

Модель горного инженерного образования XXI века

В. С. ЛИТВИНЕНКО ☐

доктор технических наук, профессор, ректор,

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия

✉ rectorat@spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Litvinenko V. S. A model of mining engineering education for the 21st century. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 2, pp. 603–615.
DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-603-615.

Аннотация. Спрос на минеральное сырье, состояние горнодобывающего сектора и современное качество подготовки горных инженеров связаны между собой и представляют одну из продолжающихся дискуссий о взаимоотношении между либерализацией торговли, экологической сбалансированностью и устойчивостью развития всего человечества. На фоне роста спроса на минеральное сырье недропользование подвергается критике «зелеными» как воздействие на природу, способствующее изменению климата. Критический дефицит инженерных кадров, дискредитация современной добывающей отрасли, сокращение программ инженерной подготовки в технических университетах, снижение у молодежи мотивации к работе в отрасли требуют срочной активизации совершенствования инженерного образования в странах с промышленной экономикой. В статье приведены результаты государственного эксперимента по совершенствованию содержания и качества высшего инженерного образования.

Ключевые слова: инженерное метаобразование, аналоговое мышление, мировоззрение, цель в образовании, педагогический наставник, инженерные компетенции, образовательная программа.

A model of mining engineering education for the 21st century

Vladimir S. LITVINENKO ☐

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Rector,

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia,

✉ rectorat@spmi.ru

Abstract. The demand for minerals, the state of the mining sector and the current quality of mining engineers training are interlinked and are the topic of the ongoing debates on the relationship between trade liberalization, environmental sustainability and the sustainable development of the mankind. While there is an increasing demand for minerals, there is a marked decline of interest to Earth sciences in general, with the "green agenda" claiming the subsoil use as impacting nature and contributing to climate change. The critical shortage of engineering personnel, discreditation of the modern mining industry, reduction of engineering curricula in technical universities, weakening motivation of young people to work in the industry require urgent mainstreaming of engineering education upgrading in industrial economies. The article presents the results of the official experiment to improve the content and quality of higher engineering education.

Introduction. The demand for minerals, the state of the mining sector and the current quality of mining engineers training are interlinked and are the topic of the ongoing debates on the relationship between trade liberalization, environmental balance and the sustainable development of the mankind. While there is an increasing demand for minerals the "green agenda" has been claiming the subsoil use as impacting nature and contributing to climate change. The critical shortage of engineering personnel, discreditation of the modern mining industry, reduction of engineering curricula in technical universities, weakening motivation of young people to work in the industry require urgent mainstreaming of engineering education upgrading in industrial economies. **Purpose of the research.** One of our goals is to invite specialists to discuss and develop an optimal model of pedagogical approach to engineering education, combining the continuity of generations, skills and new forms of knowledge generation and motivation for self-fulfillment and work in the specialty. **Methods.** The experiment, involving 2150 students in 2023 and expanding to 2180 annually, aims to improve the quality and content of engineering education, foster domestic values, and introduce innovative technologies. **Results.** The article presents the results of the official experiment to improve the content and quality of higher engineering education. A methodological approach to the implementation of educational programs within the framework of the experiment ("Pilot Project") has been formulated.

Conclusion. Creating a model of higher engineering education programs, we assumed that the content of engineering meta-education solving the problems of the state sovereignty, depends on the perceptions, needs and ideals that exist in a particular socio-cultural space, and should maintain and develop its foundations. One of our goals is to invite specialists to discuss and develop an optimal model of pedagogical approach to engineering education, combining the continuity of generations, skills and new forms of knowledge generation and motivation for self-fulfillment and work in the specialty.

Keywords: engineering meta-education, analogic thinking, worldview, goal in education, pedagogical mentor, engineering competencies, educational program.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© V.S. Litvinenko, 2025. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

Введение

Современная цивилизация существует благодаря использованию добытых из недр Земли полезных ископаемых, их значение для сегодняшней экономики рассмотрено во многих публикациях [1, 2]. Сегодня технический прогресс в сфере горного производства во многом связан с развитием физико-химических технологий [3], наиболее гуманных по отношению к природе [4]. Машинная технология в горном производстве будет заменена на высший формат индустриализации производства — безмашинную технологию добычи. Моделью таких технологий являются сложнейшие природные геологические глубинные процессы генезиса месторождений [5]. Сегодня уже отрабатываются многие месторождения, находящиеся на больших глубинах [6]. Используются высокотехнологичные методы путем физического или химического воздействия на горный массив, размывая, растворяя, выщелачивая породу, и вместе с полезным для потребления ископаемым как минеральное сырье, извлекаются на поверхность через скважину. Как и в других отраслях, в горнодобывающей промышленности происходит интеллектуальная революция [7], которая внедряет в горное производство интеллект для успешного сочетания автоматизации, природоподобных методов и компьютерных технологий [8].

Ученые из Горной школы Колорадо, одного из ведущих университетов, готовящих кадры для горной промышленности, своими исследованиями убедительно показали, что наша цивилизация потребляет все больше ресурсов, особенно из-за планируемого планетарного энергоперехода, но при этом существует огромный дефицит специалистов [9]. Горная отрасль утратила свой блеск и привлекательность [9, 10] для нового поколения. Заметно упал и интерес к науке о Земле в целом. Без материалов, которые добываются в земной коре, цивилизация не может развиваться, как и без стабильной работы горнодобывающего сектора мировой экономики, — это фундаментальное основание для дальнейшего развития.

Дефицит квалифицированных кадров можно смело назвать критическим уже сейчас [11]. А учитывая постоянный рост среднего возраста действующих квалифицированных инженеров, он кажется угрожающим [12]. Проблема подготовки квалифицированных горных инженеров является актуальной проблемой не только для России, США, Канады, Австралии, Евросоюза, но и других стран [9, 13, 14]. Причин ее возникновения и превращения в один из наиболее серьезных вызовов современности — множество. Одной из причин является сознательная дискредитация современной добывающей отрасли со стороны стран с постиндустриальной экономикой, сокращение образовательных программ подготовки инженеров в технических университетах, связанных с горными технологиями, машиностроением и металлургией. Минеральные ресурсы — это природный капитал для всех стран, имеющих их в границах своего государства. Но, чтобы превратить его в социальный, человеческий и реальный, необходим национальный инженерный корпус специалистов с настоящими фундаментальными знаниями, закрепленными производственными навыками и опытом.

Санкт-Петербургский горный университет [15] реализует свою новую образовательную модель уже третий год [16]. По ней обучается более 4 тысяч студентов. В этом году в старейший технический вуз страны поступят еще 2,5 тысячи абитуриентов. Через 5–6 лет они выйдут из стен вуза с дипломами инженера, за которыми будет стоять принципиально новый подход к образованию. Вуз готовит людей, способных осуществлять все виды профессиональной деятельности, определяемые образовательным стандартом по направлению или специальности. Кроме того, они будут владеть как минимум двумя рабочими специальностями и 8-ю дополнительными профессиональными компетенциями. От 3 до 8 % студентов, освоивших курс «Основы формирования новых знаний», получивших опыт исследовательской работы в лабораториях в составе научных групп, могут претендовать на второй диплом — «Инженер-исследователь» после защиты на Научном совете вуза.

Методологию освоения образовательной программы мы строили с учетом этих предпосылок. Предусматривается четкое целеполагание: устремления каждой отдельной личности должны быть увязаны с общим вектором развития государства. Через уважение к специальности, обретение широкого мировоззрения в своей области деятельности, в том числе понимание передовых научных достижений. Преподаватель, как субъект этой цели, взаимодействует со студентом совместно с производственными и педагогическими наставниками. Только в этом случае эта работа будет системной.

Диплом российского инженера нового качества будет «весить» несравненно больше, чем нынешний. Понятно, что и выпуск таких инженеров в количественном отношении в целом по стране неизбежно сократится. И это будет не отходом от идеи повышения доступности высшего образования, а преодолением его девальвации. Существенная часть студенческого потока пополнит ряды качественного среднего профессионального образования, перед которым индустриализация ставит свои важные задачи.

Цель работы: проведение оценки состояния качества и содержания инженерного образования; создание оптимальной модели образовательной программы подготовки инженеров, возвращения интереса студентов в образовательный процесс по специальности, отечественным смыслам и методам, другим инновационным образовательным технологиям.

Методы и материалы работы

Для разработки мероприятий по коренному улучшению высшего инженерного образования было предложено использовать метод факторных моделей. Собранные факты систематизировались с помощью простейших абстракций, позволяющих соединить отдельные элементы, влияющие на качество подготовки кадров, как составную часть всего образовательного процесса. Это позволяет глубже синтезировать полученные результаты о факторах, влияющих на качество образовательной деятельности университета. Учитывалось, что собранные из опубликованных источников и полученные эмпирические результаты в отдельных случаях не способны иметь однозначное решение. В этих случаях были использованы контрафактивные суждения.

В методологическом подходе использовались механизмы причинного анализа [17], связывающие полученные данные со знанием причин, чтобы получить научно прозрачные и математически точные ответы. Причинная модель представлена диаграммой причинности и логическим утверждением. Еще одно преимущество, которое есть у причинной модели, и отсутствует в интеллектуальном анализе данных и глубинном обучении, — это способность к адаптации. Методология исследования учитывает, что полученные данные соединены сложными причинно-следственными отношениями и объяснением причин, составляющих основу полученных знаний для выработки мероприятий по развитию качества инженерного образования. При этом многие факторы и закономерности, влияющие на показатели, находятся в динамике и могут быть оценены из выборки данных, на основе методов фрактального анализа [18].

Результаты работы

Оценка состояния идеологии государства и образования

Образование отражает уровень развития общества. В современном мире наблюдается беспрецедентный по масштабу рост осознания важной роли образования для экономического и социального развития [19]. На этом фоне оно переживает период радикальных реформ, связанных с переходом к инновационным технологиям под воздействием коммуникационных систем, как на образовательные учреждения, так и на общественное сознание [20].

Глобализация внедряется в образование повсеместно, преподаватель все меньше участвует в процессе принятия решения, происходит уменьшение коллегиальности. Растет преподавательская нагрузка, расширяется участие преподавателей в деятельности, приносящей личный доход, в том числе за счет репетиторства, уменьшается время, отводимое на контактную работу со школьником, студентом [21]. Глобализация образования навязывает обществу, по существу, универсальность и целостность в качестве основных своих принципов, создает благодатную почву для синтезирования всего необходимого как для развития, так и стагнации образования. При этом огромный пласт традиционной, проверенной временем методологии в образовании остается практически невостребованным, в результате чего предлагаются новые педагогические приемы, зачастую внедряющие в сознание обучаемого чуждые ценности, как для его развития, так и для государства [22].

В результате происходит процесс тотальной фрагментации личности, когда она, ограниченная как узкими возможностями собственного сознания, так и сосредоточенностью на современном содержании жизни, отображает в себе лишь малую часть окружающего пространства и не в состоянии адекватно постичь его сущность и смысл. Это вектор серьезных проблем для всех стран с переходной экономикой, не имеющих внятно изложенной собственной идеологии в области образования, ориентированной на развитие личности объекта (обучаемого) и ответственности в этом процессе субъекта (педагога) с учетом задач государства [23].

Страны с постиндустриальной экономикой, используя отработанные ими принципы глобализации образования, умело воздействуют на сознание молодого поколения других стран и используют их в интересах своих неолиберальных целей. Учеными доказано [24], что лидер государства в рамках своих полномочий должен формировать «Государственную политику в области образования» в рамках главного государственного закона. Этот документ — руководство (*политические инициативы и подходы*) по государственному управлению в области всей системы образования, логически увязывает их под задачи государства, тем самым обеспечивает его суверенизацию, устойчивость и развитие экономики. Документ определяет, какими интересами и подходами должны руководствоваться правительство и законодательная власть в вопросах, касающихся развития образования в интересах своих граждан и государства.

Идеология, как совокупность ценностей, взглядов, понятий, традиций, выражающих интересы страны, является формой сознания, отвечающего на вопрос об основополагающих принципах сознательной человеческой деятельности. Государственный аппарат и учреждения образования в принципе не могут работать без единой основополагающей идеологии. Ее формальное отсутствие неизбежно приводит к выработке теневой идеологии и управленческого слоя, не всегда обладающей легитимностью в глазах граждан, и, чаще всего, не дающей участникам образовательного процесса необходимой мотивации. Такая ситуация существенно снижает эффективность управления и пагубно сказывается на качестве образования. Меняющееся самосознание общества отражается в деятельности политических партий, вырабатывающих различные идеологии и выдвигающих их на выборах. Победа партии на выборах означает ее право на реализацию своей идеологии посредством управления государственным аппаратом на период соответствующих полномочий. Эффективность победившей идеологии получает ту или иную оценку на следующих выборах.

Для системы и учреждений образования наличие избранной гражданами государственной идеологии имеет принципиальное значение, поскольку образование состоит из обучения и воспитания, а воспитание невозможно без сформированного или сформированного, но не провозглашенного официально идеала воспитанника. К примеру, во времена СССР в стране была научно разработана и практически проверена передовая теория воспитания, позднее безосновательно отброшенная. В 90-е годы 20 века под воздействием извне чиновничество отказалось от воспитания в силу нежелания формулировать его цели, хотя сделать это было несложно [20]. Нужно было только отбросить «перегибы» советского времени и продолжить вектор развития отечественной культуры, опирающийся на ее лучшие достижения, что по-своему было сделано после 1917 г. Пищу для размышлений в этом плане дает сопоставление морально-нравственных установок противоположных идеологий [24].

В педагогической теории особое значение имеет понятие педагогической системы. Это субъект и объект воспитания, а также все, что между ними происходит. Основные категории, описывающие процесс воспитания и составляющие систему: формы, методы, содержание, условия и др. В основе теории — фундаментальное философское понимание воспитания как основу человеческой деятельности. А деятельность, в отличие от поведения, присущая только человеку, характеризуется наличием цели. Отсутствие осознанной цели присуще животным. Цель — главное в педагогической системе. Только она придает всем ее компонентам системную целостность. Цель служит «камертоном» для настройки педагогической системы и всего процесса образования. А появляется цель в образовательном учреждении только из идеологии, исповедуемой и реализуемой государством в лице государственного аппарата. Субъектом цели является педагог, объектом — воспитуемый. Признак субъекта — наличие цели. Воспитуемый, обретая цель, также становится субъектом (только не воспитания, а самовоспитания).

Роль государства в регулировании процесса образования является основополагающей. Ошибочно рассчитывать на изменения качества сегодняшнего образования в рамках предлагаемых к реализации различных приоритетов, проектов, и даже «Стратегий развития образования», предлагающих итоговым результатом. В лучшем случае — это решение конкретной отдельной проблемы в образовании, не оказывая существенного влияния на конечную цель развития образования. При этом теряется доверие к системе образования, и отвлекаются серьезные средства на эти эфемерные эксперименты.

Любой эксперимент — это лишь малая частица общей картины любой проблемы. Наукой доказано и практикой подтверждено, что, занимаясь вопросами образования и науки, надо создавать итоговый результат, а не отдельный элемент, даже выдающийся [25]. Модернизационный рывок в области образования должен базироваться на возрождении всего лучшего, проверенного в мировой практике, с учетом преемственности, имеющегося наследия, интересов граждан и государства, с опорой на науку.

Оценка знаний и рынка труда

Фундаментальная проблема информационного общества — возникновение в массовых масштабах упрощенных форм самоидентификации, ведущих к «уплощению» личности, эрозии ее духовного измерения. Происходит и эрозия индивидуальности. Традиционные формы самоидентификации содержат важное измерение: стремление к самосовершенствованию [20]. Происходит нравственный сдвиг, и современный человек следует общим правилам, растворяясь в общих правилах жизни и теряясь как личность. Задача инженерного метаобразования состоит в анализе условий равновесия между свободой выбора и соблюдением общих правил жизни.

Технологический прогресс мировой экономики в 21 веке имеет закономерную связь с уровнем знаний и состоянием рынка труда. Процесс постоянного обучения и накопления знаний является основой развития человеческой цивилизации. Человеческие знания накапливаются и передаются как формально, в виде научных статей, технических регламентов и т.д., так и неформально от наставника-преподавателя к ученику на всем жизненном цикле человека. Это происходит на основе преемственности и мотивации. Знания направляют поведение людей и формируют основу развития мировой экономики. Суммарный объем знаний определяет сложность «экономического организма» и объем производимых экономикой благ. Блага цивилизации можно измерить не деньгами, а количеством доступных товаров и услуг, полученных за счет знаний [26].

Наш прогресс и экономическое благополучие прямо пропорциональны количеству накопленных человечеством знаний. Количество накопленных знаний растет примерно пропорционально квадрату числа людей, в головах которых эти знания содержатся [27]. По убеждению ученых [28] накапливать знания с такой скоростью сложно. Уже сегодня человечество сталкивается с проблемой преодоления барьера сложности экономики с растущей номенклатурой изделий и глобальной системой разделения труда. Экономика требует рационального использования накопления знаний — углубление разделения труда и резкий рост числа профессий. Каждая специальность становится уникальной по набору знаний [29, 30].

Переход к новому технологическому укладу происходит только через технологическую революцию и характеризуется появлением набора новых знаний, обеспечивающего создание конкурентной среды за счет относительно дешевого базового ресурса; пакета технологий, эффективно эксплуатирующего этот ресурс; организации рынка труда, соответствующего этому технологическому пакету [31].

При этом ресурсная база уходящего уклада, как правило, не исчезает, а может занимать другое, даже более существенное место в других секторах экономики. Как ресурс более глубокого передела в технологиях, полученных на новых знаниях в условиях новых высокотехнологичных исследований на базе междисциплинарных подходов с использованием цифровых приборов и систем, созданных на нано уровне. Учеными [32–36] убедительно доказано, что ресурсная база уходящего индустриального технологического уклада — углеводородное топливо — в не меньшей степени энергетическая основа современной экономики. При этом технологический пакет более 80 % сегодняшних производственных технологий от машиностроения до продуктов питания (*белок*) включает углеводородное сырье, но уже как продукт высокотехнологического передела. Основной проблемой индустриального уклада является не истощение энергетических ресурсов, о чем много говорится сторонниками нового энергетического перехода [37, 38], а ограниченные возможности человеческого мозга по управлению все более сложным технологическим комплексом переработки их в товары прямого потребления. В каждом продукте, которым мы пользуемся в 21 веке, доля прямых и косвенных управленческих затрат, в которых участвует человек, составляет до 80 % [39].

Исследователи доказали, что только преподаватель-наставник в личном контакте со студентом может обеспечить верное использование созданных человечеством дешевых и доступных ресурсов

компьютерных технологий в образовательных процессах. Потенциал компьютерных технологий позволяет облегчить труд школьника, студента, вывести часть алгоритмов из головы в среду, например Искусственного интеллекта (ИИ), где они могут использоваться во много раз быстрее при выполнении работ по сбору эмпирических результатов для докладов, отчетов, подготовки курсовых работ, а также при освоении общеобразовательных, общетехнических и узконаправленных дисциплин. Подмена этих возможностей поиском готовых ответов для «легкого» пути сдачи индивидуальных заданий и итоговых работ мешает логическому закреплению навыков, опыта и теоретических знаний по дисциплинам, что резко снижает качество, объективность и строгость оценки знаний студентов.

Образовательный ресурс, направленный на повышение качества подготовки специалиста, заложенный в компьютерном потенциале большинства университетов, еще практически не задействован, но уже создает большую проблему для объективной оценки качества знаний, формируя безответственность к учебе. Согласно докладу международной консалтинговой компании McKinsey, специализирующейся на решении задач, связанных со стратегией управления, развитие цифровых технологий в США последние 30 лет сопровождалось снижением производительности труда [40] и «подменой» личных знаний в образовании. По мнению авторов, компьютерные технологии способны раскрыть истинные возможности обучающегося в образовательном процессе университета, решая проблему лучше, быстрее и дешевле при условии перехода на новые требования к учебным программам и изменения требований к педагогическим компетенциям преподавателя университета.

Совокупный объем всех созданных на сегодняшний день компьютерных алгоритмов ничтожно мал по сравнению с объемом всех человеческих знаний. Основные решения остаются за людьми, и влияние знаний на экономику по-прежнему доминирующее, так как объем знаний в компьютерных программах зависит от совокупных знаний программистов и алгоритм ограничен объемом их знаний. Появление на этом рынке новых знаний в области «машинного обучения» уже решает задачи компьютерного зрения, распознавание речи, машинного перевода и т.д., требуя для этого «глубокого обучения» [41].

Основой индустриального уклада экономики является массовое производство и потребление товаров. Ориентация производителя на рынок массового спроса сегодня быстро меняется на «индивидуальные», расширяя объем рынка за счет эффекта «длинного хвоста» [42]. С этим связано и изменение на рынке труда — как любой товар находит своего покупателя, так и любые способности, знания и навыки находят свое применение в составе временных команд с уникальными комбинациями компетенций.

Динамика мировой экономики и неопределенности рынка труда требуют от образования перехода от традиционных образовательных программ, ориентированных на решение отдельных прикладных задач рынка труда к созданию параллельно к базовым программам дополнительных образовательных модулей, позволяющих быстро адаптироваться к изменениям рынка труда и обучаться в процессе всего жизненного цикла, непрерывно накапливая предметные знания в масштабах, которые сейчас трудно определить [43].

Пилотный проект («Эксперимент»)

Пилотный проект, далее «Эксперимент», был организован в рамках указа Президента страны [16] в шести российских университетах. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II [15] был выбран не только как первое высшее техническое учебное заведение, а как вуз, имеющий научно-образовательный потенциал, входящий по оценке рейтингового агентства QS в десятку лучших среди всех университетов мира по профильному направлению «Инженерное дело — добыча полезных ископаемых и горная промышленность».

В отличие от других пяти университетов, участвующих в эксперименте, Горный университет, являясь техническим университетом, ведет подготовку для инженерного обеспечения всего цикла работы с объектами недропользования и геологоразведочными работами. Университет ведет подготовку специалистов по четырем укрупненным направлениям: отраслевое (геологоразведочное, нефтегазовое, горное, инженерно-геологическое и гидрогеология); индустриальное; социально-экономическое; прикладное.

До начала проведения эксперимента университет вел подготовку специалистов по образовательным программам: Бакалавриата, Магистратуры, Специалитета, подготовки научных и научно-педагогических кадров (Аспирантуры) как высшего уровня образования.

Эксперимент в области высшего инженерного образования в университете начался с приема на инженерные специальности в 2023 г. Было принято более 2150 студентов как участников Эксперимента и далее такое же количество ежегодно принимается со сроком обучения 6 лет (5 лет для подготовки отраслевого экономиста). Инновационные изменения в образовательные стандарты, предъявляемые к Образовательным программам, планируется закончить до 2026 года.

Сроки реализации эксперимента определялись с учетом следующих факторов:

1. Кризисное состояние обеспеченности инженерными кадрами в минерально-сырьевом секторе и других индустриальных секторах экономики.

2. Отсутствие типовых образовательных программ высшего инженерного образования, учитывающих глобальные изменения, происходящие в метаобразовании (как процессе формирования понимания человеком своего места и подлинной роли в мире), особенно в равновесии между свободой выбора и законодательными нормами.

3. Необходимость внесения изменений в образовательные стандарты обязательных требований к дополнительным компетенциям, навыкам, опыту, научным и междисциплинарным знаниям.

4. Изменение требований к миссии преподавателя.

5. Необходимость усиления требовательности к получению фундаментальных знаний и их закрепления.

6. Новые требования к экономическим знаниям и знаниям компьютерных технологий.

7. Внедрение методологических технологий, формирующих у студента мотивацию осознанной самореализации в производстве после окончания университета.

До начала эксперимента, начиная с 2019 г., университет в рамках своей инициативы, Ассоциация горных инженеров [44], Центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО [45] провели исследования с целью:

1. Оценки качества и содержания инженерного образования, как в России, так и в университетах стран, имеющих индустриальную экономику — 230 (в том числе российских — 60).

2. Оценки профессорско-преподавательского потенциала этих университетов (требования при приеме на работу преподавателя; наличие специальных педагогических компетенций; за что отвечают преподаватели).

3. Определения приоритетных изменений в развитии высшего образования в 21 веке: усиление научного обеспечения учебного процесса; формирование основ научных знаний; автоматизация и основы компьютерных технологий; новые информационные материалы; усиление экономических знаний и их формирование; технологии новых систем.

4. Установления причин деформации базового мировоззрения у школьников.

5. Оценки влияния идеологии государства, на базе которой формируется цель образования и появляется субъект и объект в образовательном цикле.

Мы исходим из понимания, что совершенствование базового высшего образования 21 века должно формироваться на основе глобально-цивилизационного подхода к образованию, учитывающего базовый принцип образования и культурно-временную модель, а именно:

1. Целостность системы образования и воспитания, что позволит сформировать цивилизованный выбор специальности, культурно-личностную идентификацию и самоидентификацию.

2. Смена траектории восприятия картины мира от социально обусловленного знания к социальному самосознанию.

3. Формирование дополнительных компетенций и мотиваций, конечным назначением которых является готовность работать по специальности после окончания и необходимость учиться при появлении новых технологий или потребности в новых научных знаниях.

Факторы, влияющие на формирование метаобразования, развитие метакогнитивных и метапрактических навыков, формирующие у студента целостное мировоззрение по специальности и место в ней научного прогресса, приведены на рис. 1.

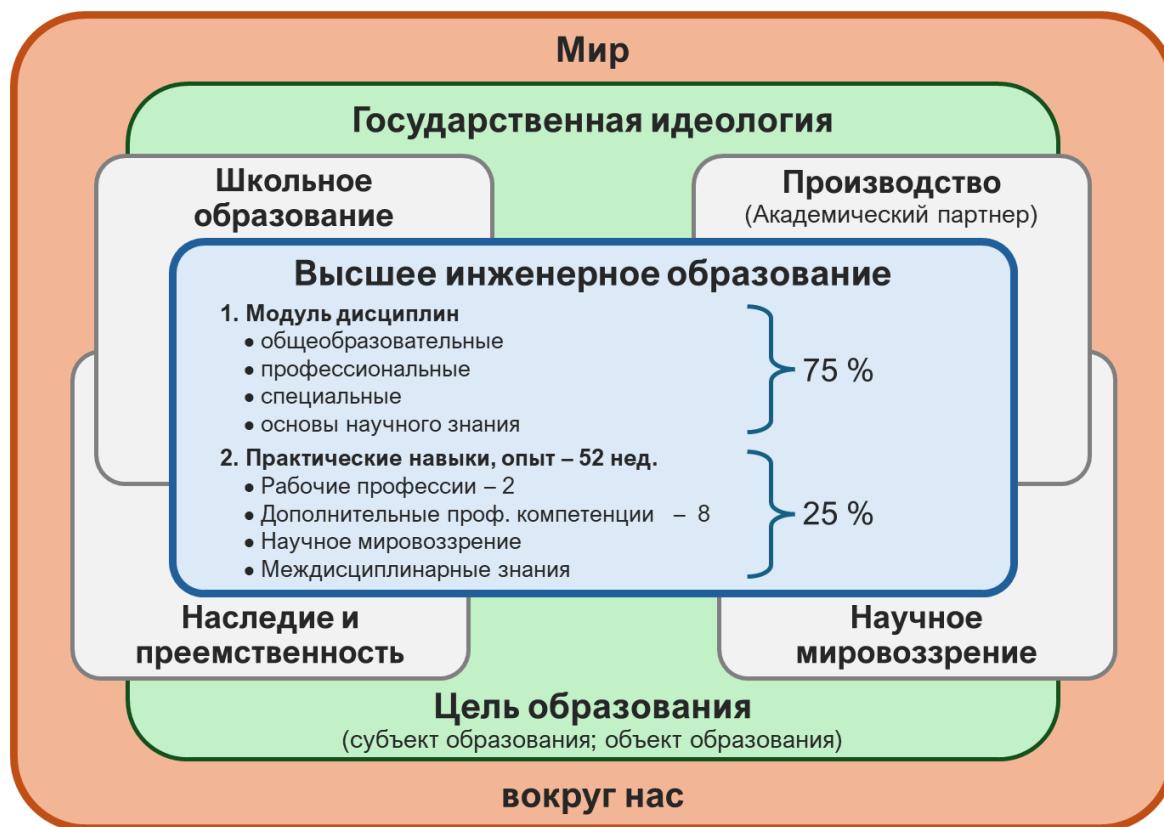


Рис. 1. Процесс формирования инженерного метаобразования

Модель образовательной программы рассчитана на формирование аналогового мышления, способствующего улучшению навыков критического мышления, детальному рассмотрению задачи с разных сторон. Аналоговое мышление позволяет выпускнику гораздо лучше использовать свой творческий потенциал и продуманно принимать решения, делая свою жизнь более яркой, живой.

При формировании модели образовательных программ высшего инженерного образования мы исходили из понимания, что содержание инженерного метаобразования, решающего задачи суверенизации государства, зависит от тех представлений, потребностей, идеалов, которые существуют в данном социокультурном пространстве, и должно обеспечивать поддержание и развитие его устоев.

Глобальные задачи индустриализации мировой экономики и геополитические вызовы 21 века по обеспечению суверенизации государства требуют внесения изменений в государственную политику метаобразования по совершенствованию качества и формы подготовки инженерных кадров. Государственная политика должна не только формировать глобально-цивилизационный подход к образованию в целом, ее базовым принципам и культурно-временной модели совершенствования всего образования, и связанным с ним высшим инженерным, но и включать методологические мероприятия по формированию у студентов осознанной мотивации для самореализации в производственном секторе.

Инженерное метаобразование рассматривается как единая деятельность государственной системы образования и воспитания в обществе, под воздействием которой происходят цивилизованный выбор специальности, культурно-личностная идентификация и самоидентификация.

Исследование определило главную цель эксперимента: выработать методологический подход к формированию инженерного метаобразования на уровне школьного и вузовского образования; вернуть в образовательный процесс отечественные смыслы и методы; выработать оптимальную образовательную программу под специальности инженерного образования для суверенизации страны.

Реализуемые в рамках Эксперимента 60 образовательных программ по инженерным специальностям включают наследие и преемственность действующей системы метаобразования.

Оценка проблем в выборе инженерных специальностей

Профессиональная ориентация — осознанное, выработанное, личное отношение к профессии. Оно формируется на основе определенного объема знаний, позволяющих воспринимать профессию на эмоциональном уровне. Выбор профессии проходит несколько периодов [46]:

1. *Детский (незрелый) выбор*, определяется с учетом желания быть взрослым и формируется до физической зрелости.

2. *Пробный выбор* — как субъективный интерес в ранней юности.

3. *Реальный выбор* — как осознанный компромисс между желаниями человека и возможностями.

Период поступления в технический вуз не является периодом окончательного выбора профессии. Выбор происходит в первые два года обучения при активном участии университета и компании-работодателя. Наши исследования показали, что целенаправленный выбор будущей инженерной специальности на школьном уровне отсутствует, так как уровень мировоззрения школьников как системы взглядов, оценок и образных представлений о мире и месте в нем человека ограничен глубиной знаний математики, физики, химии, биологии. Базовая школьная программа как набор методологических и организационных мероприятий, позволяющих передать и закрепить понимание модуля предметов, к сожалению, логически не связана между собой конечной целью всего обучения — сформировать у выпускника систему взглядов, оценок и образных представлений о мире и месте в нем человека.

Итоговый экзамен (ЕГЭ) не должен являться самоцелью образовательной программы, а всего лишь инструментом определения уровня знания отдельных предметов, а не уровня целостного мировоззрения, полученного выпускником в рамках образовательной школьной программы. Это мировая тенденция.

Выбор инженерной или другой высококвалифицированной профессии, как правило, делается в 17-летнем возрасте, когда на выбор между желаниями и возможностями влияет «пробел» школьного образования. Обязательный уровень знаний всех предметов школьником 21 века подменяется программами по выбору. При этом знание таких предметов, как физика, химия математика и др., которые требуются для реалистичного выбора школьником инженерной специальности, поверхности, а иногда вообще отсутствуют. Школьник не может обеспечить самореализацию, выбирая необходимую ему специальность, из-за плохих знаний школьных предметов, которые во многом определяют его ограниченные возможности выбрать инженерные или другие высококвалифицированные специальности.

Успешность пополнения науки молодежью во многом зависит от принципов отбора в вуз. Главный из них — сочетание общественной целесообразности и справедливости [47]. Высшее образование превращается из прерогативы элиты в массовые институты, которые все чаще рассматриваются как социальная необходимость для успеха, а не для самореализации работы по специальности. Отбор в технические вузы имеет ряд особенностей, например склонность к научно-технической деятельности, носящей преимущественно творческий характер. Сегодняшняя система приема не позволяет эти качества оценить у абитуриента, что сказывается на эффективности его учебы в вузе [48].

В 21 веке, веке новых технологий и науки, высшее техническое образование должно быть ориентировано на тех, кто способен и стремится получить профессию, требующую высокого уровня научно-технических знаний [49]. Оно не должно быть самоцелью, а лишь средством достижения определенной цели, и в этом главную роль должна играть рациональная, осознанная профориентация [50].

Методологический подход к реализации Образовательных программ в рамках «Пилотного проекта Эксперимент»

На основании исследования глобальных (внешних) и локальных факторов, влияющих на результативность высшего образования, а также с учетом имеющегося наследия и преемственности в государственном образовании были разработаны и предложены к реализации в рамках «Пилотного проекта» мероприятия по приданию высшему инженерному образованию новых качеств:

1. Фундаментное (глубокое) изучение базовых общеобразовательных и общетехнических дисциплин.

2. Модуль специальных и дисциплин по специальности закрепляется достаточным объемом практических навыков и производственного опыта — 42–48 недель в течение 6-летнего обучения.

3. Дополнительные инженерные компетенции не менее 8 и рабочие специальности не менее 2, обязательные в рамках образовательного стандарта.

4. Образовательные программы используют методологический подход, позволяющий развивать у студента аналоговое мышление, что способствует улучшению навыков критического мышления.

5. Мировоззрение в научной деятельности, как обязательная компетенция инженера 21 века, формируется в период всего обучения на основе дисциплины «Основы формирования научного знания» и позволяет получить второй Диплом «Инженер-исследователь» по результатам защиты на Научном «Совете» результатов полученных новых знаний в научной лаборатории (3–8 % выпуск). Конкурентная среда среди студентов формируется с первого дня обучения.

Введены и новые организационно-правовые мероприятия, как в учебный процесс, так и в его организацию:

1. Компании, учреждения, проявившие желание участвовать в учебном процессе (осознанно) с целью подготовки специалистов и их трудоустройства, имеют своего представителя в университете в качестве «Производственного наставника студента», и компании присваивается категория «Академический партнер» (сегодня их 130).

2. Срок преддипломной практики не менее 16 недель.

3. Введен процесс аккредитации выпускника после его работы в качестве «Инженера-стажера» в течение 6–8 недель до защиты дипломного проекта.

4. Знания в области экономики и программных продуктов (цифровые) включены в сквозное обучение.

5. Дипломный проект включает: технологический, экономический и научный разделы.

6. Оценка остаточных знаний модуля дисциплин по специальности производится на основании «Итогового экзамена» с участием комиссии и представителей Компании.

Внесены изменения и требования к профессорско-преподавательскому составу:

1. Порядок допуска к преподаванию модуля дисциплин по конкретной специальности.

2. Требования к индивидуальному учебному плану преподавателя.

3. Введены категории преподавателей — «Лектор», «Ассистент-лектора», «Педагогический наставник студента», «Научный наставник студента».

Унифицированный подход к структуре высшего инженерного образования

Образовательная программа «Высшего инженерного образования» учитывает следующие требования к образовательному стандарту.

Образовательная программа базового высшего образования — высшего инженерного образования — это набор методологических и организационных мероприятий, позволяющих передать и закрепить понимание модуля дисциплин, логически связанных между собой конечной целью программы, и формировать среду, мотивирующую обучающегося к самореализации посредством работы по специальности.

Цель образовательной программы — сформировать целостное представление о специальности и месте в ней научного прогресса, мотивирующее выпускника, освоившего образовательную программу, к самореализации посредством работы по специальности.

