гарантии. Для успешной реализации интеграции необходимо разработать специальный модуль-посредник, который будет осуществлять сбор данных с СГАЭС-ТГ и обеспечивать их корректную передачу в вашу систему. При этом СГАЭС-ТГ продолжит выполнять свои основные функции, а ПО будет обрабатывать полученные данные с помощью алгоритмов ИИ, предоставляя дополнительные возможности анализа и прогнозирования. Для обеспечения совместимости с новыми газоаналитическими устройствами модульная архитектура в разрабатываемом ПО будет позволять адаптировать алгоритмы калибровки и интерфейсы передачи данных без изменения базовой нейросетевой модели.

Обсуждение

Также были предварительно оценены перспективы тиражирования разрабатываемого ПО. Рассчитанные показатели экономической эффективности демонстрируют высокую эффективность при реализации проекта в 2026–2031 гг. Чистый дисконтированный доход при ставке дисконтирования 23 % составляет более 19 млн р. Капитальные вложения окупаются через ~3,9 лет. Социальная значимость проекта заключается в росте потребности в квалифицированном персонале: к концу 2031 г. будет создано 47 новых рабочих мест с полной занятостью, что поспособствует улучшению ситуации на рынке труда.

Вместе с тем хотелось бы отметить двойственный характер влияния ИИ-решений. С одной стороны, они способствуют борьбе с глобальным потеплением, но, с другой стороны, создают ряд негативных последствий, среди которых выделим существенные, такие как:

- рост энергозатрат на вычислительные процессы, связанные с обучением и эксплуатацией моделей ИИ [39], несмотря на то, что часть энергоресурсов, используемых для их работы, может производиться из альтернативных источников энергии [40];
 - использование редкоземельных элементов и других невозобновляемых ресурсов при производстве серверного оборудования и систем хранения данных [41];
 - образование электронных отходов, в составе которых часто присутствуют опасные вещества, такие как ртуть и свинец, что создаёт дополнительные сложности при их утилизации и переработке;
 - рост водопотребления, необходимого для нормального функционирования ИИ-сервисов.
- Решение данных проблем по минимизации экологического воздействия технологий ИИ видится в реализации следующих мероприятий:
- разработке унифицированных методик оценки воздействия ИИ-систем на окружающую среду, поскольку в настоящее время наблюдается дефицит достоверных данных в этой области;
 - внедрении государственного регулирования, обязывающего компании раскрывать информацию о прямых экологических последствиях производимых ИИ-решений и услуг;
 - повышении энергоэффективности ИИ-алгоритмов технологическими компаниями, внедрении систем водооборота и рециклинга компонентов;
 - стимулировании перехода центров обработки данных на возобновляемые источники энергии и внедрении механизмов компенсации углеродного следа [42];
 - интеграции нормативных требований по регулированию технологий ИИ в существующую структуру экологического законодательства, что позволит создать эффективную систему мониторинга и контроля окружающей среды.
- Таким образом, в современных условиях актуализируется необходимость проведения научных исследований в области разработки и экспериментальной верификации инновационных подходов к прогнозированию антропогенных воздействий на атмосферные экосистемы с применением методов ИИ.

Заключение

На основании вышеизложенного можно резюмировать следующее.

1. Выявлено, что совершенствование экологического мониторинга на основе технологий ИИ в рамках стратегической задачи цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли сдерживается триадой факторов в части качества информационной базы, измерительных устройств, пригодных для специфических географо-климатических условий, и имеющегося технического обеспечения ИИ.
2. Обозначена двойственность влияния технологий ИИ, которые, с одной стороны, являются превентивным инструментом в охране окружающей среды, а с другой стороны, их внедрение косвенно способствует загрязнению, для нивелирования которого необходим комплекс мероприя-

тий в части государственного регулирования для повышения инициативности нефтегазовых компаний по технико-технологическому совершенствованию экологического мониторинга.

3. Обосновано, что разработка собственных программных продуктов, несмотря на длительность

внедрения в связи с поиском технико-технологических и IT-решений, является перспективным бизнес-проектом, возможным для тиражирования на других нефтегазовых объектах со схожими географо-климатическими условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Paris Agreement. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (дата обращения: 19.08.2025).
2. United Nations Environment Programme (2024). Emissions Gap Report 2024: no more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. URL: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404> (дата обращения: 19.08.2025).
3. Указ Президента РФ от 06.08.2025 № 547 «О сокращении выбросов парниковых газов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202508060001> (дата обращения: 19.08.2025).
4. Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009> (дата обращения: 19.08.2025).
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2021 г. № 3496-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования». URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112140019> (дата обращения: 29.08.2025).
6. Artificial intelligence in environmental monitoring: advancements, challenges, and future directions / D.B. Olawade, O.Z. Wada, A.O. Ige, B.I. Egbewole, A. Olojo, B.I. Oladapo // Hygiene and Environmental Health Advances. – 2024. – Vol. 12. – Article 100114. DOI: 10.1016/j.heha.2024.100114.
7. Systematic attribution of heatwaves to the emissions of carbon majors / Y. Quilcaille, L. Gudmundsson, D. Schumacher, T. Gasser, R. Heede, C. Heri, Q. Lejeune, S. Nath, W. Thiery, C. Schleussner, S. Seneviratne // Nature Portfolio. – 2024. – Preprint. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4796598/v1.
8. InfluenceMap. An independent think tank producing data-driven analysis on how business and finance are impacting the climate crisis: official website. Carbon Majors: 2023 Data Update. URL: <https://influencemap.org/briefing/The-Carbon-Majors-Database-2023-Update-31397> (дата обращения: 19.08.2025).
9. Earth.Org – Environmental News: official website. 36 Fossil Fuel Giants Responsible for Half of World's CO₂ Emissions: Report. URL: <https://earth.org/36-fossil-fuel-giants-responsible-for-half-of-worlds-co2-emissions-report/> (дата обращения: 19.08.2025).
10. MarketsandMarkets. Revenue Impact and Advisory Company: official website. Environmental Monitoring Market: Growth, Size, Share, and Trends. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/environmental-monitoring-market-216846315.html> (дата обращения: 19.08.2025).
11. MarkWide Research. Market Research Company: official website. Environmental Monitoring Market Analysis – Industry Size, Share, Research Report, Insights, Covid-19 Impact, Statistics, Trends, Growth and Forecast 2025–2034. URL: <https://markwideresearch.com/environmental-monitoring-market/> (дата обращения: 19.08.2025).
12. Первый ежегодный Национальный доклад о климатической повестке в России. URL: <https://ecfor.ru/publication/natsionalnyj-doklad-o-klimaticheskoy-povestke-v-rossii/> (дата обращения: 19.08.2025).
13. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. Официальная статистика. Окружающая среда. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 19.08.2025).
14. Шарф И.В., Пельменёва А.А. Система льготирования нефтегазовых компаний в контексте реализации мировой климатической повестки // Горный журнал. – 2021. – № 12. – С. 26–31. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.05.
15. ПАО «Газпром»: официальный сайт. Система экологического менеджмента. URL: <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/ems/> (дата обращения: 19.08.2025).
16. РОСНЕФТЬ: официальный сайт. Роснефть: вклад в реализацию целей ООН в области устойчивого развития. URL: https://rosneft.ru/Investors/Rosneft_vklad_v_realizaciju_celej_OON/ (дата обращения: 19.08.2025).
17. ПАО НОВАТЭК: официальный сайт. Инвесторам и акционерам. URL: <https://www.novatek.ru/ru/investors/> (дата обращения: 19.08.2025).
18. Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В. Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 216–228. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048.
19. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Environmental monitoring and characterization. – N.Y.: Academic Press, 2004. – 410 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0.
20. Climate and environmental monitoring for decision making / P. Ceccato, K. Fernandes, D. Ruiz, E. Allis // Earth Perspectives. – 2014. – Vol. 1. – Article 16. DOI: 10.1186/2194-6434-1-16.
21. Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: a case study in tropical region, Malaysia / M. Hameed, S.S. Sharqi, Z.M. Yaseen, H.A. Afan, A. Hussain, A. Elshafie // Neural Computing and Applications. – 2017. – Vol. 28. – P. 893–905. DOI: 10.1007/s00521-016-2404-7.
22. United States Environmental Protection Agency: official website. Monitoring and evaluating nonpoint source watershed projects. URL: <https://www.epa.gov/nps/guidance-monitoring-and-evaluating-nonpoint-source-watershed-projects> (дата обращения: 19.08.2025).
23. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: a perspective / E.M. Ditria, C.A. Buelow, M. Gonzalez-Rivero, R.M. Connolly // Frontiers in Marine Science. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.3389/fmars.2022.918104.