Задачи образовательной программы:

- Сформировать фундаментальное знание базовых общеобразовательных, общетехнических и специальных дисциплин, логически связанных между собой, закрепив их достаточным объемом практических навыков и личным опытом, необходимых для профессиональной деятельности в выбранной специальности.
- Формирование целостного мировоззрения необходимо для самореализации в выбранной специальности посредством работы по специальности после овладения программы, формируемого из знаний, идей, принципов (точки зрения), убеждений, идеалов, духовно-нравственных ценностей, жизненных установок.

- Формирование целостного научного мировоззрения как составной части инженерной компетенции XXI века.
- Формирование конкурентной среды в процессе всего обучения, стимулирование студента к самореализации и стремлению стать активным членом социума.

Требования к структуре образовательной программы представлены на рис. 2.

Содержание образовательных модулей	Кол-во ед.	Срок обучения					
		1	2	3	4	5	6
Практические навыки и опыт							
1. Общеобразовательные дисциплины		●	●				
2. Общетехнические дисциплины		●	●				
3. Профессиональные дисциплины	264 зач. ед.	●	●	●	●	●	
4. Дисциплины по специальности		●	●	●	●	●	
5. Основы формирования научных знаний		●	●				
Навыки и опыт (учебно-производственный), всего в том числе:	48-52 нед.						
• учебные, производственные	48 нед.	8	8	8	8	12	4
• рабочая профессия	2		⊗	⊗			
• дополнительные профессиональные компетенции	8		1	2	2	2	1
• дополнительные профессиональные квалификации	1					1	
Профессиональная аккредитация «Инженер-стажер»	6 нед.						6
Формирование научного мировоззрения				—	—	—	—
Формирование междисциплинарных инженерных компетенций		●	●	●	●	●	●

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ ПРЕДУСМАТРИВАЕТ:

- 1. **Дипломный проект** (включая цифровые технологии) Технологический раздел
- 2. **Государственный экзамен.** Экономический раздел
- 3. Оценка Компанией (Академический партнер) уровня Научный раздел инженерной компетенции.
- 4. Наличие инженерных компетенций, рабочих профессий и достижений.

ДОКУМЕНТЫ, ВЫДАВАЕМЫЕ ВЫПУСКНИКАМ:

- 1. **Диплом** об освоении Образовательной программы с приложением (с указанием «Педагогического наставника студента»).
- 2. **Характеристика-рекомендация** с приложением полученных инженерных компетенций, рабочих профессий и достижений.
- 3. **Второй Диплом «Инженер-исследователь»** (после защиты основного «Дипломного проекта») самостоятельно получившим новые знания и защитившим их на специальном «Научном совете» (3+8% от выпуска).

Рис. 2. Унифицированный подход к структуре высшего инженерного образования (360 зач. ед.)

Требования к модулю учебных дисциплин

Общеобразовательные дисциплины формируют фундаментальные знания, закладывают основу и базу знаний: обеспечивают целостность теоретической подготовки; формирование общей культуры личности; понимание сущности и социальной значимости будущей специальности.

Общетехнические дисциплины выступают переходным звеном от общеобразовательной подготовки к специальным дисциплинам, формируя навыки применения теоретических знаний при решении конкретных инженерных задач.

Общепрофессиональные дисциплины закладывают фундамент профессиональной деятельности. Их овладение обеспечивает раскрытие принципов, лежащих в основе производственных процессов, формирует производственно-технологическую компетентность инженера, развивает умение, которое в дальнейшем находит применение в разнообразных учебных и производственных условиях, а также в области экономических и цифровых возможностей.

Дисциплины по специальности формируют знания и навыки, необходимые для работы по специальности. Они включают основные теоретические знания; набор практических методов и инструментов освоения технологий, оборудования и регламентов их применения, а также набор знаний, связанных с коммуникативными и технологическими особенностями выбранной специальности. Образовательная организация разрабатывает модуль дисциплин по специальности и специализации с учетом будущей профессиональной деятельности выпускника с обязательным выделением дисциплин, по которым необходимо закрепление лекционного курса на практике. Образовательная программа на протяжении всего периода освоения обеспечивает получение компетенций в области экономики и цифровизации, необходимых как для выполнения профессиональных задач, так и для полноценного взаимодействия личности с окружающим миром и решения повседневных задач. Формирование компетенций обеспечивается реализацией дисциплин по национальной и отраслевой экономике, экономике предприятия, организации и управления производством, финансовой грамотности, информационным технологиям, а также при подготовке и защите на специализированном совете экономического раздела дипломного проекта.

Требования к практическим навыкам и опыту. Образовательная программа обеспечивает формирование практических навыков и опыта посредством обязательного закрепления лекционных курсов по дисциплинам общепрофессионального модуля, модуля дисциплин по специальности и специализации на практике, при освоении рабочих профессий и дополнительных профессиональных компетенций.

Образовательная организация обеспечивает получение практических навыков и опыта под руководством и контролем педагогического и производственного наставников и при обязательном участии компаний-партнеров.

Требования к итоговой оценке остаточных знаний. Образовательная организация обеспечивает проведение итоговой оценки остаточных знаний обучающихся при прохождении промежуточной аттестации (после каждого учебного семестра) и итоговой аттестации по результатам изучения дисциплин модулей. Промежуточная аттестация по учебным дисциплинам проводится после закрепления теоретического (лекционного) материала на практике.

Итоговая оценка остаточных знаний по единому модулю общеинженерной подготовки («Ядро» высшего инженерного образования) осуществляется посредством сдачи Комплексного экзамена, который ориентирован на проверку усвоенных знаний и получение объективной информации о качестве фундаментальной подготовки обучающихся.

Итоговая оценка остаточных знаний по дисциплинам общепрофессионального модуля проводится ведущим лектором по дисциплине в форме зачета, дифференцированного зачета, экзамена. Итоговая оценка остаточных знаний по модулю дисциплин специальности и специализации проводится посредством сдачи Единого итогового государственного экзамена.

Государственная итоговая аттестация включает сдачу единого итогового экзамена по дисциплинам специальности, подготовку к защите и процедуру защиты выпускной квалификационной работы — дипломного проекта, состоящего из научного, технологического и экономического разделов.

Квалификационная характеристика выпускника. Область профессиональной деятельности выпускника представляет собой совокупность технологий, методов и способов производственной и научной деятельности, направленных на решение конкретных видов профессиональной деятельности по проектированию, технической разработке, производству, эксплуатации, обслуживанию, модернизации технических средств, оборудования, механизмов и систем, технико-экономическому обоснованию и управлению конструкторскими работами и производственными процессами.

Освоение образовательной программы позволит выпускнику, в соответствии с фундаментальной и специальной подготовкой, работать в должности инженера (инженер-технолог; инженер-конструктор; инженер-проектировщик).

Заключение

1. Качество инженерного образования становится особым конкурентным общественным капиталом страны в 21 веке. Под его воздействием происходит переход от социально-обусловленного к подлинно социальному самосознанию. На выбор инженерной специальности во многое влияет общественная среда. Выбор жизненного пути, если он сделан свободно, зависит от самоопределения, но он ограничен из-за недостаточно хорошего качества школьного образования, формирующего у школьника цифровое мышление, и возникающих массовых предпочтений в формах самоопределения, которые считаются адекватными современному времени.

2. Выполненное нами исследование, направленное на решение важнейшей проблемы мировой экономики, совершенствование высшего инженерного образования, не является **догмой**. Одна из наших целей — привлечь специалистов для обсуждения и выработки оптимальной модели педагогического подхода в инженерном образовании, сочетающего преемственность поколений, навыки и новые формы формирования знаний и мотивации к самореализации, работы по специальности. Необходимо не забывать, что, когда человек осознанно укротил силы природы и заставил их работать на себя, начинается эра индустриализации [51]. И только при новом качестве инженерных знаний могут появляться новые ресурсы, изобретения и инновации для следующего витка развития за счет более совершенных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alonso E., Sherman A. M., Wallington T. J., Everson M. P., Field F. R., Roth R., Kirchain R. E. Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies // Environmental Science & Technology. – 2012. – V. 46(6). – pp. 3406–3414. <https://doi.org/10.1021/es203518d>.
2. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // Earth-Science Reviews. – 2020. – V. 203. – P. 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.
3. 2021 global oil and gas discoveries projected to sink to lowest level in 75 years. <https://web.archive.org/web/20220819062735/> <https://www.rystadenergy.com/news/events/news/press-releases/2021-global-oil-and-gas-discoveries-projected-to-sink-to-lowest-level-in-75-years2/> (дата обращения: 04.07.2025).
4. Abu-Gosh E. S., Leal-Arcas R. The Conservation of Exhaustible Natural Resources in the GATT and WTO: Implications for the Conservation of Oil Resources // The Journal of World Investment & Trade. – 2013. – V. 14(3). – pp. 480–531. <https://doi.org/10.1163/22119000-01403003>.
5. Кудрявцев Н. А. Генезис нефти и газа // Ленинград: Недра, 1973. – 216 с.
6. Courtney-Davies L., Fiorentini M., Dalstra H., Hagemann S., Ramanaidou E., Danišik M., Evans N. J., Rankenburg K., McInnes B. I. A. A billion-year shift in the formation of Earth's largest ore deposits // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2024. – V. 121. – No. 31. – P. e2405741121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2405741121>.
7. Reeves E. P., Fiebig J. Abiotic Synthesis of Methane and Organic Compounds in Earth's Lithosphere // Elements. – 2020. – V. 16. – No. 1. – pp. 25–31. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.25>.
8. Dougherty M. L. The Global Gold Mining Industry: Materiality, Rent-Seeking, Junior Firms and Canadian Corporate Citizenship // Competition & Change. – 2013. – V. 17(4). – pp. 339–354. <https://doi.org/10.1179/1024529413Z.00000000042>.
9. Stutt A. Colorado School of Mines warns of ‘grey tsunami’ of mining industry retirements. <https://web.archive.org/web/20240208153701/> <https://www.mining.com/colorado-school-of-mines-warns-of-grey-tsunami-of-mining-industry-retirements/> (дата обращения: 04.07.2025).
10. Ali S. H., Giurco D., Arndt N., Nickless E., Brown G., Demetriades A., Durrheim R., Enriquez M. A., Kinnaird J., Littleboy A., Meinert L. D., Oberhänsli R., Salem J., Schodde R., Schneider G., Vidal O., Yakovleva N. Mineral supply for sustainable development requires resource governance // Nature. – 2017. – V. 543(7645). – pp. 367–372. <https://doi.org/10.1038/nature21359>.
11. Altbach P., de Wit H. At no other time has higher education been more important. <https://www.universityworldnews.com/post.php?story=20230509101201511> (дата обращения: 04.07.2025).
12. Verrier B., Smith C., Yahyaei M., Ziemska M., Forbes G., Witt K., Azadi M. Beyond the social license to operate: Whole system approaches for a socially responsible mining industry // Energy Research & Social Science. – 2022. – V. 83. – P. 102343. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102343>.
13. Fuso Nerini F., Tomei J., To L. S., Bisaga I., Parikh P., Black M., Borroni A., Spataru C., Castán Broto V., Anandarajah G., Milligan B., Mulugetta Y. Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals // Nature Energy. – 2018. – V. 3(1). – pp. 10–15. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0036-5>.
14. Казанин О. И., Дребенштедт К. Горное образование в XXI веке: глобальные вызовы и перспективы // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 369–375. <https://doi.org/10.18454/pmi.2017.3.369>.
15. Saint Petersburg Mining University. <https://en.spmi.ru/> (дата обращения: 04.07.2025).
16. Указ Президента Российской Федерации от 12.05.2023 г. № 343 «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования». <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49210> (дата обращения: 04.07.2025).
17. Pearl J., Mackenzie D. The Book of Why: The New Science of Cause and Effect. – New York: Basic Books, 2018. – 432 p.
18. Karperien A., Jelinek H. F., Leandro J. J. G., Soares J. V. B., Cesar Jr R. M., Luckie A. Automated detection of proliferative retinopathy in clinical practice // Clinical Ophthalmology. – 2008. – V. 2(1). – pp. 109–122. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S1579>.
19. Фролова Е. В., Рогач О. В., Воронцова И. В., Рябова Т. М., Шалащникова В. Ю. Анализ удовлетворенности родителей школьным образованием: ключевые проблемы и точки роста // Перспективы науки и образования. – 2020. – № 3(45). – С. 239–251. <https://doi.org/10.32744/pse.2020.3.18>.
20. Скворцов Л. В. ХХI: интенция как духовная судьба цивилизационного самоопределения // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 3. Философия. – 2023. – № 4. – С. 106–144. <https://doi.org/10.31249/ghphil/2023.04.12>.
21. Пентин А., Ковалева Г., Давыдова Е., Смирнова Е. Состояние естественнонаучного образования в российской школе по результатам международных исследований TIMSS и PISA // Вопросы образования. – 2018. – № 1. – С. 79–109. <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2018-1-79-109%20>.
22. Prauzner T. The effectiveness of school education - featured implications considerations // SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION: Proceedings of the International Scientific Conference (Rezekne, May 26th-27th, 2017). – Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2017. – V. 3. – pp. 558–564. <https://doi.org/10.17770/sie2017vol3.2434>.
23. Запесоцкий А. П. Философия образования и проблемы современных реформ // Вопросы философии. – 2013. – № 1. – С. 24–34.
24. Запесоцкий А. С. Образование: Философия, культурология, политика // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов, 2024. – 456 с.
25. McClaran A. Good Regulation: Lessons for England from the Australian Experience? – Higher Education Policy Institute, 2023. – Policy Note 47. – 5 p.
26. Beinhocker E. D. The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics // Harvard Business School Press, 2006. – 527 p.
27. Капица С. П. Общая теория роста человечества. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле // Москва: Наука, 1999. – 189 с.
28. Panetta K. 5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018> (дата обращения: 04.07.2025).

29. Kremer M. Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990 // The Quarterly Journal of Economics. – 1993. – V. 108(3). – pp. 681–716. <https://doi.org/10.2307/2118405>.
30. von Foerster H., Mora P. M., Amiot L. W. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science. – 1960. – V. 132(3436). – pp. 1291–1295. <https://doi.org/10.1126/science.132.3436.1291>.
31. Ehrlich P. R., Ehrlich A. H. Can a collapse of global civilization be avoided? // Proceedings of the Royal Society B. – 2013. – V. 280(1754). – P. 20122845. <http://doi.org/10.1098/rspb.2012.2845>.
32. Conde M. Resistance to Mining. A Review // Ecological Economics. – 2017. – V. 132. – pp. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>.
33. Казанин О. И., Мешков А. А., Сидоренко А. А. Перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 35–53. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35.
34. Morenov V. Advances in Oil and Gas Production: A Viewpoint // Energies. – 2023. – V. 16(3). – P. 1379. <https://doi.org/10.3390/en16031379>.
35. Quiroz Cabascango V. E., Bazhin V. Yu. Combustion optimization in gas burners of reverberatory furnaces during the melting of nickel alloys // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1728. – P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012019>.
36. Tcvetkov P. Small-scale LNG projects: Theoretical framework for interaction between stakeholders // Energy Reports. – 2022. – V. 8(1). – pp. 928–933. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.195>.
37. Schot J., Kanger L., Verbong G. The roles of users in shaping transitions to new energy systems // Nature Energy. – 2016. – V. 1(5). – P. 16054. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.54>.
38. Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, Problems, Results // Sustainability. – 2021. – V. 13(2). – P. 862. <https://doi.org/10.3390/su13020862>.
39. Ковалевич Д., Щедровицкий П. Конвойер инноваций: Кто несет ответственность за производство инноваций? <http://web.archive.org/web/20160608143741/http://asi.ru/conveyor-of-innovations/> (дата обращения: 04.07.2025).
40. Manyika J., Remes J., Mischke J., Krishnan M. The productivity puzzle: A closer look at the United States. – McKinsey Global Institute, 2017. – 22 p.
41. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. – 2015. – V. 521(7553). – pp. 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
42. Desjardins J. The 8 Major Forces Shaping the Future of the Global Economy. <https://www.visualcapitalist.com/the-8-major-forces-shaping-the-future-of-the-global-economy/> (дата обращения: 04.07.2025).
43. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A. A., Veness J., Bellemare M. G., Graves A., Riedmiller M., Fidjeland A. K., Ostrovski G., Petersen S., Beattie C., Sadik A., Antonoglou I., King H., Kumaran D., Wierstra D., Legg S., Hassabis D. Human-level control through deep reinforcement learning // Nature. – 2015. – V. 518(7540). – pp. 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature14236>.
44. Национальная ассоциация инженеров. <https://www.namingeng.ru/> (дата обращения: 04.07.2025).
45. Centre Under the auspices of UNESCO. Implemented events Conferences, forums, seminars and meetings held within the framework of the Centre's activities. <https://unesco.spmi.ru/en/events> (дата обращения: 04.07.2025).
46. Deng Z. Powerful knowledge, educational potential and knowledge-rich curriculum: pushing the boundaries // Journal of Curriculum Studies. – 2022. – V. 54(5). – pp. 599–617. <https://doi.org/10.1080/00220272.2022.2089538>.
47. Колмогоров А. Н. Радость познавать мир // Правда. – 1968. – № 245(18292). С. 2.
48. Shields D., Verga F., Andrea Blengini G. Incorporating sustainability in engineering education: Adapting current practices to mining and petroleum engineering education // International Journal of Sustainability in Higher Education. – 2014. – V. 15(4). – pp. 390–403. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-02-2013-0014>.
49. Haupt G., Webber-Youngman R. C. W. Engineering education: an integrated problem-solving framework for discipline-specific professional development in mining engineering // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2018. – V. 118. – No. 1. – pp. 27–37. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n1a4>.
50. Mischo H., Brune J. F., Weyer J., Henderson N. Mine disaster and mine rescue training courses in modern academic mining engineering programmes // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – V. 114. – No. 12. – pp. 987–992.
51. The Book. The Ultimate Guide to Rebuilding a Civilization. Hungry Minds, 2022, 408 p.

Моделирование геомеханических процессов взаимодействия ледяного покрова с подледниковым озером Восток — Антарктида

В. С. ЛИТВИНЕНКО, В. Л. ТРУШКО ☐

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия
✉ rectorat@spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Litvinenko V, Trushko V (2025). Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica. Antarctic Science 37, 39–48. <https://doi.org/10.1017/S0954102024000506>.

Аннотация. В результате анализа ледяного покрова, геологического строения и тектоники подстилающих пород в районе озера Восток в Антарктиде установлено слоистое субгоризонтальное строение ледяного покрова и распределение параметров состава льда. Экспериментально определены физико-механические свойства подстилающих пород. Комплексная тектоника выявила увеличение геотермального потока в районе бассейна Восток, который играет роль в эволюции земной коры и формировании морфологии ее физических свойств. Построена и исследована трехмерная геомеханическая модель единой системы «ледник — озеро Восток — горная порода». Выявлены закономерности в изменении напряженно-деформированного состояния. Установлены зоны развития пластических деформаций в ледяном покрове по периметру озера Восток и их распределение по озеру, что подтверждено результатами натурных наблюдений. Моделирование геомеханических процессов показывает, что изменение механического состояния земной коры с учетом ползучей деформации ледяного покрова в большей степени относится к нелинейным динамическим системам, которые характеризуются нестабильными изменениями и должны рассматриваться как фрактальные системы.

Ключевые слова: Антарктида, фрактальные системы, геомеханическая модель, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, подледниково озеро Восток.

Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica

Vladimir S. LITVINENKO and Vladimir L. TRUSHKO ☐

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia
✉ rectorat@spmi.ru

Abstract. As a result of analysis of the ice cover, geological structure and tectonics of the underlying rocks in the Lake Vostok area of Antarctica, a layered sub-horizontal structure of the ice cover and a distribution of the parameters of the ice composition were established. The physical and mechanical properties of the underlying rocks were determined experimentally. Complex tectonics revealed an increase in geothermal flow in the Vostok Basin region, which plays a role in the evolution of the Earth's crust and in shaping the morphology of its physical properties. A three-dimensional geomechanical model of the unified system 'glacier-Lake Vostok-bedrock' was constructed and investigated. Regularities in the changes to the stress-strain state were revealed. Zones of development of plastic deformation in the ice cover along the perimeter of Lake Vostok and their distribution over the lake were established, which were confirmed by results from field observations. Modelling of geomechanical processes shows that the change in the mechanical state of the Earth's crust, taking into account the creep deformation of the ice sheet, relates more to nonlinear dynamic systems, which are characterized by unstable changes and should be considered as fractal systems.

Keywords: Antarctica, fractal systems, geomechanical model, numerical modelling, stress-strain state, subglacial Lake Vostok.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© The Author(s), 2025. Published by Cambridge University Press on behalf of Antarctic Science Ltd. This is an Open Access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution licence (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted re-use, distribution and reproduction, provided the original article is properly cited.

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

Введение

Определение восходящего кондуктивного теплового потока, одного из механизмов внутриземного тепловыделения, занимает особое место в изучении подледникового озера Восток в Антарктиде. Это важно не только для выяснения генезиса озера и связанной с ним эволюции жизни на Земле, но и для достоверного определения теплового потока из недр Земли, который играет роль в эволюции антарктической коры и формировании ее морфологии и физических свойств. В реальных условиях наличие глобального неоднородного ледяного покрова с деформацией ползучести, а также структурных и теплофизических неоднородностей в земной коре [31], влияет на геомеханические процессы, происходящие под воздействием естественных причин, которые можно рассматривать как нелинейную динамическую систему (близкую к фрактальной). Это процесс с непостоянными и непериодическими переменными траекториями. Для установления закономерности деформирования ледяного покрова и его прогиба в районе станции Восток использовались полученные физико-механические свойства пород Восточной Антарктиды и упругопластические модели среды с учетом деформации ползучести для ледяного покрова. Моделирование геомеханических процессов воздействия ледникового покрова рассматривалось во времени как линейная динамическая система.

Изучение ледникового покрова и подледникового озера Восток в Антарктиде сейсмическими и радиолокационными методами ведется с 1960 года, когда были проведены сейсмическое зондирование методом отраженных волн и определение толщины ледника и подледникового рельефа [26, 27, 23, 20].

Установлены коренной рельеф и глубины озера Восток, которое представляет собой впадину в виде опущенного блока земной коры в протяженной субмеридиональной области разрушения литосферы размером $\sim 310 \times 100$ км [Рис. 1; 27, 21, 20]. На акватории выявлено одиннадцать островов общей площадью 365 км². Площадь самого крупного из них составляет 175 км² [23].

Озеро Восток — изолированный водоем с площадью акватории 15 790 км² и объемом водоема 6100 км³. Высота над уровнем моря колеблется от 600 до 150 м [22, 23, 21]. Средняя глубина озера составляет ~ 400 м. Согласно генеральному плану озера, южная часть озера размером 70×30 км является наиболее глубокой, со средней глубиной ~ 900 м и максимальной глубиной в центральной части до 1200 м [27]. Северная часть озера размером 150×70 км имеет среднюю глубину ~ 300 м и максимальную глубину до 600 м [22, 21]. Концентрация растворенного кислорода в воде озера оценивается в 27–1300 мг/л, что в 2–90 раз превышает содержание кислорода в воде при нормальных условиях [1].

Дно той части озера Восток, которая была изучена с помощью сейсмических измерений, имеет форму ступенчатого изгиба с глубинами дна 4310–5040 м от поверхности льда, где восточная ступень (глубина 4310 м) приподнята относительно западной на 140 м.

Наибольшая толщина слоя воды (1200 м) наблюдается в центральной части профиля S1 [Рис. 1; 16]. Дно озера в верхней части, по-видимому, покрыто рыхлыми осадками толщиной 40–300 м [10].

Акватория озера Восток представлена холмистой подводной равниной. В западной части озера Восток расположен преимущественно горный ландшафт с высотами до 1580 м, а в восточной части — холмистый и равнинный рельеф с перепадами высот в среднем 100 м [21]. Толщина земной коры составляет 34 км к западу от впадины Восток и 36 км к западу от впадины Восток и 36 км к востоку [23].

Дно озера в верхней части, по-видимому, покрыто рыхлыми осадками толщиной 40–300 м [10]. Акватория озера Восток представлена холмистой подводной равниной. В западной части озера Восток преобладает горный ландшафт с высотами до 1580 м, а в восточной — холмистый и равнинный рельеф с перепадами высот в среднем 100 м [21].

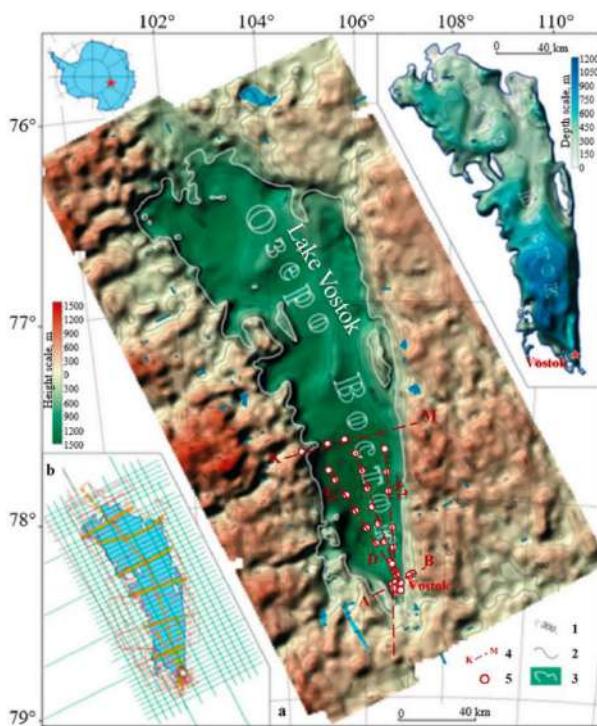


Рис. 1. Коренной рельеф и подледниковые водоемы в районе озера Восток:
 1 — изогипсы коренного рельефа, сечение изолиний через 150 м; 2 — уровень моря;
 3 — береговая линия озера; 4 — сейсмические профили; 5 — точки съемки сейсмических отражений,
 выполненных в рамках 46-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ).
 На левом нижнем врезе показана схема расположения использованных геофизических данных;
 синим цветом показаны подледниковые водоемы;
 красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты [21]

На глубине 55–60 км под озером Восток предположительно выявлена локальная геопространственная область с повышенным геотермальным потоком вдоль транскrustального разлома в земную кору [7]. Бассейн Восток может иметь рифогенную природу, так как зоны разломов не прослежены выше фундамента, и возможно, что «восточный» блок находится в растянутом состоянии, а «западный» — в сжатом [7]. В то же время в районе бассейна озера Восток и к востоку от него возможно увеличение геотермального потока [23].

В «западном» блоке верхняя граница фундамента расположена на глубине 3500 ± 200 м. Она неровная, но не стратифицированная [7]. Толщина донных осадков различна и составляет от 40 до 300 м [10].

Толщина осадочных пород варьируется от 400 м на севере до 1000 м на юге. Ниже этой границы на глубине 3,8–5,0 км залегает кристаллический фундамент [7]. Осадочный пласт состоит из отложений от верхнего протерозоя до юры включительно и представляет собой отложения ледникового и ледниково-морского генезиса, с присутствием алеврито-глинистых отложений с включениями грубозернистого материала (диамектиты; [5]).

Кристаллический фундамент сложен магматизированным и гранитизированным комплексом гнейсов и кристаллических сланцев общей мощностью 15–20 км.

В кристаллическом фундаменте широко распространены докембрийские и нижнепалеозойские интрузии габбро-анортозитов и чарнокитов, а также раннемезозойские интрузии нефелиновых сиенитов [19].

При вскрытии конжеляционного слоя льда скважиной 5Г были обнаружены мелкие (0,1–1,0 см) минеральные включения, захваченные ледником при его движении через западную мелководную часть озера [10]. Пробы озерной воды [13] полученные во время первого вскрытия озера Восток 5 февраля 2012 г., были изучены ранее [15].

Большая часть донных осадков, накопленных в озере Восток и захваченных в процессе нарастания нижнего слоя льда в виде мелких включений, поступила с западного берега озера в результате эрозии коренного ложа ледника. Эти включения содержат косвенную информацию о его геологическом строении.

Исследования керна из скважины 5 G [27] показали, что на глубине 3538 м в основании ледниковых толщ залегает слой аккреционного льда толщиной 200 м, образовавшийся в результате замерзания озерной воды над основанием медленно движущегося (3 м/год) ледника. Верхняя часть этого слоя (от 3538 до 3608 м) насыщена твердыми (минеральными), неравномерно распределенными (от 2 до 25 на 1 м керна) включениями размером 1–2 мм, которые были захвачены при его формировании, когда ледник пересекал мелководную прибрежную зону озера, расположенную к северо-западу от скважины [27]. Они фактически отражают состав его донных отложений, являясь носителями уникальной информации о геологическом строении подледниковой среды.

Установлено, что минеральные включения представляют собой агломераты, образовавшиеся в результате коагуляции глинисто-слюдяных минералов (размером 0,3–0,5 мкм). Среди глинистых минералов преобладают иллит и хлорит, присутствуют обломки (обычно округлые и угловатые) породообразующих и акцессорных минералов. Достоверно определены кварц 10–100 мкм, турмалин (~70 мкм), эпидот, циркон и горнбленд (50–100 мкм), а также рутил, доломит и гидроксиды железа. Установлено, что общая размерность вещества, слагающего твердые включения, соответствует пелито-алевритовой фракции отложений. Вблизи озера расположена крупная гравитационная аномалия. Наличие этой аномалии и глинистых частиц во льду позволяет предположить, что эта часть сложена осадочными породами, возможно, пермо-триасового возраста [10].

Угловая форма кварца и акцессорных минералов свидетельствует о ледниковом переносе обломочного материала. Благодаря находке циркона удалось определить возраст пород, подвергшихся экзарации, который составляет 1,74 млрд лет, что соответствует времени формирования метаморфических комплексов протерозойского подвижного пояса Антарктического кристаллического щита.

Российские исследования и исследования других стран показали хорошее согласие по толщине воды и осадочных пород между гравитационной моделью и сейсмическими измерениями, что подтверждает два основных факта об озере Восток: озеро состоит из осадочных пород, а дно озера покрыто слоем неконсолидированных осадков, толщина которого не превышает 300 м в южной котловине и почти 400 м в северной котловине.

Ледяной покров над озером имеет слоистое, субгоризонтальное строение распределения параметров вещественного состава, петрофизических и петрографических свойств, а также скорости и направления движения ледяных масс (Рис. 2). До глубины 3539 м ледниковый покров сложен льдом атмосферного происхождения, но глубже 3539 м и до контакта ледника с поверхностью озерной воды на глубине 3769,3 м ледниковый покров сложен конжеляционным (озерным) льдом, образованным из воды подледникового резервуара (Рис. 2).

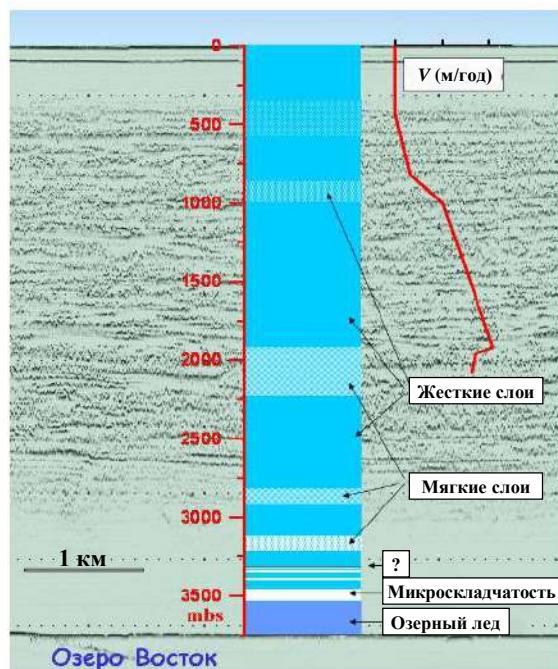


Рис. 2. Слои льда с различными реологическими свойствами в разрезе ледяного покрова в районе станции Восток. Построен профиль скорости льда V относительно поверхности по данным геофизических исследований глубокой скважины

Лед не является абсолютно твердым телом. Даже при низком давлении он проявляет пластические свойства. Это означает, что он меняет свою форму или течет, не превращаясь в жидкость. Экспериментальные и расчетные данные физических свойств льда [3, 29, 30] приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Усредненные физико-механические характеристики льда

Параметр	Значение
Плотность чистого льда ρ_0 , кг/м ³	920
Пористость поверхностного снега c_s	0,69
Показатель уплотнения γ_s , м ⁻¹	0,021
Показатель ползучести α в законе Глена	3,0
Геотермический поток q_0 , Вт/м ²	0,054
Температура плавления льда (на глубине 3700 м) T_f , °С	-2,7
Современная скорость аккумуляции льда b_0 , см/год	2,15
Модуль Юнга E , Па	$9,33 \cdot 10^9$
Модуль объемной деформации B , Па	$8,90 \cdot 10^9$
Модуль сдвига G , Па	$3,52 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона ν	0,35

Механические свойства льда зависят от его структуры, пористости, солености и температуры [6, 8, 9, 17, 18].

Структурные преобразования в толщах антарктических ледников были изучены в результате анализа керна из скважины 5 G на глубине 3769,3 м [11, 14]. Установлена общая закономерность увеличения размеров кристаллов льда с глубиной (Рис. 3). До глубины 2500 м размеры кристаллов не превышают 5 мм, а затем наблюдается их значительный рост. При этом изменяется и ориентация главных осей кристаллов.

Экспериментальные исследования показали, что с понижением температуры увеличивается и предел текучести льда: при понижении температуры от -1,7 °С до -20 °С предел текучести льда увеличивается более чем на 200 %, а до -30 °С — на 300 %. Кривая деформации имеет упруго-пластическую форму с ярко выраженной областью текучести [4].

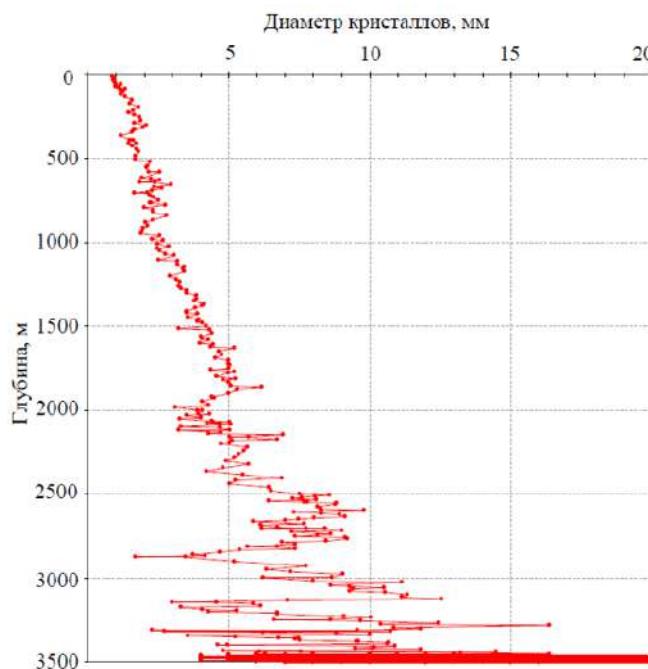


Рис. 3. Изменение размера зерен льда с глубиной [11]

Методология

На основе опубликованных и экспериментальных данных о ледяном покрове и подстилающих породах, коренном рельфе и глубинах подледникового озера Восток [25, 5, 26, 1, 22, 21], была построена трехмерная модель, в которой при численном моделировании напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, вод озера Восток и подстилающих пород использовались упругая модель средних деформаций и упруго-пластическая модель средних деформаций на основе модифицированного критерия текучести фон Мизеса. Обоснование долговременных деформационных характеристик льда выполнено на основе принятой реологической модели [2, 28].

В упругой модели деформирования среды связь между деформациями ε и напряжениями σ (Ур. 1) записывается через матрицу упругости $[D]$, которая включает набор коэффициентов, определяющих поведение среды:

$$\sigma = [D]\varepsilon. \quad (1)$$

Матрица упругости для изотропной линейно-деформируемой среды записывается в следующем виде (Ур. 2):

$$[D] = \frac{E_y}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E_y — модуль упругости, а ν — коэффициент Пуассона.

Упруго-пластическая модель деформирования среды, основанная на модифицированном критерии текучести фон Мизеса, записывается в следующем виде (Ур. 3):

$$\sigma_y = q, \quad (3)$$

где σ_y — граничное значение растягивающих напряжений, соответствующее истинному пределу текучести льда, а q — интенсивность нормальных напряжений.

Для условий объемных напряжений (Ур. 4):

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (4)$$

Для описания реологических процессов в ледяном покрове используется модель двойного степенного закона, которая дает наиболее полное описание развития длительных деформаций, характерных для второй стадии ползучести (т.е. стадии установившейся ползучести).

Модель позволяет учесть влияние интенсивности касательных напряжений на скорость развития деформаций ползучести, а также влияние температуры. Для льда зависимость скорости деформации ползучести от его состояния преобразуется к следующему виду [Ур. 5; 24]:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{\theta - \theta_z}\right) \left(\frac{q_k}{\sigma_0}\right)^{C_1} + A_2 \exp\left(-\frac{B_2}{\theta - \theta_z}\right) \times \left(\frac{q_k}{\sigma_0}\right)^{C_2}, \quad (5)$$

где A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 и C_2 параметры реологической модели, определенные экспериментально, θ — температура льда, θ_z — температура абсолютного нуля, σ_0 — управляющий параметр (принимается равным 1 МПа), q_k — интенсивность касательного напряжения.

Параметры принятых моделей деформирования материала представлены в Таблице 2.

Физико-механические характеристики материалов.

Показатели взяты приблизительно и будут уточнены по результатам лабораторных исследований.
Числители показывают мгновенные значения показателей, а знаменатели — долгосрочные значения

Наименование материала	Плотность, кг/м ³	Модуль деформации, МПа	Модуль объемного сжатия, МПа	Коэффициент поперечной деформации	Прочность сжатия, МПа	Прочность растяжения, МПа
Ледовый покров	920	9000 1000	—	0,350 0,495	10	1
Вода озера Восток	1000	—	2100	0,499	—	—
Подстилающие породы	2600	10 000	—	0,230	—	—

Описанные модели реализованы в программном комплексе *SIMULIA Abaqus CAE*.

Для прогноза напряженно-деформированного состояния ледяного щита, вод озера Восток и подстилающих пород построены две конечно-элементные модели в плоско деформированном (Рис. 4а) и пространственном (Рис. 4б) режимах. Построение геометрии моделей осуществлялось на основе данных геофизических исследований с некоторыми упрощениями, не оказывающими существенного влияния на результаты прогноза напряженно-деформированного состояния.

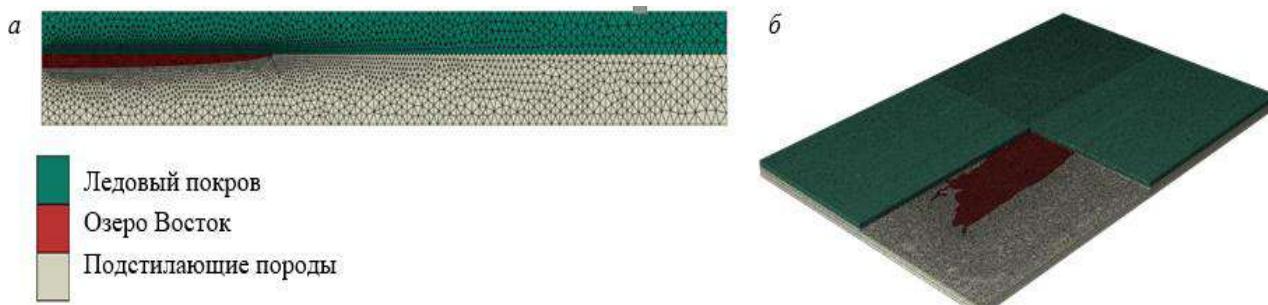


Рис. 4. Плоская (а) и пространственная (б) конечно-элементные модели прогноза напряженно-деформированного состояния ледового покрова, вод озера Восток и подстилающих пород

Задача решалась в гравитационной постановке со следующими граничными условиями: смещения вдоль нижней границы модели запрещены во всех направлениях; смещения вдоль боковых границ модели запрещены в направлении, нормальном к этим границам; смещения вдоль верхней границы модели не ограничены.

Размеры плоской модели: ширина = 90 км и высота = 10 км. Геометрия разбита на треугольные квадратичные конечные элементы. Размеры пространственной модели: длина = 2360 км, ширина = 2360 км и высота = 10 км. Геометрия разбита на тетраэдрические квадратичные конечные элементы.

Численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния рассматриваемой системы проводилось в следующей последовательности: формирование начального напряженного состояния до образования ледяного покрова; формирование напряженного состояния рассматриваемой системы в процессе образования ледяного покрова.

Определение свойств горных пород

При исследовании физико-механических свойств горных пород, в связи с ограниченным объемом отбираемых образцов и их нестандартной формой, использовались методы испытания образцов правильной (цилиндрической) и неправильной формы сферическими инденторами.

Исследования проводились по стандартной методике (ГОСТ 24941-81) и дополнены данными для определения комплекса механических параметров по усовершенствованной методике, разработанной в лаборатории физико-механических свойств Санкт-Петербургского горного университета. Предварительно в образцах были измерены скорости упругих волн, а затем проведены испытания в режиме контролируемой деформации.

Определены следующие показатели физико-механических характеристик образцов: плотность образцов правильной формы (объемная плотность), скорости распространения упругих продольных (VP) и поперечных волн (VS), пределы прочности при одноосном сжатии (σ_{cj}) и растяжении (σ_p), показатель хрупкости (Bi), когезия (C) при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения (ϕ), а также деформационные характеристики — модули общей деформации и упругости, коэффициенты поперечной деформации, модуль снижения несущей способности и остаточная прочность. Проведена статистическая обработка результатов испытаний.

Описание образцов приведено в Таблице 3.

Таблица 3

Краткое описание отобранных образцов

Проба №	Место отбора	Описание пробы
51101	Восточный край ледника Амери, остров Мусинъо	Мелко- и короткозернистый чарнокитоид (кембрийские метаморфизованные интрузии)
51101-1	Восточный край ледника Амери, остров Мусинъо	Прожилковый, средне- и крупнозернистый гранитоидный гнейс (кембрийские метаморфизованные интрузии)
52338-1	Массив Фишера, центральная часть	Серпентинизированный ультрабазит (мезопротерозойские метаморфизованные интрузии)
52826-3	Массив Фишера, юго-восточные породы	Крупнозернистый кварцевый монцогаббро (мезопротерозойские метаморфизованные интрузии)
52908-1	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Полимиктовый гравелит (пермо-триасовые отложения)
52908-6	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Полимиктовый конгломерат (пермо-триасовые отложения)
52910-1	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Среднезернистый гравийный песчаник (пермо-триасовые отложения)
53431-3	Залив Прюдс, остров Беллинген	Мелкозернистый биотит-гранатовый гнейс (неопротерозойские метаморфизованные отложения)
54427-2Б	Горы Принца Чарльза, массив Маклауд, западный берег озера Радок	Крупнозернистый микроклиновый гранит (неопротерозойские интрузии)
5410 (54427-2Б)	Горы Принца Чарльза, массив Маклауд, западный берег озера Радок	Мелко- и среднезернистый ортогнейс среднего состава (мезо-неопротерозойские первичные магматические образования)

Результаты

В результате лабораторных исследований 10 образцов горных пород из Восточной Антарктиды получена новая информация о литологических разностях фундамента и установлено наличие пермо-триасовых осадочных отложений в синрифтовом комплексе.

Результаты испытаний 10 образцов, представленных магматическими, метаморфическими и осадочными породами, собранными в Восточной Антарктиде (район гор Принца Чарльза), приведены в табл. 4. Представлен комплекс физико-механических параметров пород, определенных по результатам испытаний образцов неправильной формы со сферическими инденторами: пределы прочности при одноосном растяжении (σ_p) и сжатии (σ_{cj}), показатель хрупкости (Bi), предел прочности при сдвиге без нормальных напряжений (когезия; C_0) и соответствующий угол внутреннего трения (ϕ_0), когезия (C) при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения (ϕ) модуль упругости (E_y) и коэффициент Пуассона (v), остаточная прочность при одноосном сжатии (σ_R). Проведена статистическая обработка данных.

Результаты расчетов и прогноза напряженно-деформированного состояния системы «ледяной покров-озеро-подстилающие породы» представлены в виде диаграмм распределения вертикальных и горизонтальных напряжений, а также в виде диаграмм результирующих абсолютных деформаций и диаграмм пластических деформаций.

Результаты расчетов в постановке плоской деформации (Рис. 5) позволяют судить о характере прогиба ледяного покрова над озером Восток и изменении напряженного состояния воды в озере. Установлено, что потенциальный прогиб ледяного покрова может достигать 250 м при принятых механических характеристиках модулей льда и водной массы.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов неправильной формы сферическими инденторами и их статистическая обработка

Номер пробы	Проба	σ_p , МПа	σ_{cs} , МПа	K_{sp}	C_b , МПа	ϕ_b , град	C , МПа	ϕ , град	τ_{max}	μ	σ_R , МПа	$E_y \cdot 10^4$, МПа
1	521101	38,30772*	280,0981	7,463779	66,46047	54,32151	78,10359	31,05589	535,3268	0,294752	21,26	4,9
		5,230771**	63,19991	2,180692	7,177906	6,396274	11,14079	4,706684	319,4989	0,118624	3,59	0,41
		13,65461***	22,56349	29,21699	10,80026	11,77484	14,26412	15,15553	59,68297	40,2454	16,88617	8,367347
		4****	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	51101-1 перпенди.	7,730005	53,74231	6,964979	13,14289	53,70193	15,28877	30,47448	87,88383	0,298178	5,24	1,2
		3,057001	23,17355	1,058411	5,401421	3,622346	6,374545	2,58813	44,24567	0,072146	1,94	0,2
		39,54721	43,11975	15,19619	41,09766	6,745281	41,69429	8,492779	50,34563	24,19549	37,0229	16,66667
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	51101-1 парал.	10,65343	53,88671	5,13884	15,41279	46,5601	17,0541	25,50567	54,76203	0,452151	24,52	—
		3,059592	12,65147	0,510185	4,001538	2,488361	4,292722	1,66136	10,68128	0,060165	4,64	—
		28,71931	23,47791	9,928022	25,96245	5,344407	25,1712	6,51369	19,50491	13,3064	18,92333	—
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	—
3	52338-1	43,11024	247,8883	5,768515	66,51789	49,47749	75,06432	27,47218	306,1374	0,383523	24,526	6,5
		8,033813	52,08783	0,698329	12,61762	3,01989	14,59549	2,06379	100,1864	0,067915	4,640046	2,5
		18,63551	21,01262	12,10588	18,96876	6,103563	19,44397	7,51229	32,72595	17,7083	18,91889	38,46154
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	52826-3	17,66563	121,0857	6,989387	29,77686	53,55363	34,57335	30,39909	198,0854	0,303142	9,82625	2,7
		7,548924	55,39224	1,308642	12,96187	4,262734	15,24687	3,076626	114,7121	0,082596	4,193549	0,32
		42,73227	45,74632	18,72327	43,53002	7,959748	44,10005	10,12078	57,91043	27,24654	42,67701	11,85185
		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6
5	52908-1	8,475596	47,56542	5,670496	12,90471	48,84137	14,513	27,06607	57,71404	0,40072	4,85	3,4
		1,985592	10,11841	0,962914	2,669237	4,13745	2,975296	2,828671	21,81659	0,093363	1,2	0,54
		23,42717	21,27261	16,98112	20,68421	8,471199	20,5009	10,45098	37,80119	23,2987	24,74227	15,88235
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6	52908-6	8,885295	59,16962	7,062955	14,72893	53,54988	17,03179	30,42855	95,71384	0,305382	4,97	1,5
		3,489844	14,01227	1,639988	4,405751	5,037831	4,676626	3,662253	31,94282	0,097257	2,09	0,19
		39,27663	23,68153	23,21958	29,91222	9,407734	27,45821	12,03558	33,37326	31,84769	42,05231	12,66667
		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
7	52910-1	5,800909	33,8511	5,882291	9,015565	49,89674	10,1982	27,76757	42,94855	0,374847	3,29	1,3
		1,922801	10,79403	0,810901	2,871862	3,3046	3,234003	2,281191	17,02848	0,072663	1,11	0,01
		33,14655	31,88678	13,78546	31,85449	6,622877	31,71152	8,215309	39,64857	19,38471	33,7386	0,769231
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2
8	53431-3	24,12385	179,2449	7,628907	42,17863	54,75762	49,70744	31,37848	354,0061	0,286513	13,37	3,6
		4,537201	41,7168	2,308339	5,600976	6,327778	7,815362	4,698811	229,754	0,116121	2,96	0,73
		18,80794	23,27363	30,25779	13,27918	11,55598	15,72272	14,97463	64,90116	40,52916	22,13912	20,27778
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	54427-2Б	24,75456	166,9738	6,887386	41,36243	53,23575	47,90744	30,16733	269,032	0,309094	13,8	2,4
		6,186016	40,03593	1,400078	9,148416	4,582923	10,65471	3,306678	120,8175	0,088692	3,63	0,22
		24,9894	23,97737	20,32815	22,11769	8,608732	22,2402	10,96112	44,90824	28,69409	26,30435	9,166667
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	5410-1	22,86534	156,1108	7,019673	38,52449	53,98698	44,67762	30,66284	247,9634	0,291178	12,69	4,4
		10,29432	63,87992	0,932596	16,36949	2,895051	18,70434	2,113176	101,2884	0,054044	5,81	0,4
		45,02151	40,91959	13,28546	42,49112	5,362498	41,86512	6,891652	40,84811	18,56064	45,78408	9,090909
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

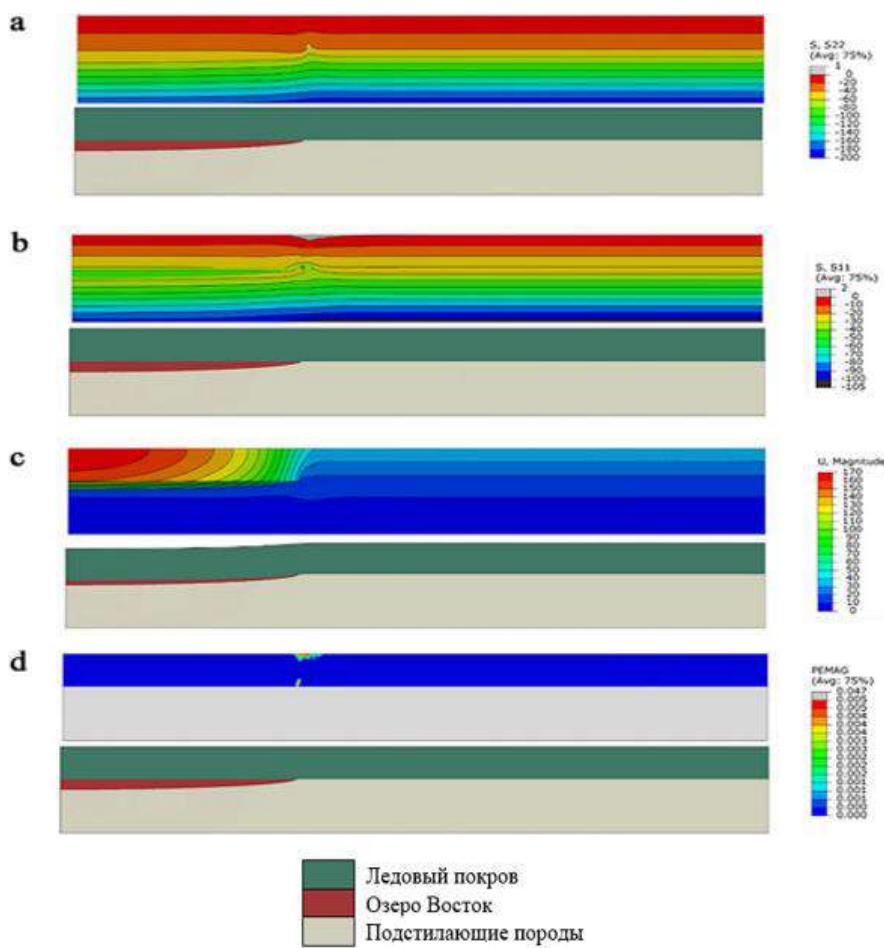


Рис. 5. Картина распределения в плоско-деформационной постановке в ледовом покрове, водах озера Восток и подстилающих породах:
 а — вертикальных напряжений (МПа); б — горизонтальных напряжений (МПа);
 в — результирующих абсолютных деформаций (м); г — пластических деформаций (д.е.)

Влияние изменения долгосрочного модуля деформации льда в диапазоне 250–1000 МПа и модуля объемной деформации воды в диапазоне 2100–3000 МПа описывается нелинейной зависимостью, при которой значения прогиба ледяного покрова увеличиваются по мере уменьшения модуля деформации (Рис. 6).

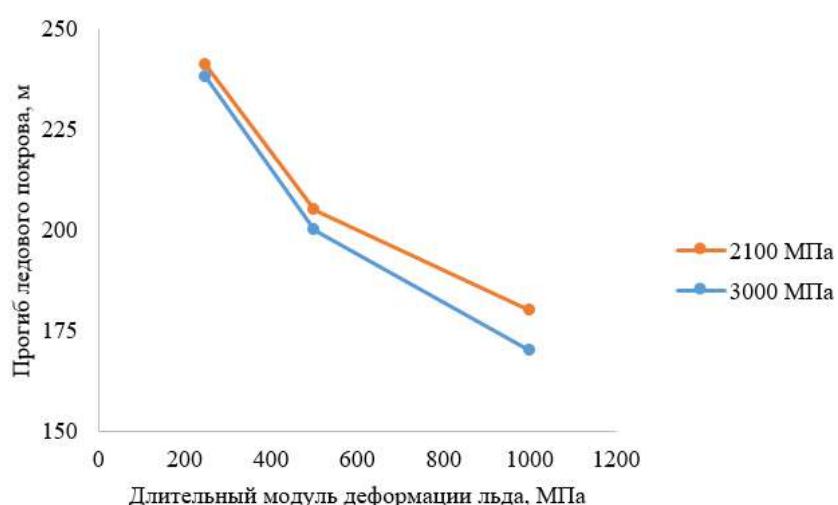


Рис. 6. Изменение максимальной величины прогиба ледового покрова в зависимости от длительного модуля деформации льда и модуля объемного сжатия воды в озере Восток

Наибольший прогиб наблюдается над центром озера Восток. Картинны распределения напряжений свидетельствуют о сложном характере распределения напряжений в рассматриваемой системе в окрестности озера. Зона пластических деформаций формируется в краевых областях озера и, как показывают результаты, не распространяется на всю высоту ледяного покрова.

Результаты расчетов, выполненных в пространственной постановке, представлены в виде профилей распределения вертикальных и горизонтальных напряжений и результирующих абсолютных и пластических деформаций (Рис. 7). Учет сложной геометрии озера Восток позволил уточнить характер формирования напряженно-деформированного состояния ледяного покрова. В целом можно отметить качественную и количественную сходимость результатов моделирования в плоскостных и пространственных постановках.

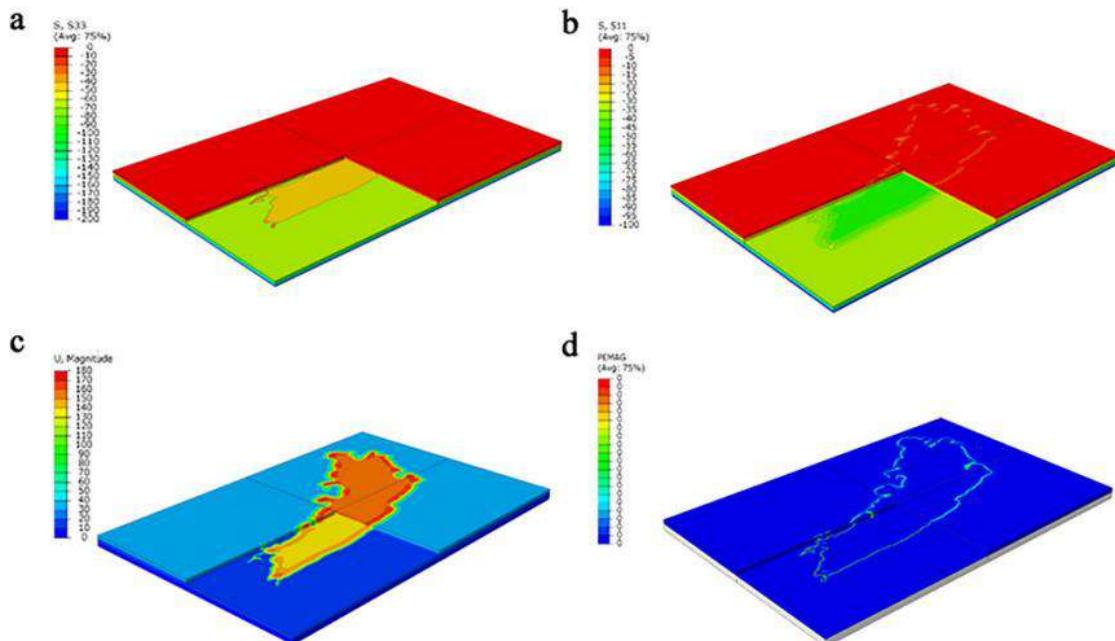


Рис. 7. Картинны распределения в пространственной постановке в ледовом покрове, водах озера Восток и подстилающих породах:
а — вертикальных напряжений (МПа); б — горизонтальных напряжений (МПа);
в — результирующих абсолютных деформаций (м); г — пластических деформаций (д.е.)

Обсуждение

Для проверки достоверности и корректности результатов численного моделирования геомеханическая модель была верифицирована по данным экспериментальных испытаний образцов подстилающих пород и полевых наблюдений в скважине 5Г, пробуренной на глубину 3769,3 м до поверхности озера Восток.

Геометрические размеры пространственной модели были выбраны таким образом, чтобы погрешность расчетов на границах модели не превышала 1 %.

Усредненные реологические параметры, учитывающие влияние максимальной скорости деформации ползучести (A_1 и A_2), нелинейную зависимость между начальной скоростью и напряжениями (C_1 и C_2) и зависимость скорости деформации ползучести от температуры (B_1 и B_2), подобраны с необходимой точностью для описания процесса деформирования ледяного покрова по данным полевых наблюдений в скважине 5Г.

Значения напряжений на контакте ледника с озером по результатам численного моделирования определены в диапазоне 32,0–35,0 МПа, а в районе скважины 5Г — 34,60 МПа, что удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными по давлению ледника на контакте с озером $33.78 \pm 0,05$ МПа, полученными по результатам измерения плотности ледяного керна из скважины 5 Г [12]. Небольшое расхождение в результатах объясняется усреднением в модели реологических свойств льда по слоям, а также фрактальными свойствами кристаллов льда и изменением температуры по глубине ледяного покрова.

Заключение

Разработана новая трехмерная геомеханическая модель системы «ледник-подледник-озеро-порода», позволяющая моделировать изменения напряженно-деформированного состояния системы с учетом бурения глубоких скважин.

Впервые экспериментально определен комплекс физико-механических характеристик пород Восточной Антарктиды (район гор Принца Чарльза), включающий объемную плотность, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн, предел прочности при одноосном сжатии и растяжении, коэффициент хрупкости, когезию при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения, а также деформационные характеристики (модули общей деформации и упругости, коэффициенты поперечной деформации, модули снижения несущей способности и остаточной прочности).

Численное моделирование показало, что прогиб ледяного покрова при заданных характеристиках льда может достигать величины 250 м и более. Изменение механических характеристик ледяного покрова может существенно повлиять на эту величину.

Отмечено, что напряжения в водах озера Восток распределяются по гидростатическому закону, а напряжения в ледяном покрове — по закону, близкому к гидростатическому. Определены зоны развития пластических деформаций ледяного покрова над озером Восток. Показано, что пластические деформации в ледяном покрове локализованы в областях по периметру озера, а максимальная интенсивность их распространения приурочена к нижним и верхним слоям ледяного покрова.

Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами натурных наблюдений, полученных при бурении сверхглубокой скважины и проникновении в подледниковое озеро Восток на глубину 3769,3 м.

Установленные закономерности формирования напряженно-деформированного состояния в элементах рассматриваемой системы могут быть использованы в качестве исходных данных для моделирования процессов бурения скважин, а также для прогнозирования основных параметров природной среды в подледниковом озере Восток и подстилающих породах, необходимых для проектирования и эффективной эксплуатации уникальной исследовательской аппаратуры и приборов.

В дальнейших исследованиях планируется экспериментально уточнить структуру и прочностные и деформационные характеристики ледяного покрова, а также подстилающих пород, выявить влияние глубинных геотермальных потоков, что позволит усовершенствовать трехмерную геомеханическую модель системы «ледник — подледниковое озеро-порода» и рассматривать ее как динамическую нелинейную систему в рамках крупномасштабного исследования подледникового озера Восток.

Вклад авторов. Оба автора внесли равный вклад в подготовку статьи. Оба автора прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору М. А. Карасеву за помощь в подготовке расчетов и анонимным рецензентам за полезные замечания по улучшению работы.

Финансовая поддержка. Работа выполнена в рамках темы «Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических формаций Антарктиды».

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют об отсутствии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arapov, P. P., Lipenkov, V. Y. & Savatyugin, L. M. 2005. Issledovanie podlednikovogo ozera Vostok v Antarktide [Research of subglacial Lake Vostok in Antarctica]. Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences, 2, 119–121.
2. Ashby, M. F. & Duval, P. 1985. The creep of polycrystalline ice. Cold Regions Science and Technology, 11, 10.1016/0165-232x(85)90052-7.
3. Epifanov, V. P. 2007. Reologicheskie osobennosti antarkticheskogo l'da [Rheological peculiarities of Antarctic ice]. Materials of Glaciologic Studies, 103, 96–106.
4. Glazovsky, A. F., Epifanov, V. P. & Yuryev, R. V. 2008. Reologicheskie harakter- istiki l'da i ikh vliianie na dinamiku Antarkticheskogo lednikovogo pokrova [Rheological parameters of ice and their implication on the Antarctic ice sheet dynamics]. Proceedings of Glaciological Research, 105, 17–28.
5. Grikurov, G. E., Leichenkov, G. L., Kamenev, E. V., Mikhalsky, A. V., Golinsky, V. N., Masolov, V., et al. 2003. Tektonicheskoe rai'onirowanie Antarktiki i ee minerageniya [Antarctic tectonic and mineralogic provinces]. Arctic and Antarctic, 2, 26–47.

6. Higashi, A., Koinuma, S. & Mae, S. 1964. Plastic yielding in ice single crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 3, 10.1143/jjap.3.610.
7. Isanina, E. V., Krupnova, N. A., Popov, S. V., Masolov, V. N. & Lukin, V. V. 2009. Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismic observations. *Geotectonics*, 43, 10.1134/s0016852109030042.
8. Jones, S. J. & Glen, J. W. 1969a. The mechanical properties of single crystals of pure ice. *Journal of Glaciology*, 8, 10.3189/s0022143000027040.
9. Jones, S. J. & Glen, J. W. 1969b. The effect of dissolved impurities on the mechanical properties of ice crystals. *Philosophical Magazine*, 19, 10.1080/14786436908217758.
10. Leitchenkov, G. L., Antonov, A. V., Lunev, P. I. & Lipenkov, V. Ya. 2016. Geology and environments of subglacial Lake Vostok. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374, 10.1098/rsta.2014.0302.
11. Lipenkov, V. Ya., Polyakova, E. V., Duval, P. & Preobrazhenskaya, A. V. 2007. Internal structure of the Antarctic ice sheet in the vicinity of Vostok station from the deep-ice core thin-section studies. *Arctic and Antarctic Research*, 70, 6–20.
12. Lipenkov, V. Ya., Turkeev, A. V., Vasilev, N. I., Ekaykin, A. A. & Poliakova, E. V. 2021. Melting temperature of ice and total gas content of water at the ice-water interface above subglacial Lake Vostok. *Arctic and Antarctic Research*, 67, 10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367.
13. Lipenkov, V. Ya., Ekaykin, A. A., Alekhina, I., Shibaev, Y. A., Kozachek, A., Vladimirova, D., et al. 2017. Evolution of climate, glaciation and subglacial environments of Antarctica from the deep ice core and Lake Vostok water sample studies (key results of implementation of the Russian Science Foundation project, 2014–2016). *Ice and Snow*, 57, 10.15356/2076-6734-2017-1-133-141.
14. Lipenkov, V. Ya., Lukin, V. V., Bulat, S. A., Vasiliev, N. I., Ekaikin, A. A., Leichenkov, G. L., et al. 2011. Scientific outcomes of subglacial lake Vostok studies in the IPY. In Kotlyakov, V.M., ed., *Polar cryosphere and terrestrial waters: Russia's contribution to the International Polar Year 2007/08*. Paris: Paulsen Editions, 17–47.
15. Litvinenko, V. 2020. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*, 80, 10.1016/j.chemer.2020.125652.
16. Masolov, V. N., Popov, S. V., Lukin, V. V. & Popkov, A. M. 2010. The bottom topography and subglacial Lake Vostok water body, East Antarctica. *Doklady Earth Sciences*, 433, 10.1134/s1028334x10080222.
17. Michel, B. & Ramseier, R. O. 1971. Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 10.1139/t71-004.
18. Nanthikesan, S. & Shyam Sunder, S. 1994. Anisotropic elasticity of polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, 10.1016/0165-232x(94)90026-4.
19. Pandey, M., Pant, N. C., Arora, D., Ferraccioli, F., Gupta, R. & Joshi, S. 2023. Unravelling the complex sub-ice geology of the Wilkes Subglacial Basin region of East Antarctica from marine sediment provenance analyses. *Antarctic Science*, 35, 10.1017/S0954102023000123.
20. Popov, S. V. 2021. Six decades of radar and seismic research in antarctica. *Ice and Snow*, 61, 10.31857/s2076673421040110.
21. Popov, S. V. & Lunev, P. I. 2012. Orografia korennoi rel'efa rai'ona podlednikovogo ozera Vostok (Vostochnaia Antarktida) [Orography of the bedrock relief of subglacial lake Vostok and its vicinity (East Antarctic)]. *Geomorphology RAS*, 1, 10.15356/0435-4281-2012-1-81-91.
22. Popov, S. V., Masolov, V. N. & Lukin, V. V. 2011. Ozero Vostok, Vostochnaia Antarktida: moshchnost' lednika, glubina ozera, podledny'i i korennoi rel'ef [Lake Vostok, East Antarctica: glacier thickness, lake depth, subglacial and bedrock relief]. *Ice and Snow*, 1, 25–35.
23. Popov, S. V., Masolov, V. N., Lukin, V. V. & Popkov, A. M. 2012. Otechestvenny'e sei'smicheskie, radiolokacionny'e i sei'smolicheskie issledovaniia podlednikovogo ozera Vostok [National seismic, radar and seismological studies of subglacial Lake Vostok]. *Ice and Snow*, 52, 10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.
24. Protosenya, A. G. & Katerov, A. M. 2023. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 3, 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.
25. Ravich, M. G. & Kamenev, E. N. 1972. Kristallicheskii' fundament Antarkticheskoi' platformy' [Crystalline basement of the Antarctic platform]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
26. Savatyugin, L. M. & Preobrazhenskaya, M. A. 1999. Rossii'skie issledovaniia v Antarktike. Tom I [Russian studies in Antarctica. Vol. 1]. St Petersburg: Gidrometeoizdat.
27. Savatyugin, L. M., Verkulich, S. R., Masolov, V. N., Sheremetev, A. N., Lipenkov, V. Y., Abyzov, S. S., et al. 2003. Podlednikovoe ozero Vostok (Antarktida): osnovny'e rezul'taty' geofizicheskikh, gliatcologicheskikh i mikrobiologicheskikh issledovanii poslednikh let [Subglacial Lake Vostok (Antarctica): results and prospects of geophysical, glaciological and microbiological studies of recent years]. *Arctic and Antarctic*, 2, 63–75.
28. Shyam Sunder, S. & Wu, M. S. 1990. On the constitutive modeling of transient creep in polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 18, 10.1016/0165-232x(90)90025-r.
29. Tsyganova, E. A., Popov, S. V., Salamatin, A. N. & Lipenkov, V. Ya. 2010. Rezul'taty' radiolokacionnogo zondirovaniia i modelirovaniia techenii lednikovogo pokrova Vostochnoi' Antarktidy' vdol' linii toka, prohodiaschchei' cherez stantciu Vostok [Results of radar sounding and modeling of the East Antarctica ice sheet flow along the current line passing through Vostok Station]. *Ice and Snow*, 1, 14–29.
30. Vasilev, N. I., Dmitriev, A. N. & Lipenkov, V. Y. 2016. Results of the 5 G borehole drilling at Russian Antarctic station 'Vostok' and researches of ice cores. *Journal of Mining Institute*, 218, 161.
31. Yang, Y. & Song, X. 2023. Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16, 10.1038/s41561-022-01112-z.

Управление температурным режимом при хранении сырья в процессе производства биодизельного топлива

А. М. ЕРЕМЕЕВА¹✉, Ю. В. ИЛЮШИН²

¹ Кафедра геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106 Санкт-Петербург, Россия

² Экономический факультет, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106 Санкт-Петербург, Россия; ilyushin_yuv@pers.spmi.ru
✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Eremeeva, A. M.; Ilyushin, Y. V. Temperature Control During Storage of Raw Materials in the Process of Biodiesel Fuel Production. Inventions 2025, 10, 7. <https://doi.org/10.3390/inventions10010007>.

Аннотация. Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.3390/inventions10010007. В современных условиях рас-
тущего потребительского рынка экологически чистых производств остро стоит вопрос оптимизации ресурсо-
емких и энергоемких технологических цепочек. Одним из самых затратных этапов является хранение зерна —
сырья для производства биодизеля. Это связано с отсутствием единой системы температурного контроля.
В данной работе авторы разработали математическую модель и программно-аппаратный комплекс, позволяю-
щий измерять температурное поле в зернохранилищах. Для решения поставленной задачи авторы использо-
вали методологии, заимствованные из пространственных распределенных систем, для построения математи-
ческой модели. Затем была проведена разработка технического устройства и реализация программного модуля
для обработки измеренных данных на языке C++ Builder.

Ключевые слова: биодизель; камера хранения; зерно; температурное поле; моделирование

Temperature Control During Storage of Raw Materials in the Process of Biodiesel Fuel Production

Anzhelika M. EREMEEVA¹✉ and Yury V. ILYUSHIN²

¹ Department of Geoecology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
199106 Saint Petersburg, Russia

² Faculty of Economics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
199106 Saint Petersburg, Russia; ilyushin_yuv@pers.spmi.ru
✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

Abstract. In the modern conditions of the growing consumer market for environmentally friendly industries, the issue of optimizing resource-intensive and energy-intensive technological chains is acute. One of the most expensive stages is the storage of grain—raw materials for the production of biodiesel. This is due to there being no unified temperature control system. In this paper, the authors have developed a mathematical model and a hardware-software complex that allows for the measurement of the temperature field in grain storage areas. To address this challenge, the authors employed methodologies derived from spatial distributed systems to construct a mathematical model. The development of a technical device and the implementation of a software module for processing the measured data in C++ Builder were then undertaken.

Keywords: biodiesel; storage chamber; grain; temperature field; modeling

1. Введение

Во всем мире одной из актуальных проблем является повышение экологической чистоты воздуха и снижение концентрации вредных выбросов в атмосфере до минимальных значений. Наибольшее влияние на здоровье человека и природу оказывают угарный газ, оксиды азота и пары углеводородов, входящие в состав выхлопных газов [1, 2]. Также не стоит забывать о проблеме парниковых газов [3, 4]; во всем мире разрабатываются программы по декарбонизации и сокращению CO₂ до минимума [5–7].

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

Еще одной общей проблемой для многих стран является нехватка нефтяных ресурсов для производства топлива. В связи с нехваткой запасов нефти и средним уровнем ее переработки на уровне 85 % [8, 9], возникает необходимость создания технологий для производства альтернативных источников энергии [10–12].