24. Analysis of environmental factors using AI and ML methods / M.A. Haq, A. Ahmed, I. Khan, J. Gyani, A. Mohamed, E.A. Attia, P. Mangan, D. Pandi // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – Article 13267. DOI: 10.1038/s41598-022-16665-7.
25. Chowdhury M., Sadek A.W. Advantages and limitations of artificial intelligence // *Artificial intelligence applications to critical transportation issues*. – Washington: The National Academies Press, 2012. – Iss. 6. – P. 360–375.
26. GIS and artificial neural network-based water quality model for a stream network in the Upper Green River Basin, Kentucky, USA / J. Annala, O.W. Meier, A.J. Meier, S. Grubbs // *Journal of Environmental Engineering*. – 2015. – Vol. 141. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000801.
27. Water quality prediction based on recurrent neural network and improved evidence theory: a case study of Qiantang River, China / L. Li, P. Jiang, H. Xu, G. Lin, D. Guo, H. Wu // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – Vol. 26. – P. 19879–19896. DOI: 10.1007/s11356-019-05116-y.
28. Zhang L., Zou Z., Shan W. Development of a method for comprehensive water quality forecasting and its application in Miyun reservoir of Beijing, China // *Journal of Environmental Sciences*. – 2017. – Vol. 56. – P. 240–246. DOI: 10.1016/j.jes.2016.07.017.
29. Database meets artificial intelligence: a survey / X. Zhou, C. Chai, G. Li, J. Sun // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. – 2020. – Vol. 34. – Iss. 6. – P. 1096–1116. DOI: 10.1109/TKDE.2020.2994641.
30. Maier H.R., Dandy G.C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications // *Environmental Modelling & Software*. – 2000. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 101–124. DOI: 10.1016/S1364-8152(99)00007-9.
31. Prediction of pollution loads in the Geum River upstream using the recurrent neural network algorithm / H. Lim, H. An, H. Kim, J. Lee // *Korean Journal of Agricultural Science*. – 2019. – Vol. 45. – Iss. 1. – P. 67–78. DOI: 10.7744/kjoas.20180085.
32. Guolei W. Environmental pollution monitoring system based on gas water quality sensors and visual recognition // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 26. – Article 105524. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105524.
33. UAV-based real-time air quality monitoring and prediction using machine learning approach / H.Ch. Hsu, G.B. Tarekgn, M.E. Getnet, K.P. Yu, L.Ch. Tai // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2025. – Vol. 12. – Iss. 14. – P. 27915–27928. DOI: 10.1109/IJOT.2025.3564791.
34. Towards better process management in wastewater treatment plants: process analytics based on SHAP values for tree-based machine learning methods / D. Wang, S. Thunell, U. Lindberg, L. Jiang, J. Trygg, M. Tysklind // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 301. – Article 113941. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113941.
35. Исаев Э., Гонопольский А., Ерохин С. Исследование факторов и показателей аварийности магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов «Транснефти» и мировых компаний-аналогов // *Энергетическая политика*. – 2024. – № 8. – С. 24–47.
36. Chowdhury M.A.Z., Oehlschlaeger M.A. Artificial intelligence in gas sensing: a review // *ACS Sensors*. – 2015. – Vol. 10. – Iss. 3. – P. 1538–1563. DOI: 10.1021/acssensors.4c02272.
37. Кечкина Н.И., Зубков И.Л. Газоаналитические системы на основе твердотельных сенсоров // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4281> (дата обращения: 19.08.2025).
38. Руководство по эксплуатации газоанализаторов СГОЭС, СГОЭС-2. Методика поверки. – М.: ООО «ИннокА-Групп», 2021. – 72 с. URL: <https://innoka-group.ru/upload/iblock/7dc/Руководство%20по%20эксплуатации%20СГОЭС%2C%20СГОЭС-2%20методика%20поверки.pdf> (дата обращения: 29.08.2025).
39. Artificial intelligence in the NHS: climate and emissions / P.S. Bloomfield, P. Clutton-Brock, E. Pencheon, J. Magnusson, K. Karpathakis // *The Journal of Climate Change and Health*. – 2021. – Vol. 4. – Article 100056. DOI: 10.1016/j.joclim.2021.100056.
40. A survey of challenges and solutions for the integration of renewable energy in datacenters / G. Rostirolla, L. Grange, T. Minh-Thuyen, P. Stolf, J.M. Pierson, G. Da Costa, G. Baudic, M. Haddad, A. Kassab, J.M. Nicod, L. Philippe, V. Rehn-Sonigo, R. Roche, B. Celik, S. Caux, J. Lecuire // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 155. – Article 111787. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111787.
41. Gundeti R., Vuppala K., Kasireddy V. The future of AI and environmental sustainability: Challenges and opportunities // *Exploring Ethical Dimensions of Environmental Sustainability and Use of AI*. – Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2024. – P. 346–371. DOI: 10.4018/979-8-3693-0892-9.ch017.
42. Филимонова И.В., Комарова А.В., Новиков А.Ю. Потенциал экономики выбросов парниковых газов в энергетике за счёт замещающей способности энергоресурсов // *Экология промышленного производства*. – 2025. – № 2 (130). – С. 18–28.