К наиболее распространенным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относятся водородная энергетика [13–15], ветровая энергетика [16], солнечная энергия [17], гидроэнергетика и другие. Несмотря на то, что частичное использование возобновляемых источников энергии эффективно влияет на энергетический баланс страны, все больше автомобилей оснащаются двигателями внутреннего сгорания, которые производят загрязняющие вещества. Полный отказ от автомобилей с двигателями внутреннего сгорания приведет к остановке многих производств, поэтому такой вариант невозможен.

За последние 15 лет производство биотоплива в мире увеличилось более чем в 20 раз, и его текущий объем превысил 70 млн тонн в год, что составляет около 1 % от общего потребления нефти. Рост производства биотоплива, такого как этанол и биодизель, обусловлен расширяющим спросом на экологически чистое топливо, стремлением снизить зависимость от ископаемых видов топлива, а также государственной поддержкой в виде субсидий и налоговых льгот. По прогнозам Международной энергетической организации (МЭА), к 2035 году потребление биотоплива в мире достигнет 150 млн тонн в год [18].

В структуре жидкого биотоплива 74 % приходится на биоэтанол, 22 % — на биодизель и 4 % — на «зеленое» дизельное топливо. Лидером по потреблению этих видов топлива являются США (46 %), за ними следует Бразилия (24 %); Европа и остальной мир потребляют по 15 % [19]. Географическое распределение стран-лидеров в исследованиях по биодизелю представлено на рисунке 1. Чем насыщеннее синий цвет на рисунке 1, тем больше издано публикаций по данной теме в стране.

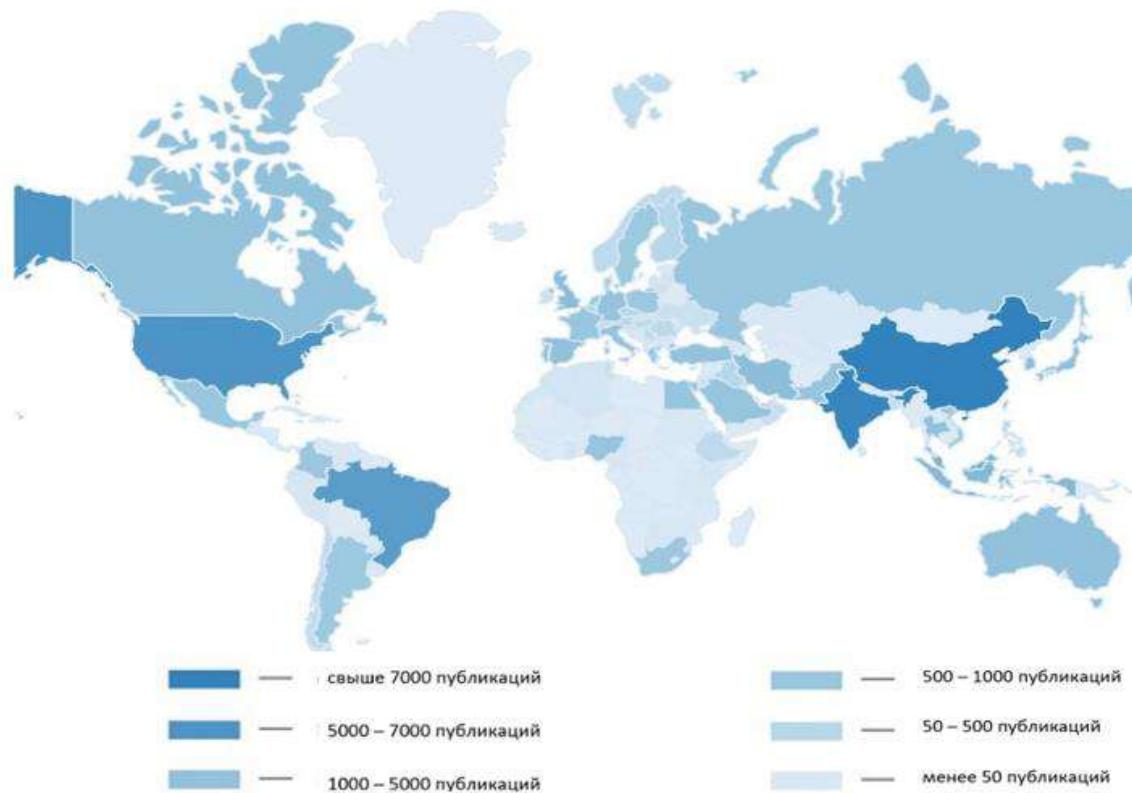


Рис. 1. Географическое распределение стран-лидеров в исследованиях по биодизелю
(данные актуальны на 24 декабря 2024 года)

Большая часть транспортного сектора в этих странах состоит из техники, оснащенной дизельными двигателями [20]. Биодизель не наносит вреда растениям и животным при попадании в воду. Кроме того, он подвергается практически полному биологическому разложению:

в почве или в воде микроорганизмы перерабатывают 99 % биодизеля за 28 дней, сводя к минимуму загрязнение рек и озер [21].

Вопросами изучения процессов производства и модернизации биодизеля активно занимаются с 2006 года [22, 23], но количество исследований и публикаций с их результатами постоянно растет; в 2022 году было опубликовано наибольшее количество научных статей по технологии производства биодизеля (Рисунок 2).

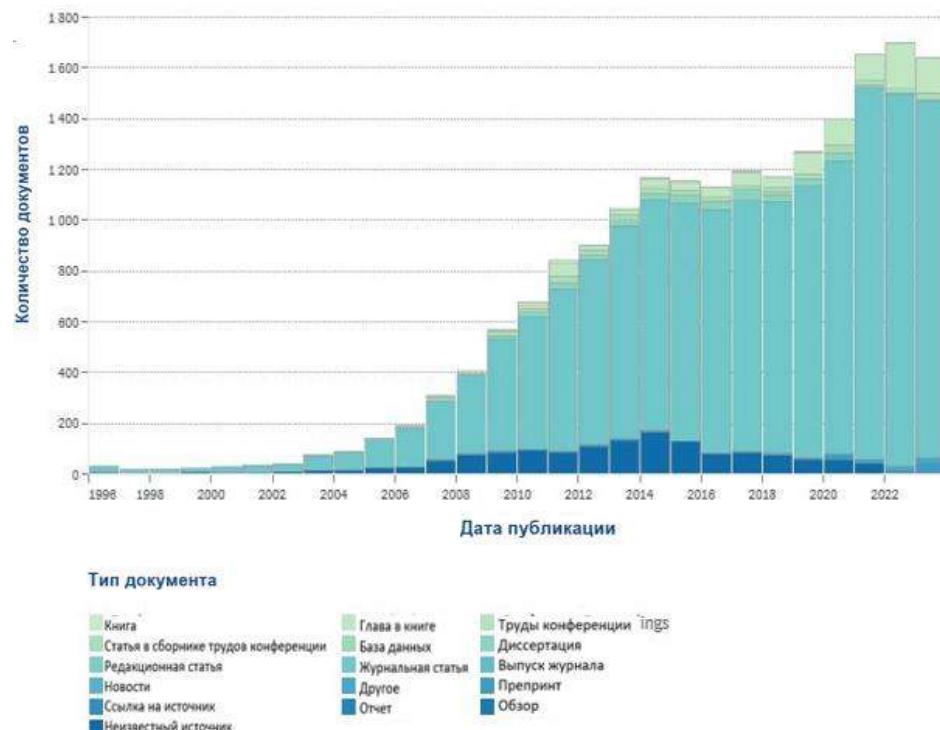


Рис. 2. Динамика изменения количества научных публикаций, связанных с производством биодизеля

За последние 5 лет наибольший интерес мирового научного сообщества в области альтернативных видов топлива представляло изучение биомассы и топлива [24–26], а также изучение масел [27], зерна и процессов хранения зерна. Анализ ключевых слов и названий публикаций показал, что использование слов «биомасса», «топливо», «биотехнология», «масло», «зерно», «растения», «процесс хранения» в большинстве случаев происходит в сочетании со словом «будущее», что позволяет оценить перспективы рассматриваемых процессов и технологий применительно к отраслям промышленности всего мира (Рисунок 3).

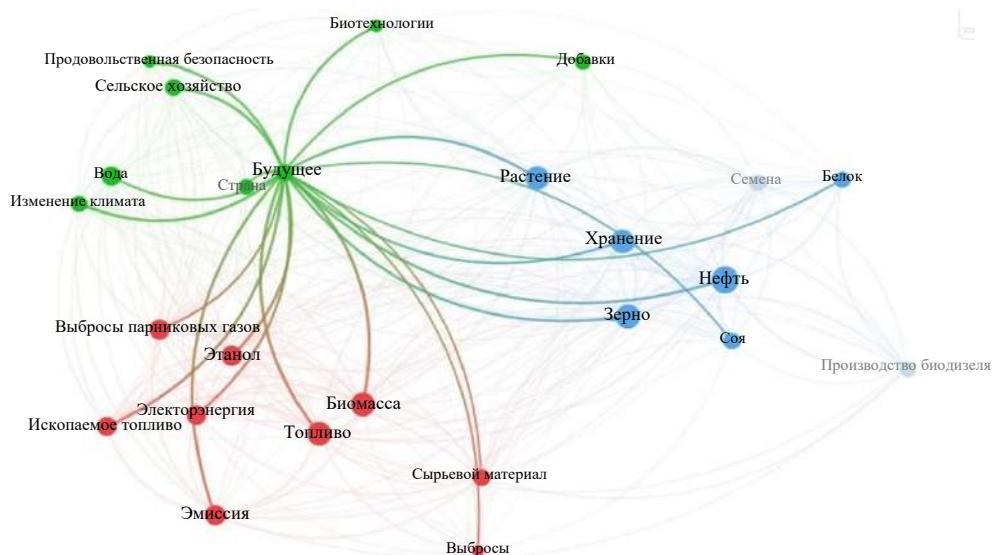


Рис. 3. Графическое представление связей ключевых слов, созданное с помощью программы WOSviewer версии 1.6.20

Для производства биодизеля в больших количествах необходим дополнительный ряд процессов [28]. Технологическая цепочка производства биодизеля состоит из следующих этапов: сбор, хранение и подготовка сырья, переработка сырья в растительное масло, переработка масла в биотопливо и очистка товарного биотоплива. Чаще всего в качестве сырья используются семена различных масличных культур (вид культуры зависит от страны и климатических условий) [29–31].

На самом первом этапе производства биодизеля, а именно при получении и хранении сырья, существует высокая вероятность порчи партии сырья при несоблюдении необходимых условий хранения. При нагревании хранящейся продукции есть риск вытекания масла из семян, что приводит к образованию корки и препятствует дальнейшему использованию партии [32]. Оптимальный допустимый интервал температуры хранения семян составляет 10–15 °C.

2. Существующее техническое решение

Большинство исследований, связанных с хранением зерновых культур в силосах, направлено на решение проблемы регулирования температуры на основе данных, полученных от центра и стен металлической конструкции силоса.

Чтобы компенсировать сезонные колебания и колебаний цен рекомендуется использовать как можно большее количество бункеров для хранения семян, чтобы масличные культуры можно было хранить месяцами и использовать в процессе, не завися от поставок. В большинстве существующих работ описывается использование плоских или высоких складских ячеек, а также крытых и открытых силосов. Семена охлаждают более холодным ночным воздухом или охладительным агрегатом.

Семенной бункер — это контейнер, который должен быть сконструирован таким образом, чтобы он мог хранить сырье в течение всего производственного дня и непрерывно снабжать прессы — следующий шаг в процессе переработки зерна в биодизельное топливо. В этом контейнере возможен умеренный предварительный нагрев до температуры окружающей среды, который может быть осуществлен с использованием низкотемпературного сбросного тепла [33–35]. Предварительный нагрев также имеет преимущество, поскольку водяной пар, образующийся в прессах, не конденсируется на холодных семенах, а может быть отведен [36].

Многие ученые занимались исследованиями в области температурного контроля и систем охлаждения [37, 38].

В современном сельском хозяйстве обеспечение оптимальных условий хранения зерна имеет решающее значение для поддержания качества и минимизации потерь, что привело к широкому внедрению сложных систем контроля температуры в крупных зернохранилищах. Эти системы предназначены для постоянного мониторинга колебаний температуры в различных местах зерновой массы. Такие исследователи, как Каландаров и Абдуллаев, провели комплексные исследова-

ния, изучающие взаимодействие между температурой и влажностью в зернохранилищах. Их исследование подчеркивает необходимость комплексного подхода, который анализирует как температуру, так и уровень влажности в нескольких точках хранилища [39]. Эти знания имеют решающее значение для оптимизации методов хранения. Основываясь на этих исследованиях, операторы и диспетчеры используют системы вентиляции и циркуляции воздуха для поддержания стабильной температуры внутри хранящегося зерна. Это гарантирует, что зерно остается при безопасной температуре и предотвращает порчу или деградацию.

В статье [40] представлен анализ результатов мониторинга температурного режима хранения зерна с использованием измерительной системы термогигрометров (логгеров). Измерительные системы представлены в виде подвесок, расположенных вертикально и горизонтально, но в ограниченном количестве. Представлено распределение температуры в сilosах на трех уровнях по вертикали (верхнем, среднем и нижнем), распределение температур по горизонтали (на разных расстояниях от стенки силоса до 75 см). Термогигрометры были размещены неравномерно внутри силоса, поэтому моделирование проводилось на основе выборочных значений. В статье тех же авторов [41, 42], рассматривается влияние тепло- и влагопроводности на изменение влажностного режима в силосе. Необходимо, чтобы параметры хранения зерна в зернохранилищах соответствовали стандартным системам классификации, разработанным Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ПСО). Результаты, полученные для годового цикла, свидетельствуют о циклическом изменении относительной влажности межзернового пространства и увеличении относительной влажности в летне-осенний период (с мая по ноябрь) выше оптимального значения, рекомендуемого для длительного хранения. Решением проблемы высокого риска увлажнения зерна является периодическое перемещение зерна из одного силоса в другой, однако при перемещении условия хранения зерна меняются, и физико-химические свойства могут измениться.

В работе авторов Латышенок Н., Шемякин А.В., Слободскова А., Гаспарян С., Цымбал А.А., Мусаев Ф. [43] предлагается использовать для хранения зерна дополнительные герметичные контейнеры, в каждом из которых предварительно устанавливаются регистраторы влажности и температуры модели DT-171, закрепленные на специальных опорах. Во время сезонного хранения зерна из-за разной температуры воздуха в слоях зерновой массы, находящейся в закрытом контейнере без тепловой защиты, происходит процесс отпотевания зерна, что негативно сказывается на сохранности зернового продукта. Как показано в литературе, определение температурных показателей при хранении зерновых культур проводится по различным методикам (работы И. Кечкина, В. Ермолаева и др. [44]). Тем не менее, независимо от используемого метода исследования, точность полученных результатов остается предметом постоянных споров.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что с точки зрения технологии и анализа тепловых полей использование технологических процессов для получения биодизельного топлива отработано достаточно хорошо. Однако в ходе анализа выяснилось, что на разных этапах технологического процесса основной проблемой является механическое перемещение зерна. Это приводит к колебаниям температуры. Эти изменения, как было показано выше, оказывают значительное влияние на концентрацию смол в зерне. Не существует систем, способных отслеживать и контролировать температурное поле в помещениях во время движения. В некоторых работах указывается, что из-за отсутствия решения этой проблемы используется технология «выравнивания температуры». Но это не может быть осуществлено для производств, расположенных в местах, где годовой перепад температур составляет более 20 градусов. Таким образом, авторы ставят перед собой задачу повышения содержания масла в зерне путем создания единой системы мониторинга, обеспечивающей фиксацию температуры с учетом пространственного распределения объекта исследования.

3. Материалы и методы

Функциональными требованиями к программному продукту, который может отображать температурные данные, являются точность значения температуры (программа должна отображать точное значение температуры для каждого датчика в режиме реального времени), а также создание

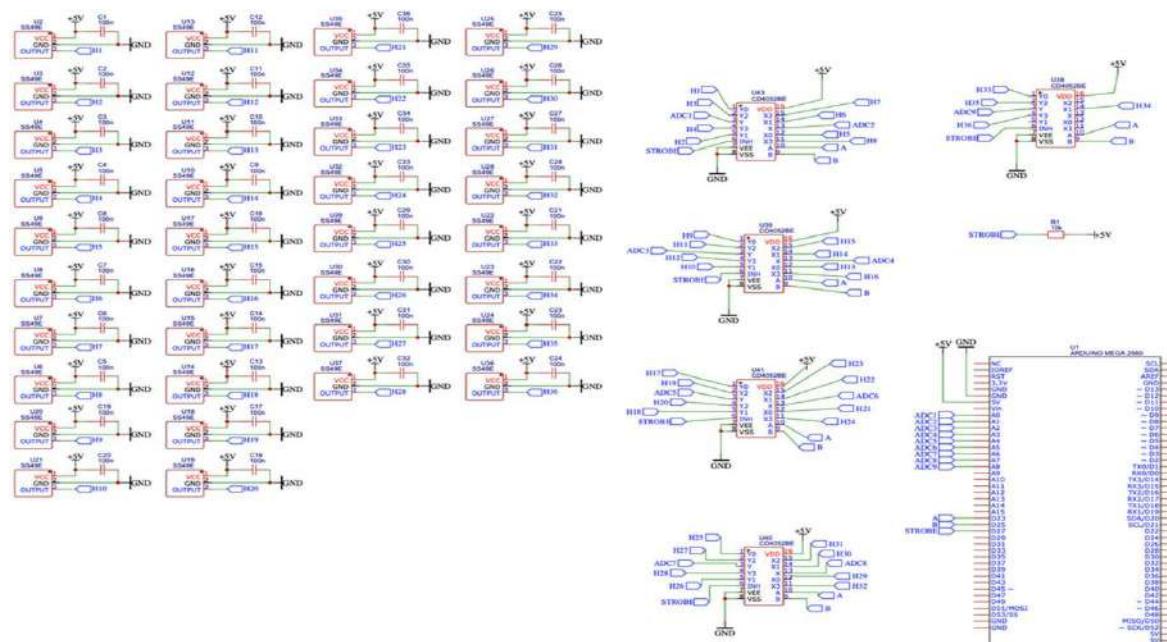
3D-модели (программа должна предоставлять 3D-модель объекта, на котором установлены датчики, с цветовым кодированием температуры для визуализации температурного поля). Материал представлен в Дополнительных материалах)

При обосновании выбора способов достижения поставленной цели необходимо учитывать следующие параметры:

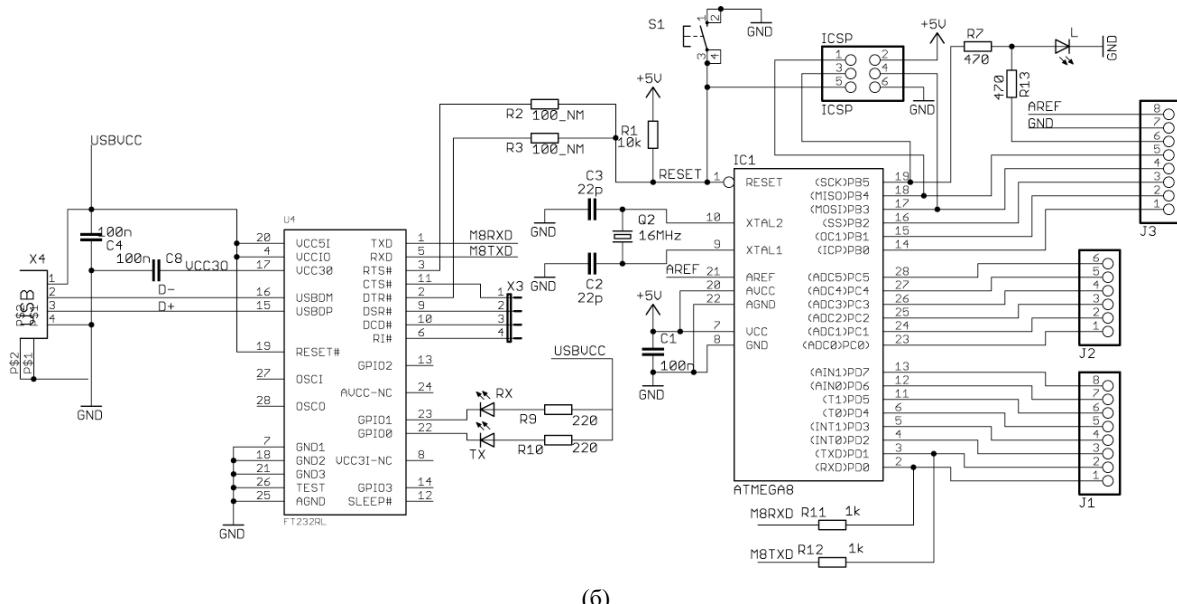
1. Текстолитовая плита обладает низкой теплопроводностью, что делает ее идеальным материалом для моделирования температурного поля силоса. В отличие от металла, который быстро передает тепло, текстолит сохраняет его, имитируя реальные условия в хранилище. Кроме того, текстолит легко обрабатывается, что позволяет создать модель нужной формы и размера. На текстолитовой плите также можно разместить датчики температуры и сформировать схемы чтобы более точно моделировать системы вентиляции силоса. Благодаря этим преимуществам текстолитовая плита является оптимальным решением для моделирования температурного поля силоса. Размеры текстолитовой плиты составляют 20 на 30 см.

2. Arduino Uno — популярная платформа для разработки микроконтроллерных устройств, основанная на микроконтроллере ATmega328. Она предоставляет простой и доступный способ создания собственных электронных проектов как для начинающих, так и для опытных разработчиков. Платформа имеет 14 цифровых входов/выходов (6 из которых могут быть использованы как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, разъем питания, разъем ICSP, и кнопка сброса. Для работы достаточно подключить платформу к компьютеру через USB-кабель или подать питание с помощью адаптера AC/DC или батареи.

Питание Arduino Uno может осуществляться через USB-разъем или от внешнего источника питания. На рисунке 4а,б представлена **принципиальная** схема подключения, где показано, как Arduino Uno автоматически выбирает источник питания с более высоким напряжением. На плате также есть предохранитель, **который защищает** от перегрузки по току. Регулятор напряжения понижает напряжение внешнего источника питания до 5 В, что необходимо для работы микроконтроллера.



(a)



(б)

Рис. 4. (а) Электронная схема измерительного устройства;
 (б) электронная схема разработанного устройства

Для питания Arduino Uno от внешнего источника необходимо напряжение 7–12 В и ток не менее 50 мА. При выборе внешнего источника питания важно убедиться, что он обеспечивает достаточный ток для стабильной работы устройства, особенно при использовании энергоемких компонентов.

Важно помнить, что неправильное подключение внешнего источника питания может повредить Arduino Uno. При подключении следует соблюдать полярность и избегать короткого замыкания.

3. Embarcadero RAD Studio A7 — это полноценная система разработки кроссплатформенных приложений для iOS, Android, Mac и Windows, а также мобильных гаджетов, таких как смартфоны и планшеты.

RAD Studio XE7 позволяет создавать различные типы приложений, включая мобильные, настольные, веб-приложения и приложения баз данных, на основе единого исходного кода. Это обеспечивает высокую скорость разработки, высокую производительность и широкий спектр языков программирования, включая Delphi и C++.

Основные преимущества RAD Studio XE7 включают в себя визуальный редактор, широкую библиотеку компонентов, поддержку drag-and-drop, интеграцию с различными технологиями, такими как базы данных, веб-сервисы и облачные платформы.

Благодаря своим возможностям Embarcadero RAD Studio XE7 является мощным инструментом для разработки современных приложений, которые могут работать на различных платформах.

Embarcadero RAD Studio дает возможность разработать производительное компилированное нативное программное обеспечение, способное функционировать на любых устройствах, имеющих высокий уровень взаимодействия с пользователями. Embarcadero RAD Studio XE7 позволяет программистам расширить свои проекты, ориентированные на Windows, до мобильных приложений, функционирующих с сервисами BaaS и данными предприятия.

Благодаря использованию языка программирования Delphi / C++ Builder программные продукты имеют возможность получить высокий уровень отладки, поскольку интегрированный отладчик Delphi / C++ Builder включает в себя большое количество полезных для разработчика и его программного продукта свойств.

Также язык программирования Delphi / C++ Builder оснащен самым скоростным в мире компилятором, который дает возможность за небольшой отрезок времени перевести программный продукт в машинный код, который сможет функционировать на любом техническом средстве.

Delphi / C++ Builder имеет большое преимущество, благодаря возможности визуального создания интерфейса программных продуктов. Это значительным образом упрощает процесс разработки приложений. Также разработчики имеют возможность самостоятельно формировать объекты для программ, что является большим плюсом в разработке уникальных приложений.

4. Для моделирования камеры хранения была использована текстолитовая плата, на которую был нанесен рисунок (рисунок 5). Рисунок 5 представляет собой схему модели камеры хранения, выполненную на текстолитовой плате. На ней изображен план камеры с размещением тепловых датчиков. Далее был осуществлен процесс пайки клеммников, к которым подключались тепловые датчики. Расположение датчиков, снимающих показания температуры, изображено на схеме установки на рисунке 5.

Сформированный макет был подключен к микроконтроллеру Arduino UNO. Передача данных с Arduino на компьютер осуществлялась при помощи COM-порта (последовательного порта), который работает по стандарту RS-232C. COM-порт получил свое название «последовательный», так как данные передаются по нему последовательно, бит за битом, в отличие от параллельного порта, который передает все биты байта одновременно. RS-232C — это стандарт последовательной связи, который устанавливает скорость передачи данных, а также минимальное время, необходимое для передачи одного байта. Это отличие от других «последовательных» технологий, которые могут не иметь таких строгих временных требований.

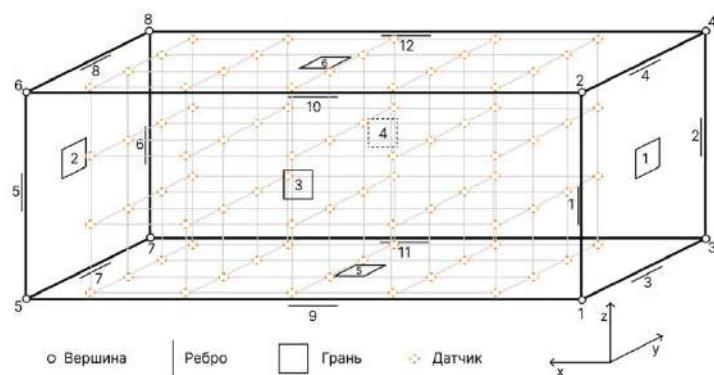


Рис. 5. Схема установки датчика

5. Модуль Plot 3D — это часть набора компонентов SDL, предоставляет мощное решение для 3D-графики для визуализации данных с тепловых датчиков. Компонент Delphi/C++Builder позволяет создавать полностью настраиваемые 3D-графики, обеспечивая сложную визуализацию данных в приложении. Каждая строка в таблице данных представлена маркером, положение которого зависит от его значений в столбцах, установленных на осях X, Y и Z.

Модуль Plot 3D является ценным инструментом для эффективной визуализации данных о температуре, позволяя проводить динамическое исследование и анализ распределения и характеристик данных в модели камеры хранения.

4. Результаты и обсуждение

Чтобы определить, была ли превышена температура в камере хранения, необходимо смоделировать камеру, определить местоположение датчиков, выбрать тип датчиков, снять показания и создать интерфейс для вывода данных, полученных от датчиков.

4.1. Моделирование температурного поля

Программный продукт был разработан в среде Embarcadero Rad Studio A7 на языке программирования Delphi/C++ Builder. Интерфейс был разработан в программной среде с использованием компонента Plots 3D. На рисунке 6 изображен интерфейс программы в режиме работы.

При корректном подключении программа запускает 3D модель и начинает работу с Arduino, который, опрашивает тепловые датчики «ds18b20», обрабатывает полученную информацию и отправляет ее через COM-порт в программу для дальнейшей работы с ней.

Также в функционале предусмотрен модуль, на котором расположен «линейный регулятор», который предназначен для задания необходимого масштаба отображения 3D-модели в программе. На рисунке 7 изображена функционирующая программа.

Разработанная 3D модель температурного поля дает возможность наглядно увидеть повышение или понижение температуры в камере хранения зерна.

Модуль «Датчики» показывает все датчики и температуру каждого из них. Также в форме есть панель с настройками, где пользователь может установить вручную верхний предел нормы температуры. Программой предусмотрено установление верхнего предела температурного поля и три выпадающих окна, где пользователь может установить цвет для нормального и верхнего пределов температуры датчиков.

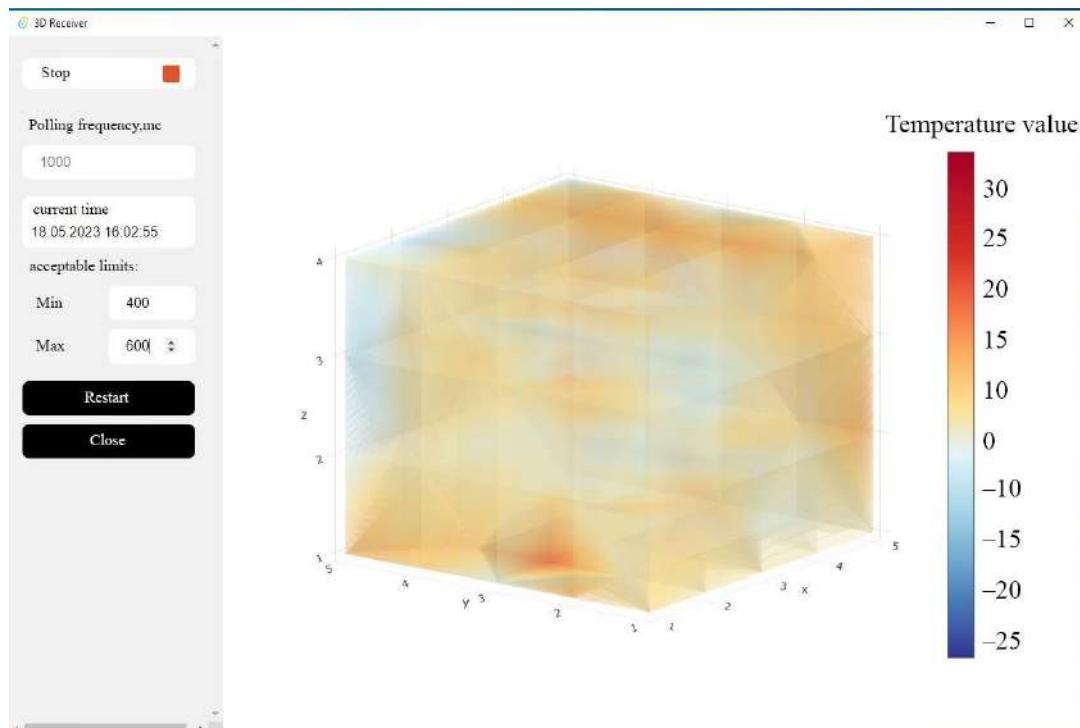
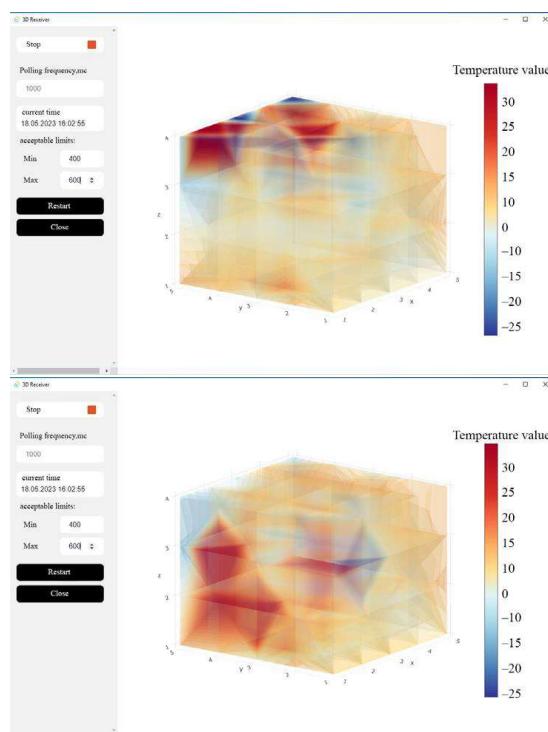


Рис. 6. Программа в процессе разработки



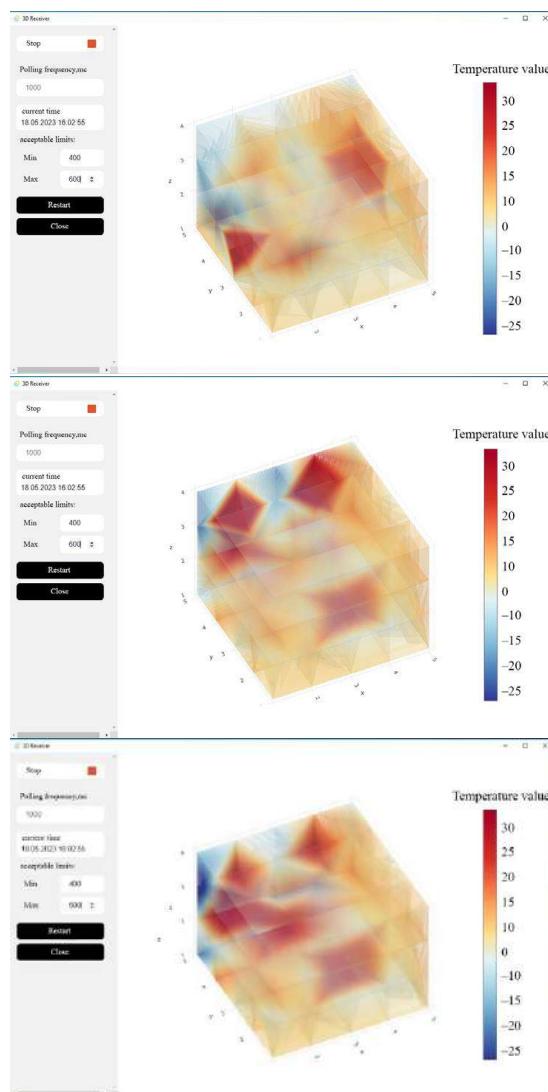


Рис. 7. Выполнение программы в различных режимах

На рисунке 8 изображено выделение превышающих норму показателей температуры на датчиках № 1–4 из первых 15 датчиков.

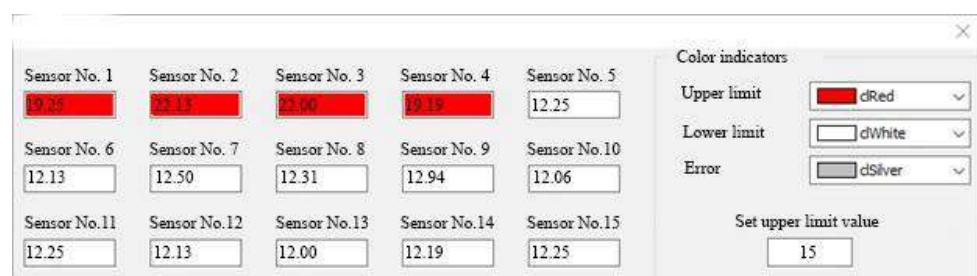


Рис. 8. Превышение температуры на датчиках 1–15

При нормальной температуре датчики отображают данные корректно, показывая реальные числа, не выделяя их каким-либо цветом. На рисунке 9 изображены данные в программе при нормальной температуре.

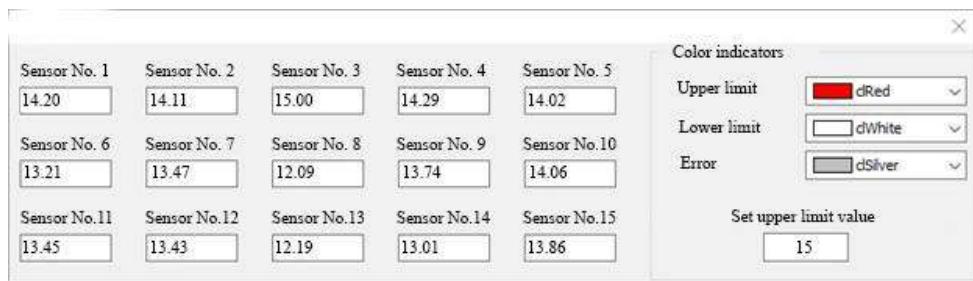


Рис. 9. Работа датчиков при нормальной температуре

Кроме этого, есть возможность включения и выключения отображения сетки на самой модели, а также смены ее цвета при необходимости.

4.1. Разработка программного продукта

В системе мониторинга основными источниками информации являются датчики, которые предоставляют мгновенные показания о текущем состоянии тепловых полей. Для опроса датчиков и интервальной передачи данных в Serial порт была написана следующая программа [45]:

```
void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        char in_data = Serial.read();
        if(in_data == '<'){
            for (int i = 0; i <= 15; i++){
                digitalWrite(S0,bitRead(i, 0));
                digitalWrite(S1,bitRead(i, 1));
                digitalWrite(S2,bitRead(i, 2));
                digitalWrite(S3,bitRead(i, 3));
            }
            delay(50);
            Data = Data
            + analogRead(SIG_A0) + " "
            + analogRead(SIG_A1) + " "
            + analogRead(SIG_A2) + " "
            + analogRead(SIG_A3) + " "
            + analogRead(SIG_A4) + " "
            + analogRead(SIG_A5) + " ";
            Serial.println(Data);
            Data = "";
        }
    }
}
```

При выводе информации необходимо предусмотреть предупредительную и аварийную сигнализацию по двум границам нарушений, а также сигнализацию обрыва датчика и сигнализацию выхода за границы достоверности.

Для цифровой обработки информации, датчики предварительно оцифровывают значения температуры и передают данные в цифровом формате по стандартному интерфейсу. Цифровые интегральные датчики можно классифицировать по выходному интерфейсу.

Для решения проблемы превышения значений был написан алгоритм обнаружения показаний, величина которых выходит за пределы допустимости:

```
export const outOfBorders = (
    str: string,
    min: number,
    max: number
): {min: number[]; max: number[]} => {
    const arr = strTo3DArray(str);
    const res: {min: number[]; max: number[]} = { min: [], max: [] };
    for (let x = 0; x < arr.length; x++) {
        for (let y = 0; y < arr[x].length; y++) {
            for (let z = 0; z < arr[x][y].length; z++) {
```

```

        if (arr[x][y][z] < min) {
            res.min.push(arr[x][y][z]);
        } else if (arr[x][y][z] > max) {
            res.max.push(arr[x][y][z]);
        }
    }
}
return res;
};

```

Распознавание ошибок в программе

Распознавание ошибок в приложении важно по многим причинам. Своевременное обнаружение ошибок в первую очередь ведет к обеспечению функциональности приложения. Ошибки могут помешать приложению функционировать так, как задумано. Обнаруживая и устранивая ошибки, можно гарантировать, что приложение работает правильно и обеспечивает ожидаемые результаты.

В разработанной системе можно обнаружить ошибки датчиков. Аномально большие скачки показаний можно расценивать как сбои в работе датчиков. Для достижения поставленной цели был написан алгоритм распознавания таких ошибок:

Для начала необходимо обозначить, что все показания с датчиков приходят строкой. Данная строка состоит из показаний 100 датчиков в момент времени. Для удобной работы с показаниями понадобиться привести данную строку в трехмерный массив, отражающий координаты расположения датчиков в пространстве.

Ввиду данной сложности алгоритма, рассмотрим только часть, включающую в себя обработку датчика, имеющего соседей со всех возможных сторон:

```

export const detectErrorCoords = (arr: number[][][], diff: number) => {
    const errorCoordsArr = [];
    for (let x = 0; x < arr.length; x++) {
        for (let y = 0; y < arr[x].length; y++) {
            for (let z = 0; z < arr[x][y].length; z++) {
                if (
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x + 1] ? arr[x + 1][y][z] : arr[x][y][z])
                    ) > diff &&
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x - 1] ? arr[x - 1][y][z] : arr[x][y][z])
                    ) > diff &&
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x][y + 1] ? arr[x][y + 1][z] : arr[x][y][z])
                    ) > diff &&
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x][y - 1] ? arr[x][y - 1][z] : arr[x][y][z])
                    ) > diff &&
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x][y][z + 1] ? arr[x][y][z + 1] : arr[x][y][z])
                    ) > diff &&
                    Math.abs(
                        arr[x][y][z] - (arr[x][y][z - 1] ? arr[x][y][z - 1] : arr[x][y][z])
                    ) > diff
                ) {
                    errorCoordsArr.push([x, y, z]);
                }
            }
        }
    }
}

```

Для увеличения достоверности можно рассматривать и более чем один соседний датчик с каждой стороны, но данный подход может оказаться избыточным, так как вероятность выхода из строя сразу нескольких соседних датчиков ниже, а также вычислительные расходы на такую задачу выше.

Сетевые программные средства, объединяющие подсистемы мониторинга и архивирования данных, обеспечивают загрузку и управление запуском задач, а также обмен между задачами и хранилищами данных. Система мониторинга имеет возможность оперативного конфигурирования прикладного программного обеспечения в процессе работы. Все ошибки диагностируются и сопровождаются сообщениями, не вызывая нарушений в работе.

5. Выводы

В результате проведенных исследований были разработаны математические и компьютерные модели этапа предварительного хранения зерна в крупных агрегатах, основной задачей которых является сохранение зерна в надлежащем качестве.

1. Разработана математическая модель химико-технологического процесса хранения зерна в зерновом сilosе, причем модель описывает влияние температуры в сilosе на качество зерна.

2. Разработана аппаратура для отслеживания температурного поля хранящегося зерна. В рассматриваемом устройстве используется пятнадцать температурных датчиков, которые тщательно размещены на печатной плате (ПП). Данные с этих датчиков собираются микроконтроллером Arduino Uno и передаются в программное приложение. Эта система мониторинга очень ценна для оптимизации условий хранения в зернохранилищах. Раннее обнаружение колебаний температуры поможет предотвратить порчу, сохранить качество и увеличить урожайность. Кроме того, анализ данных, полученных с помощью этого устройства, позволит лучше понять процесс хранения и повысить его эффективность. В устройстве используются интеллектуальные датчики, позволяющие собирать измерительную информацию и передавать ее на сервер. Благодаря использованию облачной среды система позволяет синхронизировать данные измерений, полученные из любой точки мира, что будет полезно для крупных сельскохозяйственных хозяйств.

3. Для разработки распределенной системы использовалось специализированное программное обеспечение, работающее в среде многозадачной операционной системы реального времени. Характеристики программного обеспечения соответствуют требованиям, предъявляемым к функциям. Усовершенствование программного обеспечения возможно за счет внедрения новых модулей, установки дополнительных датчиков и наращивания функциональности. Программный продукт позволит наиболее эффективно использовать камеры хранения зерна с целью экономии ресурсов и повышения производительности.

Таким образом, авторами решен широкий круг задач, связанных с повышением экономической эффективности процесса хранения сырья, предназначенного для производства биотоплива.

6. Патенты

Программа для моделирования системы управления температурным полем печи непрерывного действия для нагрева сортового металлопроката. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662608. Дата регистрации: 6 сентября 2023 г., бюллетень № 6.

Дополнительные материалы: вспомогательную информацию можно загрузить по адресу: www.mdpi.com/10.3390/inventions10010007/s1.

Вклад авторов: концептуализация, Ю.В.И. и А.М.Е.; методология, Ю.В.И.; программное обеспечение, Ю.В.И.; формальный анализ, А.М.Е.; обработка данных, А.М.Е.; написание — подготовка первоначального проекта, А.М.Е.; написание — рецензирование и редактирование, А.М.Е. и Ю.В.И.; визуализация, Ю.В.И. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: оригинальные материалы, представленные в данном исследовании, включены в Дополнительные материалы. Дополнительные вопросы могут быть направлены соответствующему автору.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hwang, H.; Choi, S.R.; Lee, J.Y. Evaluation of roadside air quality using deep learning models after the application of the diesel vehicle policy (Euro 6). *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 20769. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Kim, G.Y.; Jung, I.; Park, M.; Park, K.; Lee, S.H.; Kim, W.H. Diesel exhaust particles induce human umbilical vein endothelial cells apoptosis by accumulation of autophagosomes and caspase-8 activation. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 16492. [[CrossRef](#)]
3. Двойников М.В., Леушева Е.Л. Современные тенденции освоения углеводородных ресурсов. *ЗГИ*. **2022**, 258, 879–880. Available online: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16101> (accessed on 24 December 2024).
4. Tsvetkov, P.; Samuseva, P. Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions. *J. Clean. Prod.* **2024**, *434*, 139638. [[CrossRef](#)]
5. Скобелев Д.О., Череповицьна А.А., Гусєва Т.В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат. *ЗГИ*. **2023**, 259, 125–140. [[CrossRef](#)]
6. Ahmad, K.; Younas, Z.I.; Manzoor, W.; Saifdar, N. Greenhouse gas emissions and corporate social responsibility in USA: A comprehensive study using dynamic panel model. *Heliyon* **2023**, *9*, e13979. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Khorasani, M.; Sarker, S.; Kabir, G.; Ali, S.M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies. *Energy* **2022**, *258*, 124805. [[CrossRef](#)]
8. Bréda, G.C.; Aguiar, E.C.G.; Cipolatti, E.P.; Greco-Duarte, J.; de A Collaço, A.C.; Cavalcanti, E.D.C.; M de Castro, A.; Freire, D.M.G. Current approaches to use oil crops by-products for biodiesel and biolubricant production: Focus on biocatalysis. *Bioresour. Technol. Rep.* **2022**, *18*, 101030. [[CrossRef](#)]
9. Long, H.; Wang, S.; Wei, W.; Zhang, G. The economic influence of oil shortage and the optimal strategic petroleum reserve in China. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 9858–9870. [[CrossRef](#)]
10. Yessian, S.; Varthanhan, P.A. Optimization of Performance and Emission Characteristics of Catalytic Coated IC Engine with Biodiesel Using Grey-Taguchi Method. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 2129. [[CrossRef](#)]
11. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Васильевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *J. Min. Inst.* **2022**, 259, 95–111. [[CrossRef](#)]
12. Stančin, H.; Mikulčić, H.; Wang, X.; Duić, N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, *128*, 109927. [[CrossRef](#)]
13. Alekseenko, A.; Belenov, S.; Mauer, D.; Moguchikh, E.; Falina, I.; Bayan, J.; Pankov, I.; Alekseenko, D.; Guterman, V. Activity of Platinum-Based Cathode Electrocatalysts in Oxygen Redaction for Proton-Exchange Membrane Fuel Cells: Influence of the Ionomer Content. *Inorganics* **2024**, *12*, 23. [[CrossRef](#)]
14. Belenov, S.; Mauer, D.; Moguchikh, E.; Gavrilova, A.; Nevelskaya, A.; Beskopylny, E.; Pankov, I.; Nikulin, A.; Alekseenko, A. New Approach to Synthesizing Cathode PtCo/C Catalysts for Low-Temperature Fuel Cells. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 856. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Buslaev, G.; Lavrik, A.; Lavrik, A.; Tsvetkov, P. Hybrid system of hydrogen generation by water electrolysis and methane partial oxidation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2023**, *48*, 24166–24179. [[CrossRef](#)]
16. Li, C.; Cao, D.-S.; Zhao, Z.-T.; Wang, X.; Xie, X.-Y. Forecast for wind power at ultra-short-term based on a composite model. *Energy Rep.* **2024**, *12*, 4076–4082. [[CrossRef](#)]
17. Quansah, A.D.; Boakye, P.; Mensah, L.D.; Quansah, D.A. Systematic literature review on the potential of using solar photovoltaic to power sea water desalination on offshore petroleum facilities. *Energy Rep.* **2024**, *12*, 3843–3860. [[CrossRef](#)]
18. Lee, K.; Cho, H. Comparative Analysis of Performance and Emission Characteristics of Biodiesels from Animal Fats and Vegetable Oils as Fuel for Common Rail Engines. *Energies* **2024**, *17*, 1711. [[CrossRef](#)]
19. Litvinenko, V.S. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas Resources. *Resources* **2020**, *9*, 59–81. [[CrossRef](#)]
20. Soudagar, M.E.M.; Banapurmath, N.R.; Afzal, A.; Hossain, N.; Abbas, M.M.; Haniffa, M.A.C.M.; Naik, B.; Ahmed, W.; Nizamuddin, S.; Mubarak, N. Study of diesel engine characteristics by adding nanosized zinc oxide and diethyl ether additives in Mahua biodiesel–diesel fuel blend. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 15326. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. Hawrot-Paw, M.; Koniuszy, A.; Zająć, G.; Szyszak-Bargłowiec, J. Ecotoxicity of soil contaminated with diesel fuel and biodiesel. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 16436. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Degtie, T.A. Optimized Biodiesel Production from Waste Cooking Oil (WCO) using Calcium Oxide (CaO) Nano-catalyst. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 18982. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Islam, S.; Basumatary, B.; Rokhum, S.L.; Mochahari, P.K.; Basumatary, S. Advancement in utilization of nanomaterials as efficient and recyclable solid catalyst for biodiesel synthesis. *Clean. Chem. Eng.* **2022**, *3*, 100043. [[CrossRef](#)]
24. Hanif, M.; Bhatti, I.A.; Zahid, M.; Shahid, M. Production of biodiesel from non-edible feedstocks using environment friendly nano-magnetic Fe/SnO catalyst. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 16705. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Rudzish, E.R.; Petrova, T.A. Application prospects for nonconventional improvers for vegetation cover in reclamation areas. *Gorniy Zhurnal* **2023**, *9*, 75–82. [[CrossRef](#)]
26. Akkem, Y.; Biswas, S.K.; Varanasi, A. Smart farming using artificial intelligence: A review. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2023**, *120*, 105899. [[CrossRef](#)]
27. Szeto, W.; Leung, D.Y.C. Is hydrotreated vegetable oil a superior substitute for fossil diesel? A comprehensive review on physicochemical properties, engine performance and emissions. *Fuel* **2022**, *327*, 125065. [[CrossRef](#)]
28. Daniyan, I.; Daniyan, L.; Adeodu, A.; Ale, F. Automation and Control of a Multi-feedstock Biodiesel Production Plant. *IETE J. Res.* **2024**, *70*, 5081–5099. [[CrossRef](#)]
29. Mensah, R.Q.; Tantayotai, P.; Rattanaporn, K.; Chuetor, S.; Kirdponpattara, S.; Kchaou, M.; Show, P.-L.; Mussatto, S.I.; Sriariyanun, M. Properties and applications of green-derived products from spent coffee grounds — steps towards sustainability. *Bioresour. Technol. Rep.* **2024**, *26*, 101859. [[CrossRef](#)]

30. Кондрашева Н.К., Еремеева А.М., Нелькенбаум К.С. Разработка отечественной технологии получения высококачественного экологически чистого дизельного топлива. *ChemChemTech* [Изв. высш. учеб. завед. Хим. Хим. Технол.] **2018**, 61, 76–82. [[CrossRef](#)]
31. Pashkevich, M.A.; Patokin, D.A. Nitrocellulose containing chemical industry waste for mineral resources complex facilities: Directions of use. *MIAB* **2023**, 9, 215–230. [[CrossRef](#)]
32. Akowuah, J.O.; Addo, A.; Kemausuor, F. Influence of storage duration of *Jatropha curcas* seed on oil yield and free fatty acid content. *J. Agric. Biol. Sci.* **2012**, 7, 41–45.
33. Yisa, M.G.; Fadeyibi, A.; Adisa, O.I.O.; Alabi, K.P. Finite element simulation of temperature variation in grain metal silo. *Res. Agric. Eng.* **2018**, 64, 107–114. [[CrossRef](#)]
34. Petrova, T.A.; Epishina, A.D. Anti-corrosion protection of pipelines at mining and processing enterprises. *Obogashchenie Rud* **2023**, 6, 9. [[CrossRef](#)]
35. Audu, J.; Alonge, A.F. Smart Grain Storage Silo. In *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*; Zhang, Q., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2023. [[CrossRef](#)]
36. Kryvchenchuk, Y.; Zakharchuk, M.; Chervinska, O.; Pylypiv, O.; Shayner, H. The system of temperature and conditioning control in industrial grain storages. In Proceedings of the International Workshop of IT-professionals on Artificial Intelligence (ProffIT AI 2021), Kharkiv, Ukraine, 20–21 September 2021; 2021; pp. 106–113. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/358039927> (accessed on 24 December 2024).
37. Halwe, A.D.; Deshmukh, S.J.; Kanu, N.J.; Gupta, E.; Tale, R.B. Optimization of the novel hydrodynamic cavitation based waste cooking oil biodiesel production process parameters using integrated L9 Taguchi and RSM approach. *Mater. Today Proc.* **2021**, 47, 5934–5941. [[CrossRef](#)]
38. Yadav, I.J.; Singh, P.; Chauhan, B.S. Numerical analysis of gas–solid hydrodynamics and heat transfer characteristics in a multi-stage fluidized bed temperature stabilizer. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2023**, 149, 1617–1627. [[CrossRef](#)]
39. Kalandarov, P.I.; Abdullayev, K.K. Features of the technology of anaerobic processing of biotails using humidity control devices. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2022**, 1043, 012011. [[CrossRef](#)]
40. Loose, V.; Gurieva, K.B.; Beletsky, S.L.; Kostromina, T. Temperature change of the wall layers of wheat grain during its storage in silos of elevators. *Khleboprodukt* **2022**, 31, 50–59. [[CrossRef](#)]
41. Гурьева К., Лоозе В.В., Белецкий С. Исследование распределения температурных полей зерна пшеницы при хранении в сilosе элеватора по вертикальным уровням и горизонтальным слоям. *Товаровед продовольственных товаров*. **2023**, 8. [[CrossRef](#)]
42. Pervuhin, D.A.; Trushnikov, V.E.; Abramkin, S.E.; Hloponina, V.S.; Talanov, N.A. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation. *Int. J. Eng.* **2025**, 38, 472–487. [[CrossRef](#)]
43. Латышенок Н., Шемякин А.В., Слободская А., Гаспарян С., Цымбал А.А., Мусаев Ф.А. Исследование температурного и влажностного режима хранения семенного зерна в герметичной металлической емкости. *Вестник РГАТУ*. **2021**, 13, 152–158. [[CrossRef](#)]
44. Kechkin, I.; Ermolaev, V.; Belyaeva, M.; Tarakanova, V.; Gurkovskaya, E.; Buzetti, K. Processes of Heat and Mass Transfer During Grain Mass Storage in Metal Silos of Large Capacity. *KnE Life Sci.* **2021**, 6, 206–214. [[CrossRef](#)]
45. Программа для моделирования системы управления температурным полем методической печи нагрева длинномерных металлических изделий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662608. Дата регистрации: 06/09/2023, Бюлл. №6. Доступно онлайн: <https://digital.spmi.ru/patent/frontend/web/filesize/2023662608.pdf> (accessed on 24 December 2024).

Применение методов системного анализа для создания виртуальной модели месторождения

Ю. В. ИЛЮШИН¹ ☐, В. А. НОСОВА², А. В. КРАУЗЕ²

¹ Экономический факультет, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия

² Кафедра системного анализа и управления, экономический факультет, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия; s235019@stud.spmi.ru (В. А. Н.); krot98@gmail.com (А. В. К.)
✉ ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Ilyushin, Y.; Nosova, V.; Krauze, A. Application of Systems Analysis Methods to Construct a Virtual Model of the Field. Energies 2025, 18, 1012. <https://doi.org/10.3390/en18041012>.

Аннотация: В последнее время темпы добычи нефти на шельфе увеличились, что создает необходимость разработки технических решений для реализации более эффективных процессов на береговых платформах. Одним из актуальных решений является разработка и применение цифровых двойников. Морские добывающие платформы являются особо охраняемыми объектами в связи с высоким риском загрязнения окружающей среды. Поэтому такие объекты особенно выделяются для внедрения передовых технологических решений. В данной работе авторы проводят исследование входных, выходных и результирующих параметров, влияющих на производственный процесс. Используя теорию системного анализа, они определяют перечень критических факторов и строят концептуальную, а затем и математическую модель месторождения. От существующих аналогов она отличается введением дополнительных параметров, обеспечивающих более высокую точность моделирования. На основе полученной математической модели проводится обучение нейронной сети для определения оптимального режима работы. Проведена оценка экономической целесообразности представленной разработки.

Ключевые слова: цифровой двойник; нефтегазовое месторождение; системный анализ; добыча; математическая модель.

Application of Systems Analysis Methods to Construct a Virtual Model of the Field

Yury ILYUSHIN¹ ☐, Victoria NOSOVA² and Andrei KRAUZE²

¹ Faculty of Economics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia

² Department of Systems Analysis and Control, Economics Faculty, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia; s235019@stud.spmi.ru (V. N.); krot98@gmail.com (A. K.)
✉ ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Abstract. Recently, the rate of offshore oil production has increased, which creates a need to develop technical solutions for the implementation of more efficient processes on offshore platforms. A relevant solution is the development and application of digital twins. Offshore production platforms are specially protected objects due to the high risk of environmental pollution. Therefore, such objects are especially distinguished for the implementation of advanced technological solutions. In this study, the authors conduct a study of the input, output, and resulting parameters that affect the production process. Using the theory of systems analysis, they determine the list of critical factors and build a conceptual and then a mathematical model of the field. It differs from existing analogues by the introduction of additional parameters that provide higher modeling accuracy. Based on the resulting mathematical model, a neural network is trained to identify the optimal operating mode. An assessment of the economic feasibility of the provided development is carried out.

Keywords: digital twin; oil and gas field; systems analysis; production; mathematical model.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

Цифровой двойник (ЦД) — это виртуальная модель, повторяющая геометрические параметры и другие характеристики физического объекта и имеющая двунаправленную связь с физическим оригиналом. ЦД широко используется для мониторинга и планирования процессов, оптимизации, планирования технического обслуживания, удаленного мониторинга и управления и т.д. [1]. По данным исследования, проведенного компанией Gartner, использование ЦД ежегодно увеличивается. Это связано с развитием науки и техники, повышением экологических требований, стремлением к повышению экономической эффективности и необходимостью сокращения трудозатрат, которые приводят к дефектам и авариям на производстве [2]. Виртуальный двойник позволяет тестировать и предотвращать отказы оборудования. Примером может служить деятельность компании Siemens, которая использует ЦД для разработки двигателей, систем связи и высокоскоростных поездов [3]. Более пяти лет назад компания Siemens преобразовала индийский завод по производству оборудования для защиты цепей в цифровое предприятие. В результате модернизации производство опций на одной производственной линии увеличилось в два раза. До цифровизации на подготовку каждого изделия уходил 21 с, после — 9 с [4]. На заводе по производству контроллеров в Амберге также используется цифровая система управления; она контролирует перемещение оборудования, требования и выполнение каждой операции, учитывает приоритетность операций и доступность производственных линий. Цифровизация позволила в два раза сократить время запуска новых продуктов и на 50 % уменьшить период переналадки оборудования. В целом цифровая система управления позволила снизить себестоимость продукции на 25 % [5].

Производитель потребительских товаров Unilever в 2018 году успешно запустил проект цифровой системы управления активами ЦД на своем бразильском заводе. Это позволило в режиме реального времени вносить изменения в производственные процессы, оптимизировать производительность и улучшить использование материалов. Мониторинг и анализ в режиме реального времени позволили Unilever сократить количество отходов и повысить качество продукции. Кроме того, ЦД позволяют быстро реагировать на изменения количества и качества продукции [6].

В энергетической отрасли ЦД используются для оптимизации работы электростанций, повышения энергоэффективности и минимизации перебоев в подаче электроэнергии. Примером успешного внедрения ЦД является экономия более 1,5 миллиарда долларов США для потребителей GE [7, 8].

В 2016 году компания Finngrid создала ЦД для основной энергосистемы. Конфигурация ЦД позволила интегрировать данные SCADA, геоинформационной системы и системы управления активами. В результате внедрения ЦД компания сообщила о повышении производительности, снижении затрат, повышении надежности передачи данных и оптимизации бизнес-процессов [9, 10].

В области информационных технологий ЦД позволяет моделировать сервисы, отдельные устройства и крупные сети, рассчитывать максимальные нагрузки и т. д.

ЦД используются при добыче и переработке полезных ископаемых. Поскольку эта отрасль характеризуется высокими рисками для окружающей среды и здоровья людей, использование ЦД для обнаружения неисправностей позволяет избежать и/или минимизировать негативные последствия. Так, использование ЦД на одном из европейских нефтеперерабатывающих заводов привело к раннему получению информации о предстоящем выходе из строя крупного компрессора за три недели до инцидента, что позволило минимизировать ущерб. Нефтяная компания ADNOC использует цифровые знаковые модели, искусственный интеллект и большие данные для мониторинга производственного оборудования для добычи и переработки нефти в своем командном центре [11, 12].

На месторождении Johan Sverdrup компании Equinor цифровая модель помогает оптимизировать работу на высокопродуктивном морском месторождении в Норвегии. Масштаб проекта требует пристального внимания к безопасности, снижению затрат и оптимизации

производства. Это месторождение стало одним из первых, где Equinor использовала цифровые модели для предоставления актуальной информации об условиях эксплуатации и мониторинга активов и оборудования в режиме реального времени. В России цифровые модели также используются в самых разных областях, как и во всем мире, но в меньшей степени. В качестве примера можно привести деятельность ряда компаний [13, 14].

Компания Schneider Electric реализует проект на Яйском нефтеперерабатывающем заводе, где цифровые подписи создаются для обучения операторов, изучения объекта, поиска проблемных мест и моделирования поведения систем. В рамках проекта также реализуется защита цифровых моделей предприятия от несанкционированного доступа [15, 16].

В «Севернефтегазпроме» используется комплексная система управления промысловой добычей газа, которая представляет собой цифровую модель, состоящую из пластов, скважин и газосборной сети. Вычислительные мощности и алгоритмы цифровой модели позволяют получать точные прогнозы и результаты [17, 18]. Среди нефтегазовых и нефтесервисных компаний ITPS является известным разработчиком ИТ-решений. Интеграционная платформа AVIST Oil&Gas, разработанная этой компанией, предназначена для максимизации добычи, снижения себестоимости, оптимизации системы и т.д. Это решение не единственное для поддержки российской нефтегазовой отрасли, но одно из ведущих [19, 20].

Внедрение цифровых двойников в нефтегазовой отрасли происходит медленнее, чем в других отраслях [21, 22]. Одной из основных проблем, тормозящих этот процесс, является уязвимость данных [22, 23]. В основном это связано с неполнотой информации [24, 25], которая обусловлена многими факторами, главным из которых является невозможность получения полной информации об объекте управления. Эта проблема связана с ограниченными ресурсами и множеством стохастических и динамических факторов, учет которых затруднен или невозможен. В работах Мартиросяна А. В., Асадулаги М. М., Першина И. М. и других показано, что стохастические параметры оказывают существенное влияние на математическую модель процесса, но в силу спонтанности их возникновения крайне сложно поддаются описанию. Для устранения этого недостатка в отрасли используются методы системного анализа и теории принятия решений. В работах Афанасьевой О. В., Первухина Д. А., Марининой О. А., Головиной Е. И. и других показано, что для решения подобной задачи можно применять методы корреляционно-регрессионного анализа, в частности, метод экспертных оценок. Таким образом, представляется возможным объединить методы системного анализа и создать цифровых двойников [26–29].

Авторы данной работы продемонстрировали построение высокоточной математической модели промысла по добыче нефти и газа на основе использования нейронных сетей и методов системного анализа. Высокая точность математической модели была достигнута за счет того, что в систему уравнений, описывающих объект управления, были добавлены переменные, оказывающие достаточное влияние на технологический процесс.

2. Описание объекта исследования

В данной работе реализована разработка подсистемы центральной системы управления морской платформы. Объектом исследования является морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная», на которой ведется разработка одноименного месторождения [29, 30].

Арктические погодные условия и удаленность от побережья накладывают свои требования на функционирование платформы, начиная от стационарности платформы и заканчивая способами транспортировки персонала и углеводородов.

Сложные ледовые условия присутствуют большую часть года, они усложняют подход танкеров к платформе и вносят корректизы в процесс заполнения танкера нефтью при высокой скорости дрейфа льда [31, 32].

Расположение в морских водах также требует соблюдения строгих стандартов для предотвращения загрязнения атмосферы и гидросферы.

Нефть, добываемая на «Приразломной», залегает в неоднородных коллекторах нижне-пермского возраста. Залежи нефти массивные, пластово-архейские, связаны с инверсионными надрифтовыми структурами. Коллекторами являются кавернозно-пористые рифовые известняки. Территория месторождения относится к Тимано-Печорскому бассейну.

При первичном испытании биокластических известняков на глубине около 2400 м был получен приток нефти, дебит которого составил ~400 куб. м/сут [33, 34].

Утвержденные балансовые запасы нефти (расчетные) составляют 295 млн тонн. Извлекаемые запасы нефти по указанным категориям в 3,7 раза меньше балансовых, что позволяет обеспечить общий объем добычи нефти в среднем 5,5 млн тонн в год.

Сорт нефти, добываемой на месторождении, определяется низким содержанием парафина, высоким содержанием серы и высокой плотностью.

Новый сорт нефти, выбор методов бурения, а также добыча, подготовка и транспортировка нефти зависят от расположения месторождения. Применяемые технологии и оборудование также должны рассматриваться с учетом указанной информации. Технические характеристики платформы «Приразломная» включают в себя длину и ширину кессона на уровне дна — 126 м, высоту от уровня моря — 122 м, а также масса с балластом и без балласта — 506 тыс. тонн и 117 тыс. тонн [35, 36].

Платформа «Приразломная» состоит из 36 скважин. Нефть добывается из 19 скважин, с учетом заполнения кессонов общей емкостью 159 тыс. м³, общий объем нефти, отгружаемой в нефтеналивные суда, составляет 103 тыс. м³, а объем резервуаров для хранения нефти — 124 тыс. м³ [37, 38]. Также на платформе «Приразломная» имеется 16 скважин для создания избыточного давления и одна скважина для утилизации отходов бурения.

Опорное основание — кессон, который также служит местом для хранения нефти, — изготовлено из стальных конструкций, заполненных бетоном для придания дополнительной прочности. Для защиты от коррозии и эрозии внешняя часть кессона покрыта плакированной сталью толщиной 42 мм. Как внутренняя, так и внешняя поверхности кессона устойчивы к электрохимической коррозии [39, 40].

Нефтехранилища оснащены автоматической системой промывки, очистки и дегазации. Для обеспечения безопасности оборудование и трубопроводы в межкрышном пространстве кессона размещены отдельно и оборудованы системой газового пожаротушения.

Система мониторинга состояния кессона включает в себя следующие датчики и приборы: инклинометр для измерения наклона кессона, динамометр для измерения давления в грунте от динамических горизонтальных нагрузок, пьезометр, сейсмограф, датчик деформации для измерения ледовых нагрузок на кессон и др.

Для налива нефти МЛСП «Приразломная» оснащена двумя комплексами устройств прямого налива нефти (КУПНН). Каждый комплекс включает в себя систему блокировки, благодаря которой исключается возможность разлива нефти при наливе. Дополнительную защиту от разливов обеспечивает система аварийного отключения подачи нефти [40, 41].

Комплекс КУПНН обеспечивает швартовку танкеров, а также налив нефти без контакта с платформой. Танкеры оснащены системой носовой загрузки и системой динамического позиционирования, которая позволяет судну оставаться в постоянном положении, не обращая внимания на погодные условия до определенных показателей.

При погрузке используются комплексы устройств для прямого налива нефти, позволяющие загружать гидроуглероды из кессона непосредственно в танкер [42, 43]. Налив нефти начинается только при одновременном выполнении 30 необходимых условий [44, 45]. Имеется также система аварийного отключения и закрытия перекачки нефти с платформы на танкер за несколько секунд.

На Приразломном месторождении используются погружные электроцентробежные насосы [46, 47]. Для предотвращения продувок скважин установлен комплекс противовыбросового оборудования, герметизирующий устья нефтяных скважин. Станции геологического и технического контроля позволяют отслеживать состояние скважин в режиме реального времени.

В целях безопасности на глубине 250 м также устанавливаются фитинги с дистанционной запорной арматурой для предотвращения продувок. Управление осуществляется гидравлическим способом [48, 49].

Транспортировка нефти осуществляется танкерами без помощи ледоколов и двух носовых подруливающих устройств после выгрузки нефти при благоприятных условиях. Для удержания танкера в зоне погрузки используется система динамического позиционирования, которая позволяет удерживать нос танкера в пределах допустимых отклонений от заданного положения, не допуская чрезмерного натяжения швартовов и грузового шланга. Также имеется система, позволяющая принимать и подключать шланг с платформы к грузовым трубопроводам судна, по которым нефть перекачивается со скоростью около 10 000 кубометров в час. МЛСП состоит из следующих основных частей: призматического основания (кессона) с бермой, примыкающей к периметру. В кессоне располагаются резервуары для хранения нефти, устья скважин и оборудование для транспортировки нефти из резервуара в танкер. Следующий уровень — промежуточная палуба, на которой по периметру расположен дефлектор льда. На промежуточной палубе располагается технологическое оборудование, склад материалов, необходимых для работы технологического оборудования, и другие вспомогательные сооружения. В верхнем строении находятся жилые модули, а также технологические и вспомогательные модули, вертолетная площадка и КУПНН [50]. Подробный анализ работ представлен в таблице 1.

Таблица 1
Статьи, анализирующие область исследования

Параметр	Ссылки
Технические факторы	[47–64]
Экологические факторы	[65–106]
Экономические факторы	[70–104]
Информационное обеспечение и технический анализ	[104–109]
Сопутствующие факторы	[106–109]

На нефтяной платформе разработана и внедрена автоматизированная система контроля и безопасности (АСКБ), состоящая из системы обнаружения пожара, системы обнаружения утечек газа и оповещения об их местонахождении, системы аварийной остановки технологических процессов и системы мониторинга состояния кессона [110, 111].

АСКБ необходима для контроля и управления технологическими процессами и всеми системами жизнеобеспечения сетевой платформы. Все системы управления представляют собой комплекс, необходимый для эксплуатации нефтяной платформы в полевых условиях, однако при анализе данных нефтяной платформы использование существующего комплекса АСКБ становится недостаточным, что указывает на необходимость разработки дополнительной системы управления.

Наиболее развитым цифровым решением является программа «Интегрированное моделирование», которая представляет собой модель всей производственной цепочки нефтедобывающего комплекса, включая нефтяной пласт, скважины, систему сбора и подготовки нефти.

Стационарная нефтяная платформа — дорогостоящий комплекс, подходящий для разработки месторождения в Арктике. Она представляет собой платформу, опирающуюся на сушу, и относится к надводному способу добычи нефти [112–118]. Это сооружение является основой для размещения оборудования и проведения бурения, эксплуатации и обустройства месторождения. И верхняя, и нижняя части должны быть защищены от атмосферных воздействий: запас прочности фундамента должен превышать фактические нагрузки, а верхняя часть должна быть оборудована специальными ледо- и волнодобойниками, установленными по периметру платформы.

При добыче нефти важным мероприятием является предотвращение попадания нефти в открытое море. Для этого устья скважин располагаются внутри стационарной платформы.

Стационарные платформы позволяют использовать доступные и простые методы разработки и эксплуатации месторождения, расширяются по площади основания и достаточно устойчивы к волновым, ветровым и ледовым нагрузкам. Благодаря этим преимуществам, а также многим другим факторам Приразломное месторождение эксплуатируется на МЛСП. Рассмотрим процесс добычи нефти на шельфе.

Нефть — это минеральное сырье, состоящее из сложной смеси различных углеводородов. Ее добывают из нефтенасыщенных пород: осадочных, магматических и метаморфических. Нефть не насыщает все поровое пространство горных пород, а накапливается в особых геологических объектах, называемых ловушками. Природные резервуары арктических шельфов очень неоднородны и разнообразны, с ними связаны различные типы ловушек и залежей нефти и газа.