Информация об авторах

Артур Ильдарович Нурғалиев, магистрант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Ain10@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3751-5177>

Алена Александровна Назарова, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Aan54@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4534-9067>

Ирина Валерьевна Шарф, доктор экономических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Irina_sharf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1333-1234>

Поступила в редакцию: 29.08.2025

Поступила после рецензирования: 04.09.2025

Принята к публикации: 17.09.2025

REFERENCES

1. *The Paris Agreement*. Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed 19 August 2025).
2. *United Nations Environment Programme (2024). Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. Nairobi. Available at: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404> (accessed 19 August 2025).
3. *Order of the Government of the Russian Federation of August 6, 2025 No. 547 «On reducing greenhouse gas emissions»*. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202508060001> (accessed 19 August 2025).
4. *Order of the Government of the Russian Federation of October 26, 2023 No. 812 «On approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation»*. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009> (accessed 19 August 2025).
5. *Order of the Government of the Russian Federation of December 8, 2021 No. 3496-r «On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of ecology and nature management»*. (In Russ.) Available at: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112140019> (accessed 29 August 2025).
6. Olawade D.B., Wada O.Z., Ige A.O., Egbewole B.I., Olojo A., Oladapo B.I. Artificial intelligence in environmental monitoring: advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 2024, vol. 12, article 100114. DOI: 10.1016/j.heha.2024.100114.
7. Quilcaille Y., Gudmundsson L., Schumacher D., Gasser T., Heede R., Heri C., Lejeune Q., Nath S., Thierry W., Schleussner C., Seneviratne S. Systematic attribution of heatwaves to the emissions of carbon majors. *Nature Portfolio*, 2024, preprint. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4796598/v1.
8. *InfluenceMap. An independent think tank producing data-driven analysis on how business and finance are impacting the climate crisis: official website. Carbon Majors: 2023 Data Update*. Available at: <https://influencemap.org/briefing/The-Carbon-Majors-Database-2023-Update-31397> (accessed 19 August 2025).
9. *Earth.Org – Environmental News: official website. 36 Fossil Fuel Giants Responsible for Half of World's CO2 Emissions: Report*. Available at: <https://earth.org/36-fossil-fuel-giants-responsible-for-half-of-worlds-co2-emissions-report/> (accessed 19 August 2025).
10. *MarketsandMarkets. Revenue Impact and Advisory Company: official website. Environmental Monitoring Market: Growth, Size, Share, and Trends*. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/environmental-monitoring-market-216846315.html> (accessed 19 August 2025).
11. *MarkWide Research. Market Research Company: official website. Environmental Monitoring Market Analysis – Industry Size, Share, Research Report, Insights, Covid-19 Impact, Statistics, Trends, Growth and Forecast 2025–2034*. Available at: <https://markwideresearch.com/environmental-monitoring-market/> (accessed 19 August 2025).