Нефтяная залежь — это природное скопление нефти в ловушке, образованной породой-коллектором под шапкой непроницаемых пород [119].

Основным процессом при добыче нефти является подъем жидкости из нефтяного пласта на поверхность. Методы добычи нефти, в зависимости от пластового давления, физических свойств нефти, коллекторских свойств продуктивного пласта и т.д., подразделяются на следующие категории:

1. Фонтанное масло поднимается под действием энергии пласта;
2. Газовый подъем — нефть поднимается под действием закачиваемого в скважину газа;
3. Механизированный — нефть поднимается с помощью насосов (электроцентробежных, гидравлических поршневых, штанговых скважинных, плунжерных и т. д.).

Находясь на разной глубине, пласты испытывают определенное давление. В скважинах глубиной 1000, 1500 и 2000 м пластовые давления составляют около 10, 13, 15,2 и 20,3 МПа [120–125]. Под действием этого давления нефть движется по пласту к скважине. Как правило, бескомпрессорная эксплуатация фонтанирующих скважин длится от начала разработки до наступления периода падения добычи. Когда пластовое давление падает до уровня магистрального нефте- или газопровода, начинается период компрессорной эксплуатации месторождения.

С точки зрения научных принципов разработки нефтяных месторождений на суше и на море различий нет. Однако есть и специфические особенности. Например, к ним относится ограниченная площадь палубы, на которой располагаются устья добывающих скважин, что может стать причиной возникновения открытых фонтанов, пожаров, загрязнения моря и т. д. при освоении высоконапорных скважин.

На платформе разработана и внедрена автоматизированная система управления (АСУ) и система безопасности, состоящая из АСУ добычей, системы обнаружения пожаров, утечек газа и оповещения о месте их возникновения, системы аварийной остановки технологических процессов и системы мониторинга состояния кессона. АСУ производством необходима для контроля и управления технологическими процессами, судовыми системами и жизнеобеспечением. Она также обеспечивает распределение электрической энергии, координацию работы различных служб при эксплуатации платформы в любом из представленных режимов, обмен информацией, взаимодействие АСУ и подсистем безопасности. Система сигнализации обеспечивает контроль, получая информацию от датчиков в каждой из рабочих зон платформы. При получении сигнала о возгорании или утечке активируются системы пожаротушения и аварийной вентиляции.

Аварийные режимы также используются в системе аварийного отключения, которая в случае утечки или пожара обеспечивает остановку технологического процесса и оборудования, с помощью которого этот процесс осуществляется.

Управление каждой из указанных систем осуществляется с центрального пункта управления, куда поступает информация о значительной части процессов, а также осуществляется их анализ и контроль. Для обеспечения работы всех указанных систем используются мониторы, транслирующие видео с камер наблюдения в режиме реального времени, мониторы,

отображающие значения параметров производственного процесса в режиме реального времени, и т. д.

Подсистемы независимы друг от друга, а для обеспечения их работы используются 15 программируемых логических контроллеров и 90 щитов управления. Управление работой оборудования осуществляется операторами, в автоматическом режиме этот процесс пока не реализован.

Для анализа причин аварийных ситуаций и остановок технологических процессов используется компьютерный обучающий комплекс, прямой целью которого является повышение квалификации сотрудников и ее поддержание. Комплекс также используется при планировании изменений в автоматизированной системе управления и системе безопасности.

В учебном комплексе смоделировано большинство оборудования, предназначенного для технологических процессов, в том числе устья скважин, системы теплоносителя и т.д.

Упомянутые выше системы управления представляют собой комплекс, необходимый для работы как самой платформы, так и месторождения. Однако, учитывая все условия, в которых ведется добыча, их использование становится недостаточным.

На платформе «Приразломная» постепенно внедряются цифровые проекты. Наиболее развитым цифровым решением является программа «Интегрированное моделирование», которая представляет собой модель всей производственной цепочки нефтедобывающего актива, включающей пласт, скважины, систему сбора и подготовки нефти. Цифровые модели, используемые на нефтяной платформе, не обладают всеми возможностями и функциями, которые предоставляет ЦД. Однако ЦД представляет собой сложную систему интегрированных технологий, которая имеет свои подводные камни и трудности при внедрении, разработке и эксплуатации. В связи с тем, что МЛСП «Приразломная» является сложным и важным объектом, внедрение ЦД является экономически целесообразным решением, а разработка подсистемы ЦД для морской добывающей платформы — актуальной темой исследования.

3. Методология и результаты

Нефтегазовая промышленность работает в сложных условиях и с оборудованием, расположенным в удаленных районах в экстремальных условиях окружающей среды. ЦД осуществляет мониторинг и управление процессами более безопасными, тем самым снижая связанные с этим риски. Кроме того, прогнозируя время простоя, ЦД оказывает положительное влияние на производственный процесс, что напрямую ведет к экономии времени и денег.

В данной работе разрабатывается подсистема ЦД морской добывающей платформы. Так как это достаточно обширная задача, в рамках данной работы было решено разработать программу прогнозирования добычи нефти на морском месторождении. Решение данной задачи будет осуществляться статическим методом, основанным на обработке данных о добыче нефти за текущий период с последующим прогнозированием на следующий период. Получение прогноза по месторождению является важной задачей для планирования развития как самого месторождения и организации, так и нефтегазовой отрасли в целом.

Программа прогнозирования добычи нефти предназначена для повышения эффективности эксплуатации нефтяных месторождений с использованием современных технологий анализа данных и машинного обучения.

Разработка системы не является сложным решением с точки зрения использования дополнительной аппаратной инфраструктуры. Датчики устанавливаются во всех необходимых местах скважины на данном месторождении. Значения параметров, по которым можно разработать систему прогнозирования, доступны сотрудникам ИТ-департамента «Приразломной», а значения наиболее важных параметров хранятся на серверах, поэтому основной задачей является непосредственно разработка модели прогнозирования. Машинное обучение стремительно проникает в самые разные отрасли, что подтверждается в научном обзоре данной работы. Это раздел искусственного интеллекта, оснащенный методами и алгоритмами, позволяющими обучать компьютерную систему на основе входных данных. На выходе

можно получить прогноз или выбор конкретного решения задачи. В современном разделе искусственного интеллекта отсутствуют четко прописанные инструкции разработчика.

Создание системы прогнозирования с использованием методов машинного обучения снижает риск получения прогноза с ошибкой из-за человеческого фактора. Таким образом, для разработки данной системы необходим персональный компьютер, навыки программирования, работа с моделями машинного обучения и системного анализа.

Исходя из опыта различных компаний нефтегазовой отрасли, получение прогноза объемов добычи может привести к увеличению добычи нефти за счет правильной оптимизации процесса, сокращения количества незапланированных простоев скважин и выделения правильного периода для обслуживания и ремонта скважин. Прогнозирование позволяет заранее выявить потенциальные проблемы и принять превентивные меры, чтобы избежать аварий и выхода оборудования из строя. Компания Napoleon IT является автором аналогичной системы прогнозирования. Российская компания на основе методов машинного обучения разработала систему выбора скважин для гидроразрыва пласта. Сократилось время, затрачиваемое специалистами на ручной отбор скважин для работы, трудозатраты, повысилась точность расчетов, что позволило добиться эффективного управления нефтяными ресурсами. Благодаря динамичному принятию решений по внесению корректировок в текущий производственный процесс, а также правильному решению проблем, предприятие быстрее достигнет установленных производственных показателей быстрее. При этом дополнительный объем добытой продукции в результате ускорения разработки месторождения можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q_{\text{доп}} = Q_y \cdot \frac{T_2 - T_1}{2} \quad (1)$$

где T_1 — нормальная продолжительность разработки месторождения, а T_2 — ускоренная продолжительность. Как было сказано ранее, средний уровень добычи на Приразломном месторождении составляет 5,5 млн тонн в год. Если сократить время добычи установленного объема на 5 %, то дополнительный объем составит 0,14 млн тонн в год.

$$Q_{\text{доп}} = 5,5 \cdot \frac{1 - 0,95}{2} = 0,14$$

Небольшое увеличение темпов разработки месторождения повлечет за собой рост объемов добычи и снижение себестоимости добытых углеводородов. Анализируется количество времени, необходимое для получения прогноза добычи. Программа, разработанная в данной работе, получает на вход набор данных, в которых задаются необходимые параметры. При их изменении на месторождении подразумевается, что данные вводятся в заданный набор путем загрузки информации с датчиков, либо вручную изменяются менеджерами. Мы представляем, что эта операция выполняется и при более традиционном методе определения объемов производства с помощью программного обеспечения. Однако время, затрачиваемое на получение прогноза с помощью модели машинного обучения, гораздо меньше, чем при использовании различных методов человеком.

Таким образом, разработка программы прогнозирования добычи не требует серьезных изменений в работе месторождения. Ее внедрение дает положительный эффект, который определяет затраты на ее внедрение и реализацию.

Нефтедобывающая платформа имеет специфические особенности, обусловленные автономной работой в океанских водах. Частичная работа платформы может быть приостановлена при неблагоприятных условиях окружающей среды. Скорость ветра более 17 м/с приводит к остановке работ на внешних площадках из-за повышенной опасности для жизни сотрудников.

Значение высоты волны, скорости и направления течения воды необходимо также учитывать при швартовке судов и шлангов, разгрузке, погрузке и т. д. Эти же процессы можно

выделить отдельно как взаимодействие платформы с грузовыми судами. Существует ограниченное количество танкеров, используемых как для погрузки и разгрузки, так и для взаимодействия с платформой в целом. При сбоях в транспортной логистике возникает конкуренция, что сказывается на процессах погрузки и разгрузки.

Ледовые условия влияют на деятельность платформы, начиная от материалов и дизайна платформы и заканчивая приостановкой производства из-за отсутствия танкера. Однако следует учитывать, что танкер прибывает на платформу в соответствии с графиком, и к этому времени нефтехранилища уже должны подготовить нефть к погрузке на танкер. Таким образом, только длительный период неблагоприятной погоды будет напрямую влиять на добычу нефти. В короткие периоды интенсивность добычи снижается, чтобы обеспечить полную загрузку нефтехранилищ добываемой нефтью.

Нефтяная платформа имеет ограничения по хранению как грузов, необходимых для работы платформы, так и добываемого сырья. Поэтому своевременные процессы импорта и экспорта являются важными составляющими функционирования всего объекта в целом. По соображениям безопасности, экономической целесообразности и т. д. нежелательными условиями являются близкие к переполнению хранилища и истощение ресурсов снабжения.

Крайне нежелательными условиями являются замена оборудования на одном из технологических модулей, поэтому время ремонта и обслуживания является важным параметром, который важно учитывать, даже с учетом того, что ремонтные работы могут повлечь за собой частичную остановку производства.

Параметры, которые напрямую влияют на процесс увеличения добычи нефти, — это температура, вязкость и плотность нефти. Температура нефти также неразрывно связана с содержанием парафина: чем оно выше, тем выше точка замерзания. Кроме того, при высоком содержании парафина возникают проблемы при транспортировке и добыче нефти: закупорка пор, снижение фильтрационных характеристик пласта и уменьшение полезного сечения насосно-компрессорных труб. Эти факторы приводят к повышенному износу оборудования, расходу ресурсов потребление ресурсов и т. д.

Важнейшим показателем является также температура вспышки, которая определяет взрывоопасность нефтяного вещества. Температура вспышки варьируется в широких пределах. Для того чтобы предотвратить возгорание объекта, необходимо точное значение этого параметра.

При разработке концептуальной модели важно учитывать такие параметры, как забойное давление, устьевое давление, давление насыщения нефти, давление на входе в насос, начальное пластовое давление, пластовое давление в процессе разработки, а также статическое и динамическое давление. Сумма последних является важной характеристикой энергии потока.

Нефть в пласте находится под начальным пластовым давлением, от которого зависит пластовая энергия, способствующая движению углеводородов по пласту к скважине, то есть к самому низкому давлению. В процессе разработки месторождения пластовое давление снижается, что приводит к изменению физико-химических свойств, а также к снижению дебита скважин. По этой причине важно поддерживать пластовое давление; анализ этого параметра позволяет регулировать разработку и эксплуатацию.

В процессе эксплуатации важное значение имеет депрессия скважины, которая представляет собой разницу между пластовым и забойным давлением. Поскольку в нефтяных залежах нефть заполняет пустоты в горных породах, при разработке концептуальной модели необходимо учитывать физические свойства залежи, в том числе проницаемость, пористость, сжимаемость, гранулометрический состав и т. д., для горных пород и физические свойства пластовых флюидов, такие как вязкость, плотность, поверхностные свойства нефти и другие.

Проницаемость породы определяет ее способность пропускать флюиды, а пористость — способность вмещать флюиды в пустотах породы. Проницаемость среды зависит в основном от размера каналов, которые представляют собой поровые пространства. Прямой

связи между этими параметрами нет, но оба параметра зависят от гранулометрического состава породы, который определяет указанные и другие физические свойства породы.

Нефтеотдача зависит от свойств породы и технологических факторов. На величину нефтеотдачи влияют методы, применяемые к пластам. После подсчета запасов нефти в пласте определяется предварительный коэффициент нефтеотдачи.

Важным фактором является высокая обводненность горных выработок. Она осложняет ведение горных работ и является причиной насыщения подземных вод.

Физические свойства нефти в пластовых условиях необходимо учитывать при выборе метода добычи нефти, а также при подборе оборудования.

Содержание серы ухудшает качество нефти, усложняя процессы переработки, подготовки и транспортировки. Вязкость — важное свойство нефти, определяющее ее подвижность по трубопроводам и в пластовых условиях. Выбор типа вытесняющего агента, мощности насоса, оценка скорости фильтрации в пласте осуществляются с учетом значения вязкости.

Вязкость нефти уменьшается с увеличением количества растворенного в ней газа. Однако высокий газовый фактор, как и высокое содержание парафина, ускоряет износ оборудования. Содержание воды в нефти также влияет на этот процесс. Каждый из этих параметров важен для транспортировки или дальнейшего использования нефти/нефтепродуктов.

Плотность (удельный вес), которая также влияет на подвижность нефти, уменьшается с увеличением глубины залегания продуктивного пласта. Плотность также зависит от температуры, поэтому принято выражать ее для определенного значения температуры. Плотность нефтепродуктов, в свою очередь, зависит от химического состава.

Концентрация серы в нефти влияет на эксплуатационные свойства нефтепродуктов. Кроме того, она влияет на загрязнение воздуха. Молекулярная масса — важнейшая характеристика нефти и нефтепродуктов, позволяющая делать выводы о разнородных компонентах, входящих в их состав. Молекулярная масса нефтяной фракции увеличивается с повышением температуры кипения, что приводит к увеличению вязкости. Объемный коэффициент пластовой нефти используется при подсчете запасов нефти объемным методом. Он показывает отношение объема нефти в пласте к объему выделенной нефти.

Дебит — важнейший параметр в нефтедобыче. Он определяется объемом жидкости, добываемой за определенную единицу времени. Дебит также можно определить как характеристику производительности установленных насосов.

При добыче нефти с морской добывающей платформы можно выделить целый список параметров, которые в той или иной степени оказывают влияние. В рамках данной исследовательской работы было определено 104 параметра. После применения метода экспертных оценок была получена диаграмма Парето, в которой факторы сгруппированы по степени важности их влияния на систему. На основании полученных данных и диаграммы Парето (рис. 1) к значимым факторам отнесены те, которые имеют вес $\lambda \geq 0,0102$.

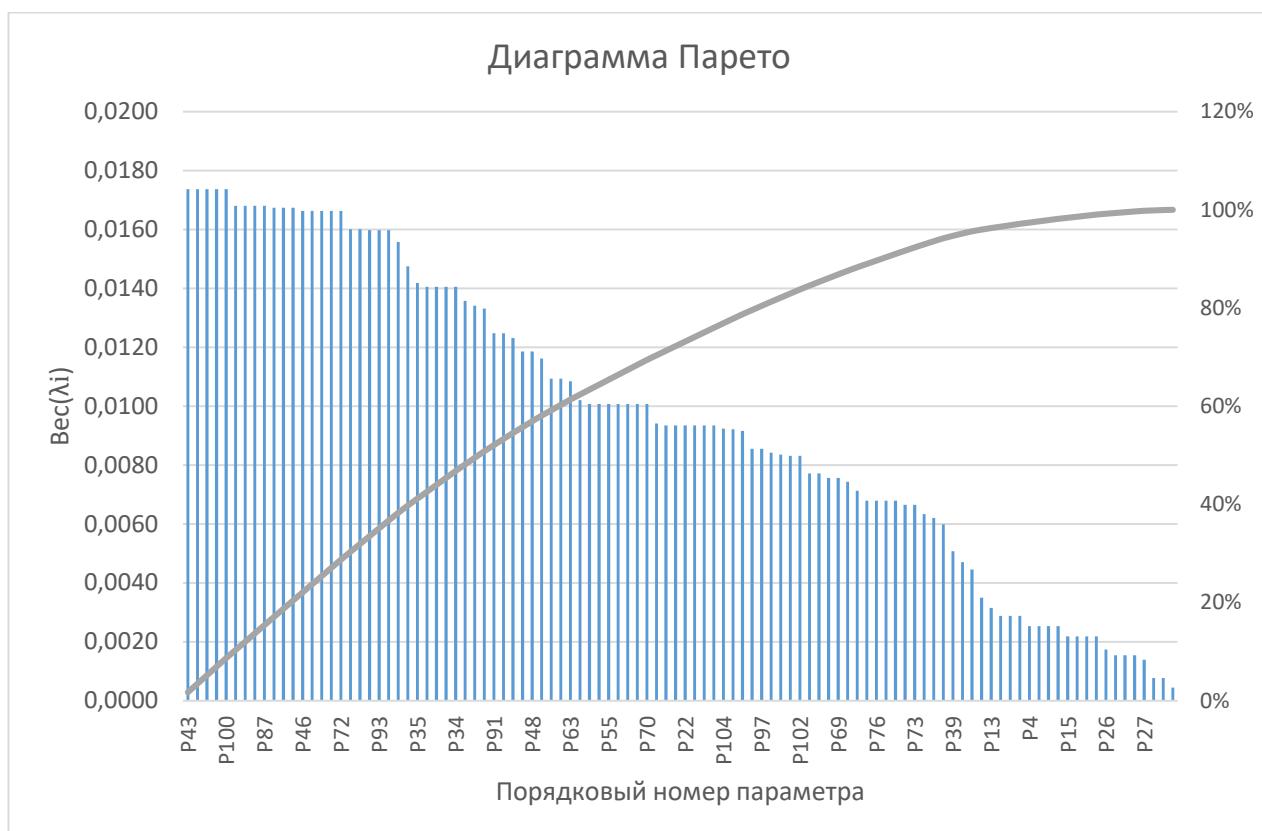


Рис. 1. Важнейшие параметры, влияющие на эффективность добычи нефти

Концептуальная модель состоит из 36 параметров, которые послужат основой для последующей разработки математической модели.

Проанализирован процесс добычи нефти на морской добывающей платформе и разработана концептуальная модель с учетом полученной информации. Управление процессом невозможно без разработки математических моделей. Такие модели позволяют анализировать сложные процессы с определенными упрощениями и допущениями. Для улучшения анализа показателей качества процесса добычи нефти на морской платформе была разработана математическая модель, основанная на сформированной концепции. Комплексная математическая модель добычи нефти на морской добывающей платформе представлена в Рисунок 2. Данная модель не может полностью описать технологический процесс добычи нефти на шельфе, но может быть использована для описания некоторых аспектов технологического процесса. Таким образом, в данном исследовании была разработана математическая модель, основанная на уравнениях, определяющих параметры пласта, скважин и нефти. Параметры, связанные с платформой, оказывали меньшее влияние на процесс, и это было подтверждено оценками специалистов нефтегазовой отрасли. Математические модели являются основой для разработки ЦД, но такие модели описываются нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями, относящимися к семейству сложных многодисциплинарных систем уравнений. Такие уравнения должны соответствовать поведению реальных объектов при различных условиях эксплуатации, а также различным технологическим процессам, с помощью которых реализуется создание материалов, реальных объектов и изделий.

$$\left\{
 \begin{aligned}
 b_k &= 1 + \lambda_{ng} \cdot \Gamma \cdot \alpha_n \cdot (t - 20) - 6.5 \cdot 10^{-4} \cdot P \\
 X &= \frac{V}{G} \cdot 100 \\
 t_{vsp} &= \frac{A}{D_0 \cdot \beta_k \cdot P_{vsp}} \\
 M &= a + b t_{sr} + c t_{sr}^2 \\
 \rho_4^t &= \rho_4^{20} - \alpha_\rho (t - 20) \\
 P_{pl} &= \rho_n g H_{skv} + P_y \\
 P_{zab} &= P_{odin} + P_{zatr} \\
 \eta &= \frac{V_{n,A}}{V_{n,\delta}} \\
 P_{nh} &= P_{bh} - P_n \\
 H_H &= H_T \cdot \frac{\rho_B}{\rho_H} \\
 P_{zab} &= \rho_n g (H_{skv} - h_{odin}) \\
 t_{zab} &= t_{sr} + \frac{0.01}{0.025} H_{skv} \\
 t_{sr} &= (t_{zab} - t_{yst}) \cdot \ln \frac{t_{zab}}{t_{yst}} \\
 V_{n,\delta} &= F_n \cdot h_n \cdot K_{on} \cdot K_n \cdot \rho_{st} \cdot \theta \\
 q_n &= \frac{2\pi k'_a h \left(P_{zab} - \tilde{P}_n \right)}{\mu_a z_3 \ln \frac{\sigma_n}{\pi r_c}} \\
 P_{zab} &= P_{bh} + H_c \rho_a g - P_{mp} \\
 V_f &= V_{p.a.} - (H_{skv} - H_{yp}) f_{skv} \\
 E_n &= Mg H_{pl} \\
 q_c &= \frac{Q_f \cdot t_p}{T_p} \\
 Q &= \frac{k}{\mu_A} \frac{\Delta P}{L} \cdot F_f \\
 n_{max} &= \frac{\pi \cdot a_{pr}^2}{t_c} \\
 \sum_{i=1}^n Q &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \\
 V_n &= \frac{1}{3} h_n (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}) - V_0,
 \end{aligned}
 \right.$$

Прогноз добычи нефти выполняется в среде Jupiter Notebook с использованием языка программирования Python 3.13. Приразломное месторождение является действующим, и его данные недоступны. Поэтому для моделирования использовались данные по месторождению Volve, расположенному в Северном море. Данные для моделирования были получены в открытом доступе после процедуры регистрации на сайте Equinor. Использование данных в исследовательских целях не требует дополнительной лицензии.

Набор данных содержит параметры, представленные в Таблице 2. Не все параметры из Таблицы будут использованы при прогнозировании добычи нефти.

Таблица 2

Параметры, содержащиеся в наборе полевых данных Volvo

Параметр	Пояснение	Единица измерения
DATE_PROD	Дата добычи	дд.мм.гг
WELL_CODE	Код скважины	
ID_WELL	Уникальный идентификатор скважины	
UN_WELL	Уникальное название скважины	
UC_FIELD	Уникальный код месторождения	
UN_FIELD	Уникальное название месторождения	
CODE_FACILITY	Код объекта	
NAME_FACILITY	Название объекта	
HOURS_OPERATION	Часы эксплуатации	ч
OIL_VOL_BORE	Объем добываемой нефти	м ³
WL_VOL_BORE	Объем закачиваемой воды	м ³
GAS_VOL_BORE	Объем добываемого газа	м ³
WATER_VOL_BORE	Объем добываемой воды	м ³
AVG_BOTTOMHOLE_P	Среднее давление на забое скважины	бар
AVG_BOTTOMHOLE_T	Средняя температура на забое скважины	°C
AVG_PDROP_TUBING	Средний перепад давления в скважине	бар
AVG_ANNULLUS_P	Среднее затрубное давление	бар
AVG_CHOKE_SIZE	Средний размер дросселя	%
DP_CHOKE_SIZE	Перепад давления на дросселе	бар
AVG_CHOKE_UOM	Среднее значение дросселя	%
AVG_WELLHEAD_P	Среднее давление на устье скважины	бар
AVG_WELLHEAD_T	Средняя температура на устье скважины	°C
FLOW_KIND	Вид потока	
WELL_TYPE	Тип скважины	

Набор данных содержит параметры, которые имеют одинаковые значения для всех строк. К таким параметрам относятся уникальный код поля, уникальное имя поля, код объекта и имя объекта. Эти параметры будут удалены. Код скважины, уникальный идентификатор скважины и уникальное имя скважины являются избыточными данными, и один из них будет оставлен для работы. Кратко описав основные элементы, перейдем к написанию кода. Первым шагом в написании программы является установка следующих специализированных библиотек:

```
import pandas as pds;
import matplotlib.pyplot as plt;
import seaborn as sns;
import plotly.express as px;
import numpy as np;
import warnings.
```

Разработка системы прогнозирования добычи нефти невозможна без библиотеки для обработки и анализа табличных данных. Такой библиотекой является Pandas.

Для вывода графических данных используется пакет Matplotlib 3.5.3. Это гибкий, легко настраиваемый пакет, который предоставляет возможность визуализации двумерных и трехмерных графиков. Pyplot — модуль пакета Matplotlib, который помогает автоматически создавать оси, рисунки и другие компоненты графических материалов. Seaborn 0.13.2 — пакет

программ для визуализации данных, основанный на Matplotlib. Пакет создает статистические графики из наборов данных. Библиотека Plotly позволяет создавать широкий спектр возможностей интерактивной визуализации. Plotly express — это высокоуровневый модуль, который упрощает процесс создания визуализации данных. Для выполнения вычислений используется библиотека NumPy Python, которая предоставляет объект тензора, различные производные объекты, а также набор математических, логических, манипуляционных, сортировочных и других процедур с массивами. Модуль warnings позволяет выдавать предупреждения и работать с ними. Следующим шагом будет импорт данных:

```
df_prod = pd.read_excel('./Volve_production.xlsx', sheet_name = «Daily Production Data»).
```

Набор данных для поля Volv представлен в файле Excel. Функция read_excel() библиотеки Pandas позволяет читать рабочую книгу Excel; с помощью параметра sheet_name можно явно указать лист, из которого нужно импортировать данные во фрейм данных.

Создадим массив данных, содержащий только те параметры, которые будут использоваться в дальнейшем при моделировании. Это можно сделать, удалив столбцы данных с помощью функции drop().

Для работы с данными по каждой скважине зададим названия скважин с помощью функции unique(), которая определяет уникальные значения в столбце UN_WELL.

Однако список названий скважин включает в себя не только добывающие, но и нагнетательные скважины. Создадим набор данных, содержащий информацию только о добывающих скважинах, указав, что тип притока должен соответствовать добыче:

```
df_prod = df_prod[df_prod['FLOW_KIND'] == 'production'].
```

Отображение названий скважин, предназначенных для добычи на месторождении, осуществляется с помощью кода:

```
print("Names of wells in production:")
for UN_WELL in df_prod['UN_WELL'].unique():
    print(f"- {UN_WELL}")
```

Then, we derive a list of names of wells in operation (рис. 2):

- 15/9-F-1 C
- 15/9-F-11
- 15/9-F-12
- 15/9-F-14
- 15/9-F-15 D
- 15/9-F-5

Рис. 2. Отображение списка названий эксплуатируемых скважин [составлено авторами]

Названия добывающих скважин были получены из исходных табличных данных. Однако мы должны убедиться в этом. На графике представлена добыча по каждой скважине по годам, а также построена общая гистограмма для визуализации объемов добычи нефти на месторождении, отсортированных по дате:

```
df_prod.sort_values(by = 'DATE_PROD', ascending = True, inplace = True)
```

Колонки тех параметров, которые больше не являются информативными, удаляются:

```
df_prod.drop(['AVG_CHOKE_UOM', 'WELL_TYPE', 'FLOW_KIND'], axis = 1, in-place = True)
```

```
warnings.filterwarnings("ignore")
```

Годы добавляются в столбец с помощью функции insert(), после использования функции strf-time(« %Y»), которая возвращает значение года из объекта date.

```
year = df_prod["DATE_PROD"].apply(lambda x: int(x.strftime(" %Y"))) df_prod.insert(0, 'Year', year)
```

Графики добычи нефти для всех доступных добывающих скважин отображаются (рис. 3) с помощью следующего кода:

```
df_prod.set_index('Year', inplace= True)
pds.pivot_Таблица(df_prod.reset_index(),
index = 'Year', columns = 'UN_WELL', values = 'OIL_VOL_BORE')
).plot(subplots = True)
```

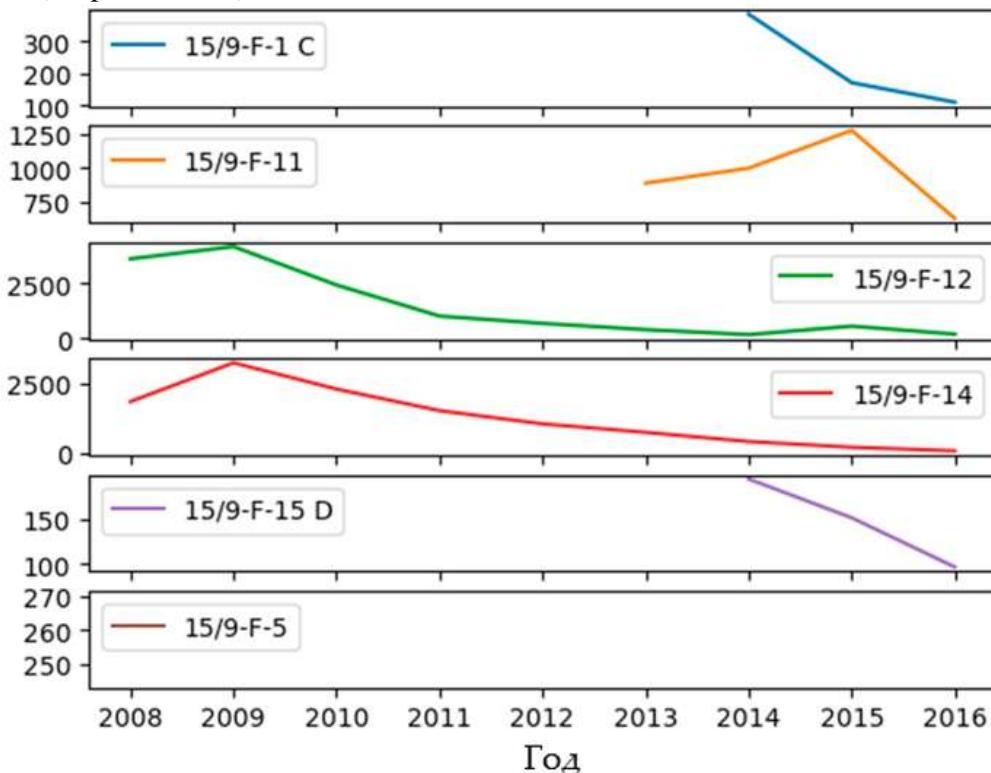


Рис. 3. Графики объемов добычи нефти из каждой скважины по годам [составлено авторами]

На графиках видно, что каждая скважина, кроме 15/9-F-5, добывает нефть. Это означает, что в данных есть ошибка, когда в одной из ячеек указано, что скважина добывает, но значение объема нефти за весь период эксплуатации равно нулю. Это означает, что данную скважину необходимо исключить из набора данных:

```
df_prod= df_prod.loc[df_prod['UN_WELL']!= '15/9-F-5']
```

На следующем этапе данные группируются по годам и скважинам с помощью функции groupby(), и эти значения суммируются для построения гистограммы объема добытой нефти по годам. df_prod_y = df_prod.groupby(by = ['Year', 'UN_WELL'], as_index = True)[['OIL_VOL_BORE']].sum()

Добавляется столбец с данными об общем объеме добытой нефти с помощью функции cumsum(), которая возвращает кумулятивную сумму ряда, где каждый элемент равен сумме всех предыдущих элементов:

```
df_prod.loc[:, "TOTAL_OIL_BORE"] = df_prod.loc[:, 'OIL_VOL_BORE'].cumsum()
warnings.filterwarnings("ignore")
```

Общий объем добытой нефти за весь период эксплуатации месторождения рассчитывается следующим образом:

```
total_oil = df_prod.OIL_VOL_BORE.sum()
```

print(f'The total volume of oil produced is: {total_oil} cubic meters') Для построения графика данные сгруппированы по годам:

```
annual_oil_total = df_prod_y.groupby(by = ['Year'])[['OIL_VOL_BORE']].sum() График добычи нефти строится по годам с помощью программы Plotly версии 4.9. Для этого сначала
```

импортируем `graph_objects` из библиотеки `Plotly` для создания и конфигурации интерактивного графика. На графике присутствуют пробелы, связанные с одновременной остановкой добычи на всех скважинах.

Как было установлено выше, данные содержат как нули, так и пропущенные значения (`NaN`). Необходимо удалить строки, содержащие хотя бы одно значение `NaN`, с помощью функции `dropna()`. Мы также удаляем название скважины, поскольку выводим прогноз добычи для каждой скважины.

Определяются корреляции параметров. Для этого строится карта линейной корреляции Пирсона (рис. 4):

```
mplt.figure(figsize = (10,8))
mplt.title ("The coefficient of linear correlation between all parameters", fontsize = 18, pad = 10)
sbn.heatmap(round(df.corr(),2), annot = True, cmap = "viridis").
```

Это необходимо для того, чтобы исключить параметры с низкой и высокой корреляцией.

Из иллюстрации (рис. 4) следует, что среднее затрубное давление и средний размер дросселя оказывают меньшее влияние на значение объема нефти. Объемы добытой нефти и газа имеют высокую корреляцию, и мы исключаем параметр общей добычи нефти, поскольку он представляет собой кумулятивную сумму. Другие параметры при необходимости будут исключены позже.

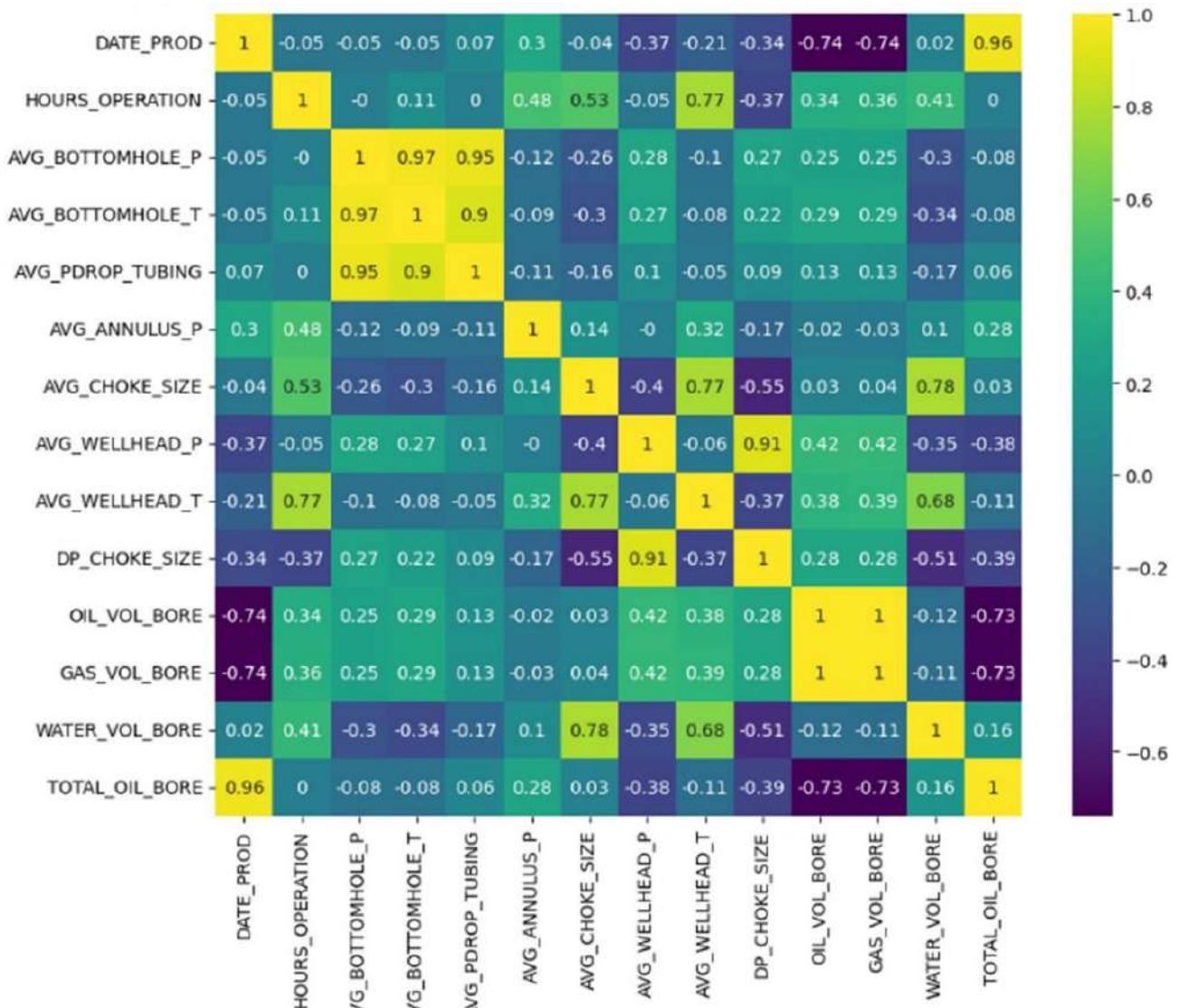


Рис. 4. Карта корреляции между всеми параметрами [составлено авторами]

Построение распределения данных для определения промахов (рис. 5) выглядит следующим образом:

```
mplt.figure(figsize = (15,5))
df.boxplot()
mplt.xticks(rotation = 20);
```

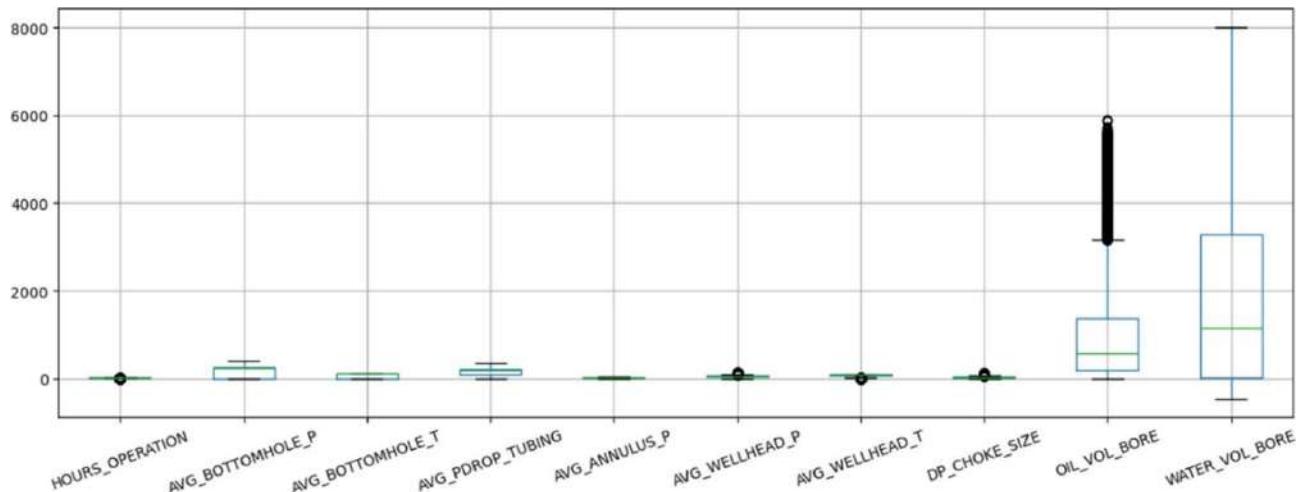


Рис. 5. Распределение данных [составлено авторами]

Выброс — это наблюдение, которое находится на значительном расстоянии от других значений в наборе данных. Это может быть проблематично, поскольку влияет на результаты анализа. На данном этапе мы не будем избавляться от выбросов, а посмотрим, как они влияют на результат. Однако мы удалим из массива нулевые значения и наложим ограничение на количество часов работы: оно должно быть больше нуля. Следующим шагом будет добавление количества дней в набор данных для более простой интерпретации результатов и повторное удаление всех значений NaN:

```
df["days"] = (df["DATE_PROD"] - df["DATE_PROD"].min()).dt.days
df = df.dropna()
```

Новый массив, в котором мы оставляем только необходимые параметры, создается следующим образом:

```
df_new = df[['days', 'AVG_WELLHEAD_T', 'OIL_VOL_BORE', 'DP_CHOKE_SIZE',
'AVG_PDROP_TUBING', 'AVG_BOTTOMHOLE_T', 'WATER_VOL_BORE',
'AVG_BOTTOMHOLE_P', 'AVG_WELLHEAD_P']].
```

Следующим шагом будет разбиение данных на две выборки, тестовую и обучающую, следующим образом:

```
train_size = int(.65 * len(df_new))
df_train = df_new.iloc[:train_size]
df_test = df_new.iloc[train_size:]
```

Это разделение было выполнено для того, чтобы обучить модель на одних данных (df_train) и предсказать производство на других (df_test). Чтобы обучить модель, df_train также будет разделен на две части: тестовую и тренировочную. Также необходимо импортировать метрики качества, функцию, которая делит один набор данных на два подмножества, и метод нормализации входных данных

```
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
df_train.to_csv("./cleaned_data_model_train.csv", index = False)
X = df_train.drop(['OIL_VOL_BORE'], axis = 1)
y = df_train['OIL_VOL_BORE']
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size = 0.4, random_state = 42)
train_data = X_train.join(y_train)
test_data = X_test.join(y_test)
```

Следующим шагом будет импорт модели Lasso. Эта модель представляет собой линейную регрессионную модель, которая используется для построения прогностической модели

одной переменной на основе других переменных. В нашем случае объем добытой нефти зависит от количества дней добычи, средней забойной и устьевой температуры, перепада давления на дросселе, среднего перепада давления в стволе скважины, объема пластовой воды, среднего забойного и устьевого давлений. Основное отличие модели Lasso от линейной регрессии заключается в автоматизации отбора значимых переменных. Так, модель Lasso уменьшает коэффициенты наименее важных параметров до минимального значения, в результате чего эти параметры могут быть исключены из модели.

После нормировки исходных данных обучим регрессионную модель Lasso:

```
alpha_n = 0.05
```

```
lasso_reg = Lasso(alpha = alpha_n)
```

```
lasso_reg.fit(X_train_s, y_train)
```

Also, the model provides values of quality metrics for the test data:

```
y_predL = lasso_reg.predict(X_test_s)
```

```
mse = mean_squared_error(y_test, y_predL)
```

```
mae = mean_absolute_error(y_test, y_predL)
```

```
lasso_score = round(lasso_reg.score(X_test_s, y_test), 3)
```

```
rmse = np.sqrt(mse)
```

```
print("RMSE:", round(rmse, 3))
```

```
print("MAE:", round(mae, 3))
```

```
print("score:", round(lasso_score, 3))
```

В этом случае метрики модели Lasso будут следующими: среднеквадратичная ошибка (RMSE) = 213,755; средняя абсолютная ошибка (MAE) = 147,046; оценка точности = 0,759.

Точность модели Lasso для текущих входных параметров довольно низкая. Средняя квадратичная ошибка и средняя абсолютная ошибка слишком велики, что указывает на большие отклонения в предсказанных значениях. Давайте обучим другую регрессионную модель — модель Random Forest.

Эта модель, как и модель Lasso, предсказывает значение одной переменной. Идея модели Random Forest заключается в том, чтобы для получения точного результата объединить несколько деревьев, каждое из которых обучается на случайном наборе данных и выбирает случайные подмножества параметров. Прогноз каждого дерева учитывается в итоговом результате.

Модель Random Forest импортируется из библиотеки sklearn и выбираются лучшие параметры. Затем мы обучаем и выводим следующие метрики:

```
forest_score = round(best_forest.score(X_test_s, y_test), 3)
```

```
mse = mean_squared_error(y_test, y_predf)
```

```
rmse = np.sqrt(mse)
```

```
r2 = r2_score(y_test, y_predf)
```

```
mae = mean_absolute_error(y_test, y_predf)
```

```
print("RMSE:", round(rmse, 3))
```

```
print("MAE:", round(mae, 3))
```

```
print("score:", round(forest_score, 3))
```

В этом случае метрики модели Random Forest будут следующими: среднеквадратичная ошибка (RMSE) = 102,434; средняя абсолютная ошибка (MAE) = 52,345; и балл = 0,945. Точность модели выше, чем у предыдущей. Однако среднеквадратичная ошибка и средняя абсолютная ошибка остаются большими. Точность модели строится с помощью следующего кода:

```
mplt.figure(figsize = (6, 6))
sbn.scatterplot(x = y_test, y = y_predf, color = 'crimson')
p1 = max(max(y_test), max(y_predf))
p2 = min(min(y_test), min(y_predf))
mplt.plot([p1, p2], [p1, p2], 'b-', linewidth = 2)
mplt.xlabel('Actual values', fontsize = 15)
```

```

mplt.ylabel('Predicted Values', fontsize = 15)
mplt.grid(True)
mplt.show()

```

Графики производных для трех скважин, 15/9-F-11, 15/9-F-12 и 15/9-F-15 D, приведены на рисунке 6. В данном случае обучение для каждой скважины проводилось отдельно.

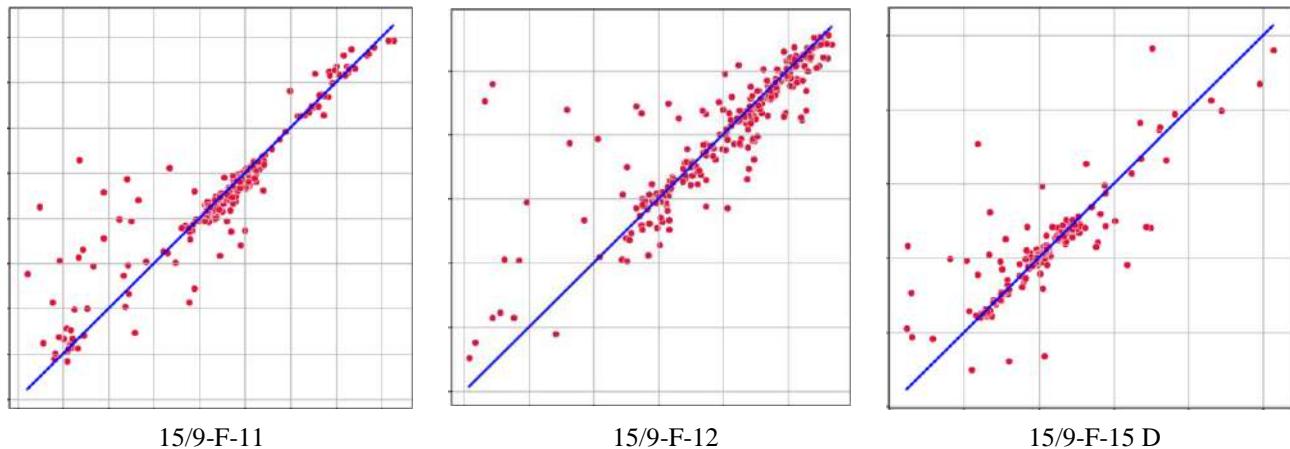


Рис. 6. График точности прогностической модели [составлено авторами].
На графике линия — среднее значение результатов расчетов. Точки — результат расчета.

Синяя линия — это идеальная линия прогноза. Поскольку не все точки лежат на этой линии, модель прогноза не является точной. На графиках (рис. 6) видно, что прогнозные значения сильно расходятся с фактическими, что не позволяет сделать вывод о достаточной точности данной модели. Поэтому после построения распределения данных мы введем зависимость выходного параметра от дополнительных параметров и удалим промахи. Мы введем параметр темпа добычи (OIL_RATE). Мы также добавим параметр, полученный ранее из внутренних документов Equinor, которые также доступны после регистрации, а также исходный набор данных. Из массива данных исключены параметры, которые использовались при расчете новых параметров.

```

df["OIL_RATE"] = round((df["OIL_VOL_BORE"] / df["HOURS_OPERATION"]),3)
df["S_F"] = pd.read_excel('./Volve_newp_.xlsx')

```

Распределение данных для удаления выбросов после добавления новых параметров представлено на примере скважины F15 (рис. 7).

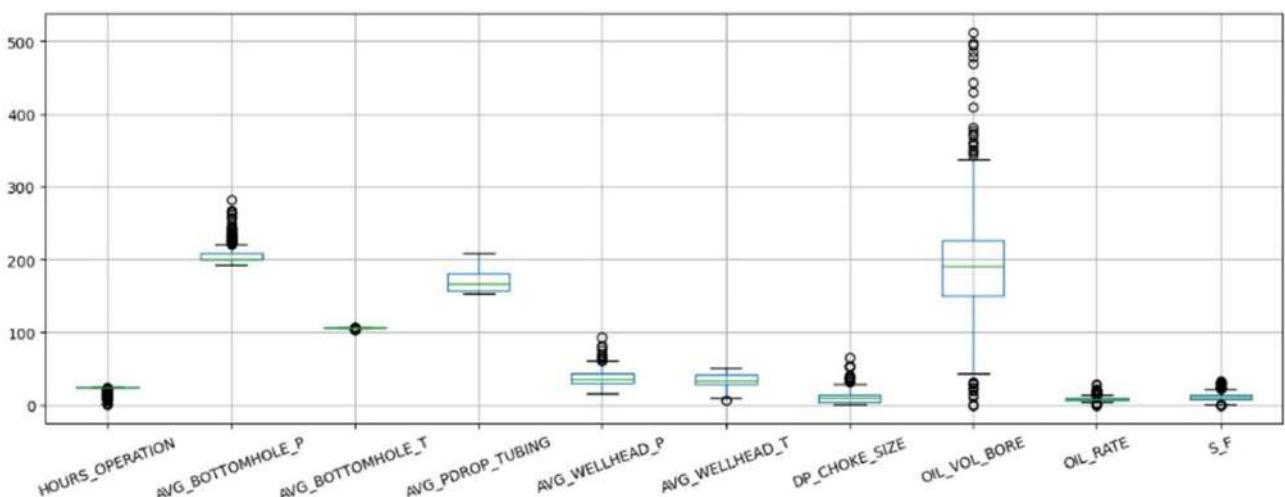


Рис. 7. Распределение данных после добавления новых параметров [составлено авторами]

Удаляются только выбросы прогнозируемого параметра. Удаление всех выбросов нецелесообразно из-за высокой вероятности получения ложного прогноза. Кроме того, в данной отрасли значения одного параметра могут сильно различаться. Учитывая, что запись данных велась нерегулярно и производство было остановлено, выбросы удаляются с помощью следующего кода:

```
df = df[df!=0]
df = df[df.OIL_VOL_BORE<335]
df = df[df.OIL_VOL_BORE>40]
```

После удаления данных на примере скважины F15 получается следующая карта корреляции параметров с учетом добавленных параметров (рис. 8).

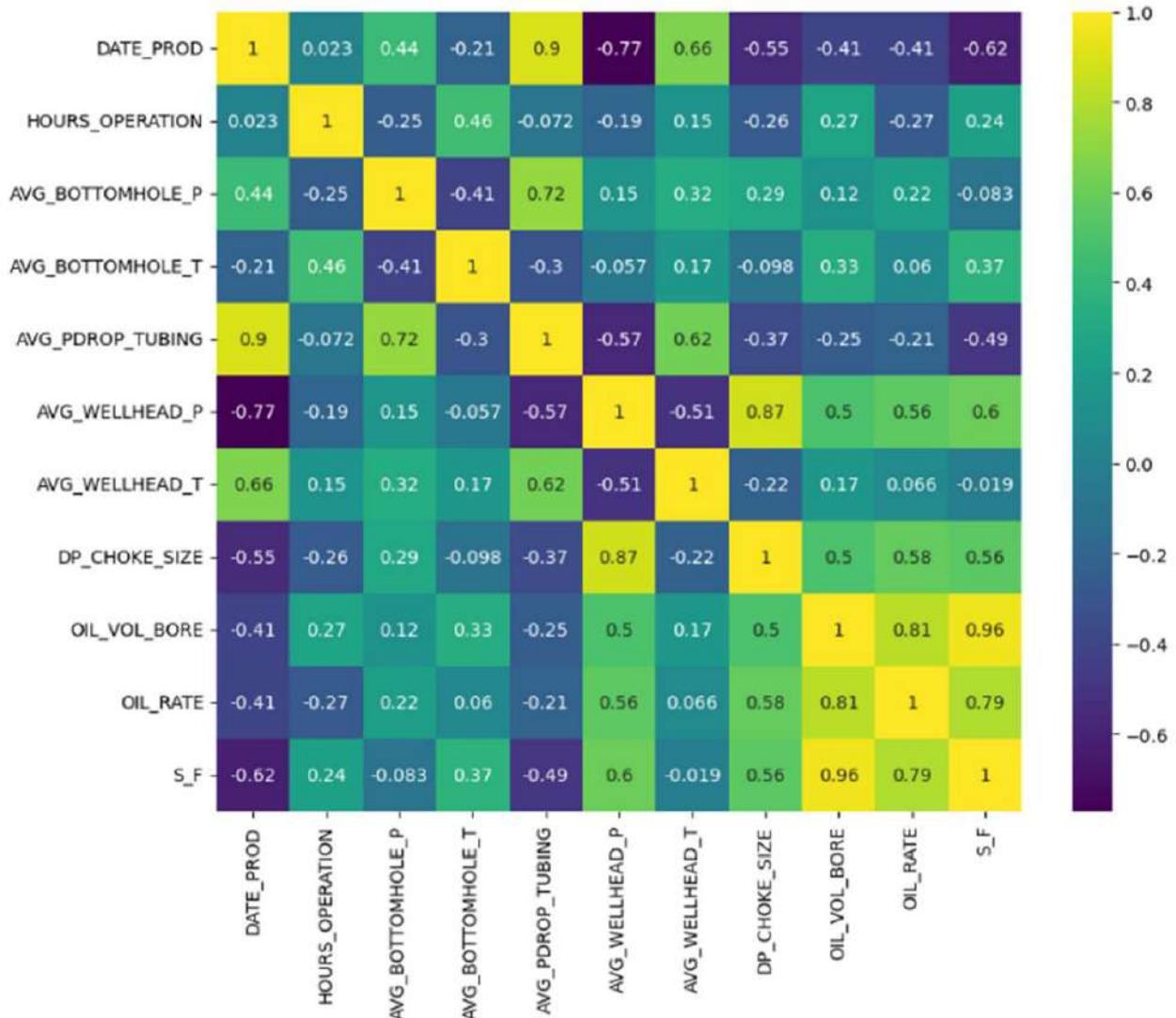


Рис. 8. Корреляционная карта и дополнительные параметры данных [составлено авторами]

Объем добычи нефти сильно коррелирует с параметром S_F, который был введен специально, поэтому его нельзя удалять.

На следующем этапе мы обучим модель Random Forest, поскольку она показала наилучшие результаты до добавления новых параметров. Для этой модели вычисляются метрики качества и строятся графики точности для каждой скважины. В данном случае метрики модели Random Forest будут выглядеть следующим образом: среднеквадратичная ошибка (RMSE) = 5,319; средняя абсолютная ошибка (MAE) = 2,109; оценка точности = 0,989.

Рисунок 9 наглядно показывает, что добавление новых параметров и удаление промахов привело к повышению точности модели, а также к значительному уменьшению ошибок, что подтверждает правильность предпринятых действий. Из графиков (рис. 10) видно, что предсказанные значения лучше совпадают с идеальной линией прогноза. Эта модель была обучена лучше, чем на исходном наборе данных.

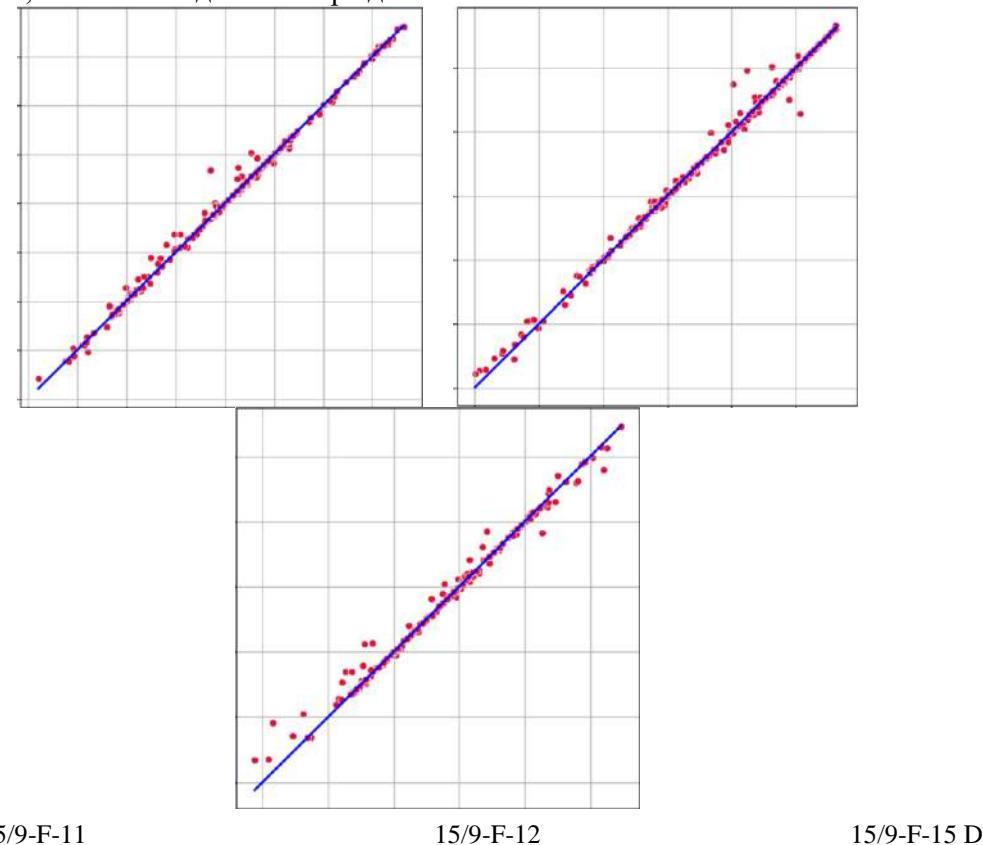


Рис. 9. График точности модели предсказания [составлено авторами]

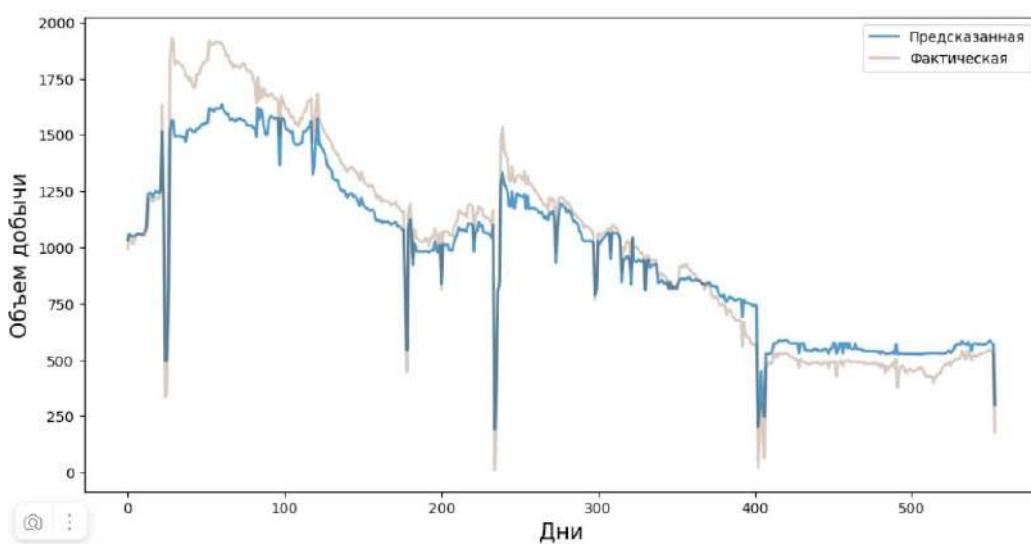


Рис. 10. Прогноз на основе данных испытаний скважины 15/9-F-11 [составлено авторами]

Для получения прогноза объема добытой нефти приведены графики добычи по каждой из трех скважин (рис. 10–12).

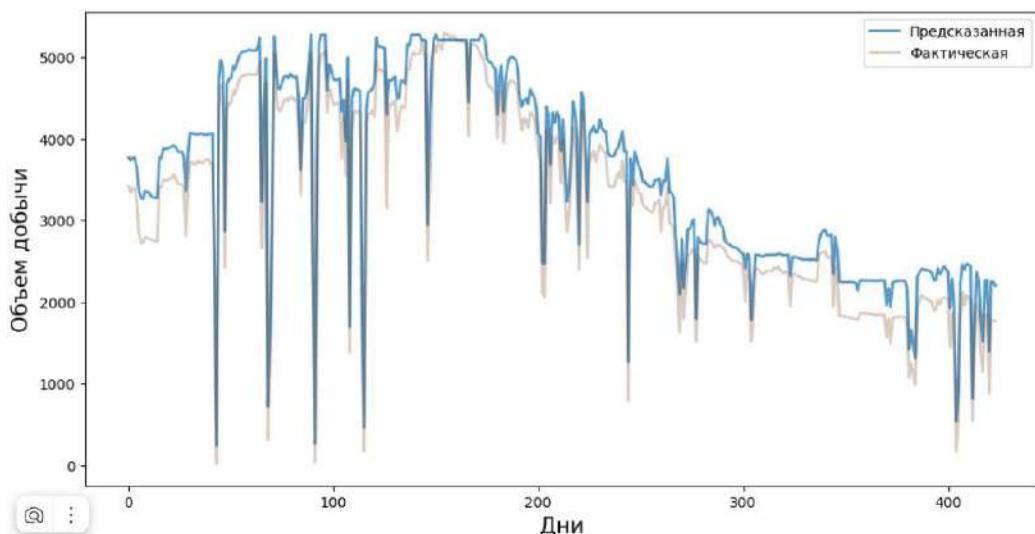


Рис. 11. Прогноз на основе данных испытаний скважины 15/9-F-12 [составлено авторами]

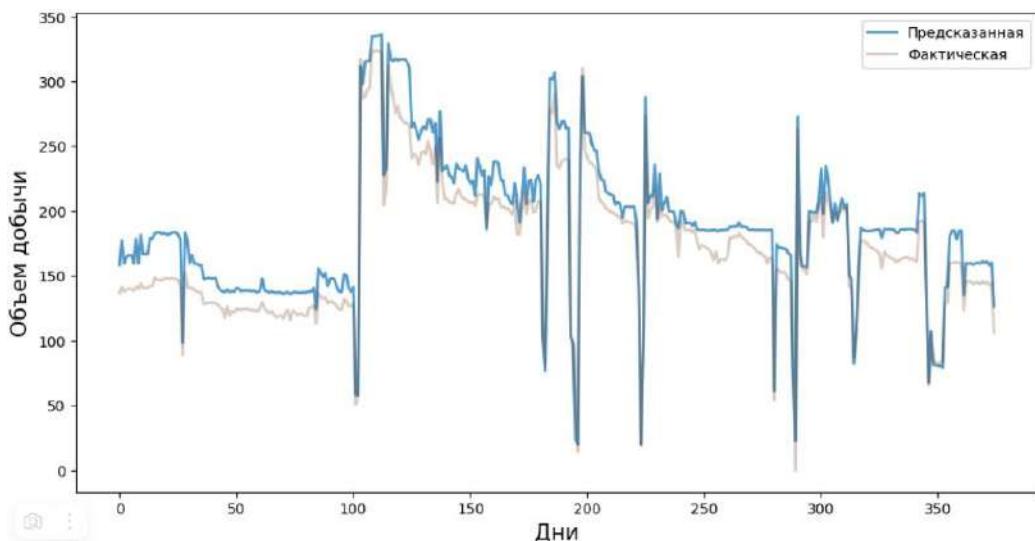


Рис. 12. Прогноз на основе данных испытаний скважины 15/9-F-15 D [составлено авторами]

Графики прогнозов оказались весьма неплохими для нефтегазовой отрасли. В основу разработанной программы легла регрессионная модель Random Forest, которая показала лучшие показатели качества, чем регрессионная модель Lasso. Данная программа основана на данных по конкретному месторождению, прогноз был получен для каждой из трех скважин. Для использования программы на других исходных данных необходимо редактирование программы, так как в зависимости от набора исходных данных производились различные манипуляции с данными.

Точный прогноз по данным, которые использовались для разработки прогнозной модели, получить сложно из-за большого количества пропущенных значений, постоянного изменения добычи от скважины к скважине, нулевых значений одних параметров при наличии других, что свидетельствует о несвоевременном заполнении базы данных и неавтоматизированном характере их сбора. Все эти факторы оказывают негативное влияние на итоговую точность прогнозной модели, что подтверждается высокими значениями среднеквадратичной и средней абсолютной ошибок, а также графиками точности прогнозной модели.

Для получения лучших результатов были добавлены дополнительные параметры и проведены манипуляции с данными, что позволило существенно снизить значения ошибок, а также повысить точность модели. Однако лучшим решением является использова-

ние всех данных, так как в долгосрочной перспективе это даст лучший эффект для получения прогнозов, но в этом случае должно быть минимальное количество разрывов. Другим решением этой проблемы является разработка более сложной модели, учитывающей все нюансы. При выполнении цели работы — разработке программы для прогнозирования объемов производства — были также разработаны концептуальная и математическая модели. На основе этих моделей из исходного массива данных был произведен отбор наиболее значимых для прогнозирования параметров, при добавлении новых параметров некоторые параметры рассчитывались по формулам, расчет которых был возможен на основе исходных данных, но точность модели была ниже, чем полученная в результате предыдущей части работы. Для получения лучшего результата необходимо использовать большее количество параметров, реально влияющих на производственный процесс. Однако наборы данных, доступные для исследований, ограничены. Наиболее объемным является набор данных, опубликованный компанией Equinor, который использовался в данной работе. Вместе с набором данных доступно более 40 000 файлов с одного из месторождений в Северном море. Они могут быть использованы в других научных и практических работах после длительной процедуры анализа, стандартизации и унификации, которая планируется в дальнейших исследованиях. Научную новизну предлагаемой работы можно отметить как комплексный подход к разработке программы прогнозирования объемов добычи на морском месторождении.

4. Обсуждение

Расчет экономической целесообразности внедрения системы прогнозирования добычи нефти включает несколько этапов. Во-первых, необходимо определить первоначальные затраты.

В случае с данной системой можно выделить следующие первоначальные затраты: приобретение лицензионного программного обеспечения, системы прогнозирования добычи нефти, персонального компьютера, дополнительного сервера и коммутатора. Примем во внимание, что на данном месторождении уже имеется вся инфраструктура, поэтому дополнительные затраты на разработку и развертывание локальной сети не рассматриваются, только непосредственно на подключение персонального компьютера к сети. Обучение всех сотрудников не предполагается в связи с наймом специалиста с необходимым уровнем компетенции, а обучение работе с программой инженера машинного обучения включено в дополнительные затраты. Непосредственное взаимодействие с системой прогнозирования предполагается только для инженера машинного обучения, который будет предоставлять результаты работы системы команде, занимающейся прогнозированием добычи нефти.

Рассчитан экономический эффект от внедрения данной системы на морской добывающей платформе. Перед внедрением системы и расчетом заработной платы сотрудников необходимо провести предварительный расчет стоимости прогнозирования добычи нефти. Зарплатная плата сотрудников, занимающих одну должность n , рассчитывается по следующей формуле:

$$C_n = c_n \cdot b_n \quad (2)$$

где C_n — зарплата всех сотрудников, занимающих должность n ; c_n — зарплата одного сотрудника, занимающего должность n ; b_n — количество сотрудников, занимающих должность n .

Общая сумма заработной платы рассчитывается по следующей формуле:

$$C = \sum_{n=1}^{N=7} C_n = \sum_{n=1}^{N=7} c_n b_n = c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3 + c_4 b_4 + c_5 b_5 + c_6 b_6 + c_7 b_7 \quad (3)$$

где C — общая зарплата сотрудников рассматриваемого отдела, а N — количество сотрудников.

Для расчета годового объема заработной платы мы используем следующую формулу:

$$C = \sum_{n=1}^{N=7} C_n \cdot 12 \quad (4)$$

Согласно расчетам, общая сумма заработной платы за год составляет 34 680 тыс. руб. Для расчета общей суммы средств необходимо учесть единый социальный налог, который состоит из отчислений в Пенсионный фонд России (ПФР) 22 %; Фонд социального страхования (ФСС) 2,9 %, $k_{фсс} = 0,029$; и Федеральный фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС) 5,1 %, $k_{ффомс} = 0,051$. Формула для расчета единого социального налога T_n для всех сотрудников департамента выводится следующим образом:

$$T_n = \sum_{n=1}^{N=7} (k_{\text{ПФР}} + k_{\text{ФСС}} + k_{\text{ФФОМС}}) \cdot C_n \quad (5)$$

Единый социальный налог уплачивается ежемесячно, поэтому общая сумма вычетов по единому социальному налогу T определяется в соответствии со следующим выражением:

$$T = 12 \cdot T_n \quad (6)$$

Вычеты по единому социальному налогу составили 10 404 тыс. руб. Для определения объема фонда оплаты труда G используется следующая формула:

$$G = T + C \quad (7)$$

Таблица 3 показывает значения зарплат сотрудников, количество человек на одной должности и значения отчислений в пенсионный фонд, Фонд социального страхования и Федеральный фонд обязательного медицинского страхования на 1 штатную единицу.

Таблица 3
Расчет объема фонда оплаты труда до внедрения системы

№	Сотрудник должность	Оклад (тыс. руб.)	Штатные единицы	Пенсионный фонд (тыс. руб.)	Федеральный фонд социального страхования (тыс. руб.)	Федеральный фонд обязательного медицинского страхования (тыс. руб.)	Итого за год (тыс. руб.)
1	Главный инженер	200	1	44	5,8	10,2	3120
2	Инженер по добыче нефти и газа	120	6	26,4	3,48	6,12	11 232
3	Инженер-геолог по нефти и газу	100	4	22	2,9	5,1	6240
4	Инженер-геофизик	110	4	24,2	3,19	5,61	6864
5	Инженер по данным	130	2	28,6	3,77	6,63	4056
6	Специалист по обслуживанию и ремонту скважин	120	4	26,4	3,48	6,12	7488
7	Специалист по моделированию	130	3	28,6	3,77	6,63	6084
ИТОГО		910	24	200,2	26,39	46,41	45 084

Фонд оплаты труда составил 45 084 тыс. руб.

Расчет объема фонда оплаты труда после внедрения системы прогнозирования выполнен по той же методике, которая была представлена выше. В таблице 4 приведены полученные значения.

В связи с сокращением численности работников уменьшаются следующие значения:

- Общая сумма заработной платы — 32 160 тыс. руб.;
- Общая сумма начислений на заработную плату — 9648 тыс. руб.;
- Общий фонд оплаты труда — 41 808 тыс. руб.

Для более точной оценки экономической эффективности внедрения системы прогнозирования добычи нефти мы рассчитали затраты на внедрение системы, которые состоят из

затрат на приобретение аппаратной инфраструктуры (Таблица 5) и программного обеспечения (Таблица 6).