12. *The first annual National Report on the Climate Agenda in Russia*. (In Russ.) Available at: <https://ecfor.ru/publication/natsionalnyj-doklad-o-klimaticheskoy-povestke-v-rossii/> (accessed 19 August 2025).
13. *Federal State Statistics Service: official website. Official statistics. Environment*. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed 19 August 2025).
14. Sharf I.V., Pelmeneva A.A. Tax allowance of oil and gas companies in the context of world climate agenda. *Gornyi Zhurnal*, 2021, no. 12, pp. 26–31. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2021.12.05.
15. *PAO Gazprom: official website. Environmental Management System*. (In Russ.) Available at: <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/ems/> (accessed 19 August 2025).
16. *ROSNEFT: official website. Rosneft: contribution to the implementation of the UN Sustainable Development Goals*. (In Russ.) Available at: https://rosneft.ru/Investors/Rosneft_vklad_v_realizaciju_celej_OON/ (accessed 19 August 2025).
17. *PAO NOVATEK: official website. Investor Relations*. (In Russ.) Available at: <https://www.novatek.ru/ru/investors/> (accessed 19 August 2025).
18. Karsakov A.V., Zyatikov P.N., Sharf I.V. Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 216–228. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048.
19. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. *Environmental monitoring and characterization*. N.Y., Academic Press, 2004. 410 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0.
20. Ceccato P., Fernandes K., Ruiz D., Allis E. Climate and environmental monitoring for decision making. *Earth Perspectives*, 2014, vol. 1, article 16. DOI: 10.1186/2194-6434-1-16.
21. Hameed M., Sharqi S.S., Yaseen Z.M., Afan H.A., Hussain A., Elshafie A. Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: a case study in tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications*, 2017, vol. 28, pp. 893–905. DOI: 10.1007/s00521-016-2404-7.
22. *United States Environmental Protection Agency: official website. Monitoring and evaluating nonpoint source watershed projects*. Available at: <https://www.epa.gov/nps/guidance-monitoring-and-evaluating-nonpoint-source-watershed-projects> (accessed 19 August 2025).
23. Ditria E.M., Buelow C.A., Gonzalez-Rivero M., Connolly R.M. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: a perspective. *Frontiers in Marine Science*, 2022, vol. 9. DOI: 10.3389/fmars.2022.918104.
24. Haq M.A., Ahmed A., Khan I., Gyani J., Mohamed A., Attia E.A., Mangan P., Pandi D. Analysis of environmental factors using AI and ML methods. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, article 13267. DOI: 10.1038/s41598-022-16665-7.
25. Chowdhury M., Sadek A.W. Advantages and limitations of artificial intelligence. *Artificial intelligence applications to critical transportation issues*. Washington, The National Academies Press, 2012. Iss. 6, pp. 360–375.
26. Anmala J., Meier O.W., Meier A.J., Grubbs S. GIS and artificial neural network-based water quality model for a stream network in the Upper Green River Basin, Kentucky, USA. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, vol. 141. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000801.

27. Li L., Jiang P., Xu H., Lin G., Guo D., Wu H. Water quality prediction based on recurrent neural network and improved evidence theory: a case study of Qiantang River, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 19879–19896. DOI: 10.1007/s11356-019-05116-y.
28. Zhang L., Zou Z., Shan W. Development of a method for comprehensive water quality forecasting and its application in Miyun reservoir of Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, vol. 56, pp. 240–246. DOI: 10.1016/j.jes.2016.07.017.
29. Zhou X., Chai C., Li G., Sun J. Database meets artificial intelligence: a survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2020, vol. 34, Iss. 6, pp. 1096–1116. DOI: 10.1109/TKDE.2020.2994641.
30. Maier H.R., Dandy G.C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, 2000, vol. 15, Iss. 1, pp. 101–124. DOI: 10.1016/S1364-8152(99)00007-9.
31. Lim H., An H., Kim H., Lee J. Prediction of pollution loads in the Geum River upstream using the recurrent neural network algorithm. *Korean Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 45, Iss. 1, pp. 67–78. DOI: 10.7744/kjoas.20180085.
32. Guolei W. Environmental pollution monitoring system based on gas water quality sensors and visual recognition. *Results in Engineering*, 2025, vol. 26, article 105524. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105524.
33. Hsu H.Ch., Tarekegn G.B., Getnet M.E., Yu K.P., Tai L.Ch. UAV-based real-time air quality monitoring and prediction using machine learning approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, vol. 12, Iss. 14, pp. 27915–27928. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3564791.
34. Wang D., Thunell S., Lindberg U., Jiang L., Trygg J., Tysklind M. Towards better process management in wastewater treatment plants: process analytics based on SHAP values for tree-based machine learning methods. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 301, article 113941. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113941.
35. Isaev E., Gonopolsky A., Erokhin S. Study of factors and indicators of accidents in the main transport of oil and oil products «Transneft» and global similar companies. *Energy Policy*, 2024, no. 8, pp. 24–47. (In Russ.)
36. Chowdhury M.A.Z., Oehlschlaeger M.A. Artificial intelligence in gas sensing: a review. *ACS Sensors*, 2015, vol. 10, Iss. 3, pp. 1538–1563. DOI: 10.1021/acssensors.4c02272.
37. Kechkina N.I., Zubkov I.L. Gas analysis system based on solid-state sensors. *Engineering Journal of Don*, 2017, no. 2. (In Russ.) Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4281> (accessed 19 August 2025).
38. Operating manual for gas analyzers SGOES, SGOES-2. Calibration procedure. Moscow, Innoka-Group LLC, 2021, 72 p. (In Russ.) Available at: <https://innoka-group.ru/upload/iblock/7dc/Руководство%20по%20эксплуатации%20СГОЭС%20С%20СГОЭС-2%20методика%20поверки.pdf> (accessed 29 August 2025).
39. Bloomfield P.S., Clutton-Brock P., Pencheon E., Magnusson J., Karpathakis K. Artificial Intelligence in the NHS: Climate and Emissions. *The Journal of Climate Change and Health*, 2021, vol. 4, article 100056. DOI: 10.1016/j.joclim.2021.100056.
40. Rostirolla G., Grange L., Minh-Thuyen T., Stolf P., Pierson J.M., Da Costa G., Baudic G., Haddad M., Kassab A., Nicod J.M., Philippe L., Rehn-Sonigo V., Roche R., Celik B., Caux S., Lecuivre J. A survey of challenges and solutions for the integration of renewable energy in datacenters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 155, article 111787. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111787.
41. Gundeti R., Vuppala K., Kasireddy V. The future of AI and environmental sustainability: Challenges and opportunities. *Exploring Ethical Dimensions of Environmental Sustainability and Use of AI*. Hershey, PA, IGI Global Scientific Publ., 2024. pp. 346–371. DOI: 10.4018/979-8-3693-0892-9.ch017.
42. Filimonova I.V., Komarova A.V., Novikov A.Yu. The potential for saving greenhouse gas emissions in the energy sector due to the replacement capacity of energy resources// *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2025, no. 2 (130), pp. 18–28. (In Russ.).

Information about the authors

Artur I. Nurgaliev, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Ain10@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3751-5177>

Alena A. Nazarova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Aan54@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4534-9067>

Irina V. Sharf, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Irina_sharf@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1333-1234>

Received: 29.08.2025

Revised: 04.09.2025

Accepted: 17.09.2025