Таблица 4.
Расчет объема фонда оплаты труда после внедрения системы

№	Сотрудник должность	Оклад (тыс. руб.)	Штатны е единицы	Пенсионный фонд (тыс. руб.)	Федеральный фонд социальног о страхования (тыс. руб.)	Федеральный фонд обязательного медицинского страхования (тыс. руб.)	Итого за год (тыс. руб.)
1	Главный инженер	200	1	44	5,8	10,2	3120
2	Инженер по добыче нефти и газа	120	6	26,4	3,48	6,12	11 232
3	Инженер-геолог по нефти и газу	100	3	22	2,9	5,1	4680
4	Инженер-геофизик	110	3	24,2	3,19	5,61	5148
5	Инженер по данным	130	2	28,6	3,77	6,63	4056
6	Специалист по обслуживанию и ремонту скважин	120	4	26,4	3,48	6,12	7488
7	Специалист по моделированию	130	2	28,6	3,77	6,63	4056
8	Инженер по машинному обучению	130	1	28,6	3,77	6,63	2028
	ИТОГО	1040	22	228,8	30,16	53,04	41 808

Таблица 5
Расчет стоимости аппаратной инфраструктуры

№	Наименование	Количество	Стоимость (тыс. руб.)	Итого (тыс. руб.)
1	Персональный компьютер	1	50	50
2	Маршрутизатор	1	5	5
3	Витая пара	1	3	3
4	Установка серверов	1	500	500
5	Сервер	15	150	2250
6	Обслуживание сервера	1	150	150
	ИТОГО			2958

Таблица 6
Расчет стоимости программного обеспечения

№	Наименование	Количество	Стоимость (тыс. руб.)	Итого (тыс. руб.)
1	Microsoft Windows	1	2,5	2,5
2	MS Office	1	2,3	2,3
3	Система прогнозирования добычи нефти	1	2000	2000
4	Поддержка системы прогнозирования	1	1200	1200
	ИТОГО			3204,8

Для облегчения расчетов количество витой пары указывалось в комплектах, поставляемых продавцом, установка серверов, а также их обслуживание указывались как одно целое при проведении работ со всем оборудованием сразу. Затраты на аппаратную инфраструктуру рассчитываются по следующей формуле:

$$H_a = \sum_{i=1}^{I=6} h_i \cdot z_i \quad (8)$$

где h — стоимость оборудования i ; z_i — количество единиц оборудования i ; I — общее количество приобретенных уникальных единиц оборудования.

Затраты на программное обеспечение будут аналогичны затратам на аппаратную инфраструктуру:

$$H_p = \sum_{i=1}^{I=4} h_i \cdot z_i \quad (9)$$

Получив все необходимые значения, можно рассчитать экономическую эффективность E внедренной системы:

$$E = G_1 - G_2 - H_1 - H_2 - H_{\text{доп}}. \quad (10)$$

Здесь G_1 — объем фонда оплаты труда до внедрения системы прогнозирования; G_2 — объем фонда оплаты труда после внедрения; H_1 — объем затрат на аппаратную инфраструктуру; H_2 — объем затрат на программное обеспечение; $H_{\text{доп}}$ — объем дополнительных затрат, в данном случае мы учтем обучение нового сотрудника работе с системой как 20 тыс. руб. (Таблица 7).

Таблица 7

Расчет экономической эффективности внедренной системы за первый год

Экономическая эффективность (тыс. руб.)	Фонд заработной платы до внедрения (тыс. руб.)	Фонд заработной платы после внедрения (тыс. руб.)	Затраты на оборудование (тыс. руб.)	Затраты на программное обеспечение (тыс. руб.)	Дополнительные затраты (тыс. руб.)
-2886,8	45 084	41 808	2958	3204,8	20

По результатам расчета (Таблица 7) экономическая эффективность за год составила -2886,8 тыс. руб.

По результатам расчета (Таблица 8) экономическая эффективность за второй год составила 1926,8 тыс. руб. К концу третьего года затраты компании после внедрения системы будут покрыты, и экономическая эффективность за все три года составит 945,2 тыс. руб. Предполагается, что система прогнозирования добычи нефти доступна с открытым исходным кодом, поддержка и модификация которого осуществляется специалистом по машинному обучению. Исходя из того, что данная система является динамической, в нее необходимо вносить корректировки. Дальнейшая деятельность специалиста заключается в том, чтобы добиться наилучших результатов от этой модели. Как видно из Таблицы 3, при интерпретации данных, получаемых с месторождения, и выдаче прогноза добычи с помощью полученной системы, становится возможным сокращение определенного количества специалистов данного профиля, а также сокращение специалистов, занимающихся компьютерным моделированием и прогнозированием добычи нефти более традиционным способом. Также, благодаря работе системы, ожидается сокращение времени, затрачиваемого на получение итоговых данных по прогнозу, что влечет за собой увеличение скорости принятия решений. Ожидается увеличение объемов производства за счет более точных прогнозов, а также оптимизация процессов, связанных с добычей нефти.

Таблица 8

Расчет экономической эффективности внедренной системы на второй и последующие годы

Экономическая эффективность (тыс. руб.)	Фонд заработной платы до внедрения (тыс. руб.)	Фонд заработной платы после внедрения (тыс. руб.)	Затраты на оборудование (тыс. руб.)	Затраты на программное обеспечение (тыс. руб.)	Дополнительные затраты (тыс. руб.)
1926	45 084	41 808	150	1200	0

5. Заключение

Внедрение цифровых двойников постепенно реализуется в нефтегазовой отрасли. Однако в силу новизны технологии количество проблем, связанных с процессом внедрения и разработки, велико. Цифровые двойники открывают множество возможностей, поэтому их решение вполне оправдано. Методы и методики, использованные авторами в данном исследо-

довании, являются первыми шагами в формировании методологии исследования. Аналитический обзор литературы позволил авторам сформулировать проблему, которая была выявлена в работах других авторов, но не была ими решена.

Аналитический обзор также направлен на изучение известных методов решения проблем, выделение их актуальности, преимуществ и недостатков. С учетом полученной информации можно разработать собственное решение или выбрать наиболее подходящее. Оценить реальные практические решения поставленной проблемы можно в ходе патентного анализа.

Аналитический обзор проводился поэтапно. На предварительном этапе был проведен обзор литературы и поставлена проблема исследования. На первом этапе были выявлены и изучены литературные источники, на основе которых проводится исследование. На втором этапе был проведен поиск по ключевым словам на платформах Scopus, Research Gate, Google Academy, IEEE Xplore. Поиск осуществлялся как по одному слову, так и по набору слов. Затем был составлен список этих научных публикаций. Обращалось внимание на quartile статьи, ее цитируемость, дату публикации и тип статьи. Из этого списка были исключены статьи, ошибочно включенные в обзор по теме исследования. На следующем этапе были просмотрены ссылки на публикации. В первую очередь рассматривались обзорные статьи с наибольшим количеством цитирований, высоким quartile и более ранней датой публикации. Впоследствии, при отсутствии уникальных выводов, новых рассмотренных аспектов и т. д., обзорная статья могла быть исключена из списка, так как уже была изучена в аналогичной работе. При формировании окончательного списка работ больший приоритет отдавался научным статьям. Аналитический обзор авторами данной работы проводился поэтапно. На втором этапе был проведен поиск по ключевым словам на платформах Scopus, Research Gate, Google Academy и IEEE Xplore. Затем был составлен список публикаций по теме исследования. Особое внимание уделялось quartile статьи, авторитетности журнала, цитируемости и дате публикации. При формировании окончательного списка работ приоритет отдавался исследованиям с уникальными выводами и результатами.

При разработке концептуальной модели авторы сначала определили 104 параметра нефтяной платформы. Затем они применили метод экспертных оценок, который предполагал изучение мнений пяти экспертов. Этот метод позволил создать прогнозную оценку. В ходе интервью эксперты отмечали степень влияния каждого параметра на заданный технологический процесс, используя масштаб от нуля до десяти. После проведения аналитической оценки и расчетов по экспертному отложению от нуля до десяти авторы исследования построили диаграмму Парето, на которой выделили наиболее значимые параметры. После этого была разработана математическая модель. На основе математической модели было проведено компьютерное моделирование объекта исследования.

В качестве основы для компьютерного моделирования был использован массив данных по морскому нефтяному месторождению «Волва». Ликвидация месторождения была завершена в 2018 году. Разработана система прогнозирования добычи нефти на морском месторождении. Использовались регрессионная модель Lasso и модель Random Forest. Использование разработанной модели позволило провести полное исследование объекта, представить его в формализованном и математическом виде, а также осуществить модификацию процесса добычи нефти, что актуально для компаний, занимающихся морской добычей углеводородов.

Вклад авторов: Ю. И.: концептуализация, методология, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, ресурсы, куратория данных, написание — подготовка оригинального проекта, наблюдение, администрирование проекта. В. Н.: исследование, написание-рецензирование-редактирование. А. К.: написание-рецензирование-редактирование. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: Оригинальные материалы, представленные в данном исследовании, включены в статью. Дальнейшие запросы могут быть направлены соответствующему автору(ам).

Благодарности: Авторы хотели бы выразить признательность людям, без которых данное исследование не могло бы быть проведено. Прежде всего, это Иван Митрофанович Першин, Анатолий Аркадьевич Колесников и Наталья Александровна Шатилова, испытатель ООО «Инновации в управлении персоналом», которые внесли огромный вклад в написание данного исследования.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Обозначения:

λ_{ng}	коэффициент изменения объема нефти за счет изменения ее газонасыщенности
G	газовый фактор
α_H	коэффициент теплового расширения нефти
P	давление, МПа
t	температура, °С
V	объем воды в приемнике-ловушке
G	вес продукта
D_0	коэффициент диффузии паров в воздухе, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
A	постоянная, равная 280 $\text{kPa} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}$
P_{vsp}	парциальное давление пара исследуемой жидкости в точке вспышки, кПа
β_k	стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, определяемый по формуле, где m_c , m_s , m_H , m_X , m_o , и m_p — число атомов углерода, сероводорода, галогена, кислорода и фосфора, соответственно, в молекуле жидкости
t_{sr}	средняя молекулярная температура кипения продукта, °С
a , b и c	коэффициенты
ρ'_4	относительная плотность нефти (нефтепродукта) при температуре испытания t , °С
α_ρ	среднетемпературная поправка к плотности
m	масса нефти в объеме V
T_z	температурная точка нефтепродукта
η	коэффициент извлечения нефти (нефтеотдачи)
V_{nd}	объем добытой из пласта нефти
V_{nb}	начальные запасы (баланс) в пласте
P_{pl}	пластовое давление
P_y	давление на устье скважины
ρ_n	плотность нефти, $\text{кг}/\text{м}^3$
H_{skv}	глубина скважины, м
g	ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$
$h=H_{skv}-H_{st}$	высота столба нефти в скважине, м
H_{st}	статический уровень
P_{zab}	давление на забое скважины
P_{odin} , P_{zatr}	сумма давления столба жидкости и избыточного давления газа в затрубном пространстве
P_{vn}	давление на нагнетании насоса, Па
P_H	давление, создаваемое насосом, Па
H_t	значение давления насоса
h_{din}	информация о динамическом уровне
ρ_j	плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$
t_{sr}	среднегодовая температура воздуха, °С
t_{yst}	температура устья скважины
t_{sp}	средняя температура в скважине
t_{pl}	пластовая температура
G	глубина
t_0	температура нейтрального слоя
G_g	геотермический градиент
h_0	глубина нейтрального слоя, ниже которой сезонные колебания температуры не оказывают влияния
AE	коэффициент увеличения
$V_{n,0}$	балансовые запасы нефти, т
F_n	площадь нефтеносности, м^2
h_n	средняя эффективная нефтенасыщенная толщина пласта, м

K_{on}	средний коэффициент открытой пористости пласта, доли единиц
K_n	средний коэффициент нефтенасыщенности пласта, доли единиц
θ	средний коэффициент пересчета нефти, доли единиц
ρ_{st}	среднее значение плотности нефти при стандартных условиях, т/м ³
q_n	средняя приемистость нагнетательной скважины
k'_w	фазовая проницаемость воды в призабойной зоне нагнетательной скважины
Z_z	коэффициент, учитывающий загрязненность призабойной зоны нагнетательной скважины
r_c	радиус нагнетательной скважины
σ_n	половина расстояния между нагнетательными скважинами
\tilde{P}	среднее давление по линии залегания пласта
μ_w	вязкость закачиваемой воды
H_c	средняя глубина скважины
P_{mp}	потери давления из-за трения в водопроводных трубах и в стволе скважины
h	толщина пласта
ρ_b	плотность воды
V_f	призабойная зона пласта
$V_{p.a.}$	объем рабочего агента, используемого для глушения скважины
H_{yp}	расстояние от устья скважины до уровня жидкости на момент начала освоения скважины
f_{skv}	площадь живого сечения скважины, занятая рабочим агентом
E_n	потенциальная энергия пласта
H_n	глубина залегания пласта
M	масса пластовой нефти, газа и воды, определяемая по формуле
V_f	объем жидкости в пласте
ρ_f	плотность жидкости
q_c	суточный отбор жидкости из скважины
Q_{nas}	фактический дебит насосной установки при откачке, м ³ /сут
T	продолжительность периодического цикла откачки
t_p	период откачки
P	приток жидкости в скважину (дебит), м ³ /с
k	проницаемость пористой среды, м ²
μ_d	динамическая вязкость жидкости, МПа·с
$\Delta P = P_1 - P_2$	перепад давления, МПа
L	длина образца пористой среды, м
g	скорость потока, м/с
μ_k	кинематическая вязкость жидкости, м ² /с
D	внутренний диаметр трубы
a_{np}	максимально возможное отклонение от вертикали для используемой технологии бурения
t_c	плотность геометрической сетки разработки месторождения, определяемая по формуле
b_c	горизонтальное расстояние между рядами сетки
h_c	горизонтальное расстояние между скважинами в ряду
h_n	высота усеченной пирамиды
S_1, S_2	площади оснований
h_h	высота усеченной пирамиды
V_δ	общий объем бетонных конструкций внутри нефтехранилища

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grieves, M. W.; Grieves, M. W. Business Is War: An Investigation into Metaphor Use in Internet and Non-Internet IPOs. Unpublished EDM Dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA, 2000.
2. Tsarev, M. V.; Andreev, Y. S. Digital twins in industry: Development history, classification, technologies, use cases. *Izv. Vyssh. Učebnykh Zaved. Priborostr.* **2021**, *64*, 517–531. [[CrossRef](#)]
3. Jones, D.; Snider, C.; Nassehi, A.; Yon, J.; Hicks, B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* **2020**, *29*, 36–52. [[CrossRef](#)]
4. Shafiq, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. *Technol. Area* **2010**, *11*, 1–32.
5. Kim, D.; Lee, C.; Park, S.; Lim, S. Potential Liability Issues of AI-Based Embedded Software in Maritime Autonomous Surface Ships for Maritime Safety in the Korean Maritime Industry. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *10*, 498. [[CrossRef](#)]

6. Kridinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* **2018**, *51*, 1016–1022. [[CrossRef](#)]
7. Traoré, M. K. Unifying Digital Twin Framework: Simulation-Based Proof-of-Concept. *IFAC-PapersOnLine* **2021**, *54*, 886–893. [[CrossRef](#)]
8. Grieves, M.W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *Int. J. Prod. Dev.* **2005**, *2*, 71. [[CrossRef](#)]
9. Brewer, T.; Knight, D.; Noiray, G.; Naik, H. Digital Twin Technology in the Field Reclaims Offshore Resources. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 6–9 May 2019. [[CrossRef](#)]
10. Wanasinghe, T. R.; Wroblewski, L.; Petersen, B. K.; Gosine, R. G.; James, L. A.; De Silva, O.; Mann, G. K. I.; Warrian, P. J. Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access* **2020**, *8*, 104175–104197. [[CrossRef](#)]
11. Umeda, Y.; Ota, J.; Kojima, F.; Saito, M.; Matsuzawa, H.; Sukekawa, T.; Takeuchi, A.; Makida, K.; Shirafuji, S. Development of an education program for digital manufacturing system engineers based on ‘Digital Triplet’ concept. *Procedia Manuf.* **2019**, *31*, 363–369. [[CrossRef](#)]
12. Pershin, I. M.; Papush, E. G.; Kukharova, T. V.; Utkin, V. A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* **2023**, *15*, 2289. [[CrossRef](#)]
13. Asadulagi, M.-A. M.; Pershin, I. M.; Tsapleva, V. V. Research on Hydrolithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing. *Water* **2024**, *16*, 487. [[CrossRef](#)]
14. Sidorenko, S.; Trushnikov, V.; Sidorenko, A. Methane Emission Estimation Tools as a Basis for Sustainable Underground Mining of Gas-Bearing Coal Seams. *Sustainability* **2024**, *16*, 3457. [[CrossRef](#)]
15. Marinina, O.; Nechitailo, A.; Stroykov, G.; Tsvetkova, A.; Reshneva, E.; Turovskaya, L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability* **2023**, *15*, 9614. [[CrossRef](#)]
16. Кондрашева Н. К., Еремеева А. М. Получение биодизельного топлива из растительного сырья. *Ж. Горн. инст.* **2023**, *260*, 248–256. [[CrossRef](#)]
17. Shidlovskaya, K. A.; Barykin, S. E. Sustainability Analysis of Energy Resources Transport Based on A Digital N-D Logistics Network. *Eng. Sci.* **2024**, *29*, 1093. [[CrossRef](#)]
18. Fetisov, V.; Lykov, Y.; Mohammadi, A. H. Evaluation of Pollutant Emissions into the Atmosphere during the Loading of Hydrocarbons in Marine Oil Tankers in the Arctic Region. *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, *8*, 917. [[CrossRef](#)]
19. Khaykin, M.; Toeckhina, O. Transformation of economic theory and economic activities in conditions of modern trends of civilization development. *E3S Web Conf.* **2023**, *371*, 5027. [[CrossRef](#)]
20. Кондрашева Н. К., Еремеева А. М., Нелькенбаум К. С. Разработка отечественной технологии получения высококачественного экологически чистого дизельного топлива. Изв. вузов «ChemChenTech». Высш. шк. Хим. Технол. 2018, *61*, 76–82. [[CrossRef](#)]
21. Халифа А. А., Бажин В. Ю., Устинова Ю. В., Шалаби М. Э. К. Исследование кинетики процесса получения окатышей из красного шлама в потоке водорода. *Ж. Горн. инст.* **2022**, *254*, 261–270. [[CrossRef](#)]
22. Токарев И. С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности. *Ж. Горн. инст.* **2024**, *270*, 1–10. Доступно онлайн: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16516?setLocale=en_US (дата обращения: 30 января 2025 г.).
23. Томский К. О., Иванова М. С. Оптимизация расположения многозабойной скважины в тонкой нефтяной оторочке, осложненной наличием обширной газовой шапки. *Ж. Горн. Инст.* **2024**, *265*, 140–146. [[CrossRef](#)]
24. Pervuhin, D. A.; Trushnikov, V. E.; Abramkin, S. E.; Hlopoinina, V. S.; Talanov, N. A. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation. *Int. J. Eng.* **2025**, *38*, 472–487. [[CrossRef](#)]
25. Babaei, M. J.; Rezvani, M.; Shirazi, A. N.; Yousefi, B. A Distributed Finite Time Based Secondary Average Controller for Voltage/Frequency Regulation and Active/Reactive Power Sharing of AC Microgrids. *Int. J. Eng.* **2025**, *38*, 1–11. [[CrossRef](#)]
26. Tavazo, S.; Ebrahimi, F. Sudden Cardiac Death Prediction by Fusing Electrocardiogram and Heart Rate Variability Signals. *Int. J. Eng.* **2025**, *38*, 86–98. [[CrossRef](#)]
27. Dewangan, H.K.; Sharma, R.; Shah, K.; Alam, P. Development, Analysis, and Determination of Pharmacokinetic Properties of a Solid SMEDDS of Voriconazole for Enhanced Antifungal Therapy. *Life* **2024**, *14*, 1417. [[CrossRef](#)]
28. Xie, L.; Dai, X.; Li, Y.; Cao, Y.; Shi, M.; Li, X. Pickering Emulsion of Curcumin Stabilized by Cellulose Nanocrystals/ Chitosan Oligosaccharide: Effect in Promoting Wound Healing. *Pharmaceutics* **2024**, *16*, 1411. [[CrossRef](#)]
29. Zhao, H.; Zheng, J.; Zhang, Z.; Qin, H.; Wang, C.; Zhu, J.; Chen, A.; Chen, L.; Liu, P.; Yang, W.; et al. Research Progress and Prospects of Oil Saturation Evaluation Methods in Shale Oil Reservoirs. *Processes* **2024**, *12*, 2421. [[CrossRef](#)]
30. Xu, M.; Xu, Z.; Wei, X.; Zhang, G.; Liu, C. Research on Hybrid Heating System in Cold Oilfield Regions. *Clean. Technol.* **2024**, *6*, 1480–1503. [[CrossRef](#)]
31. Jyothsna, G.; Bahurudeen, A.; Sahu, P.K. Sustainable utilisation of rice husk for cleaner energy: A circular economy between agricultural, energy and construction sectors. *Mater. Today Sustain.* **2024**, *25*, 100667. [[CrossRef](#)]
32. Ahmaruzzaman, M.; Gupta, V.K. Rice Husk and Its Ash as Low-Cost Adsorbents in Water and Wastewater Treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2011**, *50*, 13589–13613. [[CrossRef](#)]
33. Ghosh, N.; Das, S.; Biswas, G.; Halder, P.K. Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* **2022**, *85*, 3370–3395. [[CrossRef](#)]
34. Rodriguez-Otero, A.; Vargas, V.; Galarneau, A.; Castillo, J.; Christensen, J.H.; Bouyssiere, B. Sustainable Harnessing of SiO₂ Nanoparticles from Rice Husks: A Review of the Best Synthesis and Applications. *Processes* **2023**, *11*, 3373. [[CrossRef](#)]

35. He, M.; Chen, F.; Wen, P.; Jin, Y.; Zhao, J.; Zhang, L.; Gao, J.; Lu, X.; Wan, L. Vinyl Chloride Distillation Process Simulation Optimization Evaluation: Optimization Based on NSGA-III Algorithm and Quantitative Risk Analysis. *Processes* **2024**, *12*, 2413. [[CrossRef](#)]
36. Chernyshov, S.; Popov, S.; Wang, X.; Derendyaev, V.; Yang, Y.; Liu, H. Analysis of Changes in the Stress–Strain State and Permeability of a Terrigenous Reservoir Based on a Numerical Model of the Near-Well Zone with Casing and Perforation Channels. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 9993. [[CrossRef](#)]
37. Zhao, Y.; Qian, Y.; Zhong, G.; Wu, S.; Pan, S. A Thermal Characteristics Study of Typical Industrial Oil Based on Thermogravimetric-Differential Scanning Calorimetry (TG-DSC). *Fire* **2024**, *7*, 401. [[CrossRef](#)]
38. Massel, L.; Komendantova, N.; Massel, A.; Tsvetkova, A.; Zaikov, K.; Marinina, O. Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats. *J. Infrastruct. Policy Dev.* **2024**, *8*, 4700. [[CrossRef](#)]
39. Бажин В. Я., Устинова Ю. В., Федоров С. Н., Шалаби М. Э. К. Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевого сырья. *Ж. Горн. инст.* **2023**, *261*, 384–391. [[CrossRef](#)]
40. Yan, Z.; Guo, J.; Zou, X.; Wang, S. Integrated Control of Thermal Residual Stress and Mechanical Properties by Adjusting Pulse-Wave Direct Energy Deposition. *Materials* **2024**, *17*, 5231. [[CrossRef](#)]
41. Kassouk, Z.; Ayari, E.; Deffontaines, B.; Ouaja, M. Monitoring Coastal Evolution and Geomorphological Processes Using Time-Series Remote Sensing and Geospatial Analysis: Application Between Cape Serrat and Kef Abbed, Northern Tunisia. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 3895. [[CrossRef](#)]
42. Chen, C.; Fu, J.; Zhang, S.; Zhao, X. Coastline Information Extraction Based on the Tasseled Cap Transformation of Landsat-8 OLI Images. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2019**, *217*, 281–291. [[CrossRef](#)]
43. Oueslati, A.; Aroui, O. E.; Sahtout, N. Sur La Grande Vulnérabilité Du Lido Du ComplexeLagunaire de Ghar El Melh et de SesTerreneable energy sources Humides (Tunisie Septentrionale): Érosion, Risque de Maritimisation et Menaces Sur Le Terroir Original Ramli. *Mediterranee* **2015**, *125*, 65–73. [[CrossRef](#)]
44. Slim, H.; Troussel, P.; Paskoff, R.; Oueslati, A.; Bonifay, M.; Lenne, J. Le Littoral de La Tunisie, ÉtudeGéoarchéologique et Historique. *J. Mediterr. Geogr.* **2005**, *104*, 134.
45. Rouvier, H.; Solignac, L. J. M. Nappes de charriage enTunisie septentrionale: Preuves et conséquences paléogéographiques. *Tunis* **1973**, *26*, 33–47.
46. Dah, M. A.; Khaldi, A.; Rejeb, M. N. Belgacem Henchi Essai de Végétalisation de Dunes Littorales: Cas Du Complexe-Dunaire d'Eghirane (Mogods, Tunisie). *Sci. Change Planétaires/Sécheresse* **2005**, *16*, 255–260.
47. Dolan, R.; Hayden, B.; Heywood, J. A New Photogrammetric Method for Determining Shoreline Erosion. *Coast. Eng.* **1978**, *2*, 21–39. [[CrossRef](#)]
48. Husband, E.; East, H. K.; Hocking, E. P.; Guest, J. Honduran Reef Island Shoreline Change and Planform Evolution over the Last 15 Years: Implications for Reef Island Monitoring and Futures. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 4787. [[CrossRef](#)]
49. Liu, H.; Jezek, K. C. Automated Extraction of Coastline from Satellite Imagery by Integrating Canny Edge Detection and Locally Adaptive Thresholding Methods. *Int. J. Remote Sens.* **2004**, *25*, 937–958. [[CrossRef](#)]
50. McFeeters, S. K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *Int. J. Remote Sens.* **1996**, *17*, 1425–1432. [[CrossRef](#)]
51. Kotov, D. D.; Pervukhin, D. A.; Davardoost, H.; Afanasyeva, O. V. Prospects for the Use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to Solve the Problems of the Mineral Resources Complex (MRC) of the Russian Federation. *J. Marit. Res.* **2024**, *21*, 309–317.
52. Fetisov, V.; Mohammadi, A. H.; Kupavykh, K.; Artyukh, D. Improving the economic efficiency of vapor recovery units at hydrocarbon loading terminals. *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. D’Ifp Energ. Nouv.* **2021**, *76*, 38. [[CrossRef](#)]
53. Afanaseva, O. V.; Putilo, S. Y.; Chirtsov, V. V.; Demidov, A. A. Simulation of the work of structural units of industrial enterprises using the theory of queuing systems. *Acad. J. Manuf. Eng.* **2024**, *22*, 115–125.
54. Marinin, M. A.; Marinina, O. A.; Rakhamanov, R. A. Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gorn. Zhurnal* **2023**, *9*, 28–34. [[CrossRef](#)]
55. Golovina, E. I.; Tselman, B. Cost estimate as a tool for managing fresh groundwater resources in the Russian Federation. *Geol. Miner. Resour. Sib.* **2023**, *4*, 81–91. [[CrossRef](#)]
56. Afanaseva, O. V.; Bezyukov, O. K.; Ignatenko, A. A. Method for assessing the relationship between the characteristics of vibroactivity and the design parameters of a marine diesel. *Acad. J. Manuf. Eng.* **2024**, *22*, 68–75. [[CrossRef](#)]
57. Asadulagi, M.-A. M.; Fedorov, M. S.; Trushnikov, V. E. Control Methods of Mineral Water Wells. In Proceedings of the 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russia, 21–23 September 2023; pp. 152–155. [[CrossRef](#)]
58. Fetisov, V. G.; Nikolaev, A. K.; Lykov, Y. V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems. *IOP Earth Environ. Sci.* **2018**, *88*, 022033. [[CrossRef](#)]
59. Eremeeva, A. M.; Kondrasheva, N. K.; Khasanov, A. F.; Oleynik, I. L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude. *Energies* **2023**, *16*, 2121. [[CrossRef](#)]
60. Asadulagi, M. M. The Use of Distributed and Lumped Type Controllers for the Hydro-lithospheric Process Control System of the Kislovodskoye Field. In Proceedings of the 3rd International Conference on Control in Technical Systems, St. Petersburg, Russia, 30 October – 1 November 2019; pp. 7–10. [[CrossRef](#)]
61. Golovina, E. I.; Karenik, K. S. Modern trends in the field of solving transboundary problems in groundwater extraction. *Resources* **2021**, *10*, 107. [[CrossRef](#)]
62. Asadulagi, M. M. Synthesis of Lumped and Distributed Controllers for Control System of Hydrodynamic. In Proceedings of the 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Vladivostok, Russia, 1–4 October 2019; p. 8933859. [[CrossRef](#)]
63. Eremeeva, A. M. Method to reduce harmful emissions when diesel locomotives operate in coal mines. In *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*; Eremeeva, A. M., Kondrasheva, N. K., Korshunov, G. I., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 10–14. [[CrossRef](#)]

64. Баковский В. Б., Головкин С. И., Кухарова Т. В., Уткин В. А., Чалая Е. Н., Шабалдин Н. А. Острый период политравмы у детей в свете дискриминантного анализа. *Рос. журн. дет. хир. анестезиол. реаниматол.* 2020, № 10, с. 145–156. [[CrossRef](#)]
65. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Оценка потенциального эффекта от применения технологии управления спросом на горнодобывающих предприятиях. Устойчивое развитие. *Разв. горн. техн.* 2024, 16, 895–908. (На русском языке). [[CrossRef](#)]
66. Kukharova, T. V.; Utkin, V. A.; Pershin, I. M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters. In Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St. Petersburg, Russia, 9 April 2021; pp. 975–978. [[CrossRef](#)]
67. Mal'tsev, P. A.; Shatilova, N. A.; Abramkin, S. E.; Podkina, M. E. Designing a Digital Twin in Oil and Gas Technologies: Technology Integration. In Proceedings of the 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 17 June 2024; pp. 352–355. [[CrossRef](#)]
68. Semenova, T.; Al-Dirawi, A.; Al-Saadi, T. Environmental Challenges for Fragile Economies: Adaptation Opportunities on the Examples of the Arctic and Iraq. *Agronomy* 2022, 12, 2021. [[CrossRef](#)]
69. Pervukhin, D.; Kotov, D.; Trushnikov, V. Development of a Conceptual Model for the Information and Control System of an Autonomous Underwater Vehicle for Solving Problems in the Mineral and Raw Materials Complex. *Energies* 2024, 17, 5916. [[CrossRef](#)]
70. Pershin, I. M.; Kukharova, T. V.; Tsapleva, V. V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1728, 012017. [[CrossRef](#)]
71. Martirosyan, A. V.; Martirosyan, K. V.; Chernyshev, A. B. Calculation of the First Switch-on Time of Distributed Object's Control Action. In Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 27–30 January 2020; pp. 750–754. [[CrossRef](#)]
72. Pavel, T.; Polina, S.; Liubov, N. The research of the impact of energy efficiency on mitigating greenhouse gas emissions at the national level. *Energy Convers. Manag.* 2024, 314, 118671. [[CrossRef](#)]
73. Martirosyan, A. V.; Martirosyan, K. V.; Grudyeva, E. K.; Chernyshev, A. B. Calculation of the Temperature Maximum Value Access Time at the Observation Point. In Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 26–29 January 2021; pp. 1014–1018. [[CrossRef](#)]
74. Kazanin, O. I.; Sidorenko, A. A.; Meshkov, A. A.; Sidorenko, S. A. Reproduction of the longwall panels: Modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines. *Eurasian Min.* 2020, 2, 19–23. [[CrossRef](#)]
75. Sidorenko, A. A.; Sirenko, Y. G.; Sidorenko, S. A. An assessment of multiple seam stress conditions using a 3D numerical modelling approach. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1333, 032078. [[CrossRef](#)]
76. Zhang, X.; Cui, X.; Liang, S. Evolution and Optimization of an Ecological Network in an Arid Region Based on MSPA-MCR: A Case Study of the Hexi Corridor. *Sustainability* 2024, 16, 1704. [[CrossRef](#)]
77. Hu, M.; Ghorbany, S. Building Stock Models for Embodied Carbon Emissions — A Review of a Nascent Field. *Sustainability* 2024, 16, 2089. [[CrossRef](#)]
78. Sidorenko, A. A.; Ivanov, V. V.; Sidorenko, S. A. Modelling of computational fluid dynamics of gas dynamic processes on longwall panel during underground mining of flat gassy coal multi-seam. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1333, 032079. [[CrossRef](#)]
79. Sleptsov, A.; Medvedeva, L.; Marinina, O.; Savenok, O. Feasibility Study on the Applicability of Intelligent Well Completion. *Processes* 2024, 12, 1565. [[CrossRef](#)]
80. Nevskaya, M.; Shabalova, A.; Kosovtseva, T.; Nikolaychuk, L. Applications of simulation modeling in mining project risk management: Criteria, algorithm, evaluation. *J. Infrastruct. Policy Dev.* 2024, 8, 5375. [[CrossRef](#)]
81. Shapiro, S. L.; Kopkov, M. P.; Potseshkovskaya, I. V. Problems of the organization of surface and underground space (e.g., historical embankments of Saint Petersburg). *E3S Web Conf.* 2021, 266, 03016. [[CrossRef](#)]
82. Xia, H.; Yin, R.; Xia, T.; Zhao, B.; Qiu, B. People-Oriented: A Framework for Evaluating the Level of Green Space Provision in the Life Circle from a Supply and Demand Perspective: A Case Study of Gulou District, Nanjing, China. *Sustainability* 2024, 16, 955. [[CrossRef](#)]
83. Zhukovskiy, Y.; Tsvetkov, P.; Koshenkova, A.; Skvortsov, I.; Andreeva, I.; Vorobeva, V. A Methodology for Forecasting the KPIs of a Region's Development: Case of the Russian Arctic. *Sustainability* 2024, 16, 6597. [[CrossRef](#)]
84. Андреева Е. С., Маринина О. А., Туровская Л. Г. Наноиздкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества. *Изв. Томск. Политехн. Унив.* 2024, 335, 189–202. [[CrossRef](#)]
85. Das, A.; Saha, P.; Dasgupta, R.; Inacio, M.; Das, M.; Pereira, P. How Do the Dynamics of Urbanization Affect the Thermal Environment? A Case from an Urban Agglomeration in Lower Gangetic Plain (India). *Sustainability* 2024, 16, 1147. [[CrossRef](#)]
86. Marinina, O.; Malikov, A.; Lyubek, Y.; Pasternak, S.; Reshneva, E.; Stolbovskaya, N. Selection of Enhanced Oil Recovery Method on the Basis of Clustering Wells. *Processes* 2024, 12, 2082. [[CrossRef](#)]
87. Golovina, E. I.; Grebneva, A. V. Some Aspects of Groundwater Resources Management in Transboundary Areas. *J. Ecol. Eng.* 2021, 4, 106–118. [[CrossRef](#)]
88. Fetisov, V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a com- pressor station to reduce CO₂ emissions. *Sci. Rep.* 2024, 14, 10605. [[CrossRef](#)]
89. Psistaki, K.; Tsantopoulos, G.; Paschalidou, A. K. An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation. *Sustainability* 2024, 16, 6089. [[CrossRef](#)]
90. Eremeeva, A. M.; Khasanov, A. F.; Oleynik, I. L.; Kondrasheva, N. K.; Marinets, A. R. Development of Biofuel as Marine Lowviscosity Fuels with Environmentally Friendly Components. *Int. J. Eng.* 2025, 38, 273–279. [[CrossRef](#)]
91. Zhukovskiy, Y.; Koshenkova, A.; Vorobeva, V.; Rasputin, D.; Pozdnyakov, R. Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex. *Energies* 2023, 16, 3185. [[CrossRef](#)]

92. Eremeeva, A. M. Studying the possibility of improving the properties of environmentally friendly diesel fuels. In *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*; Eremeeva, A. M., Kondrasheva, N. K., Nelkenbaum, K. S., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 108–114. [[CrossRef](#)]
93. Eremeeva, A. M.; Ilyashenko, I. S.; Korshunov, G. I. The possibility of application of bioadditives to diesel fuel at mining enterprises. *MIAB. Min. Inf. Anal. Bull.* **2022**, *39*, 39–49. [[CrossRef](#)]
94. Mohamed, M.; Zakuan, N. D.; Tengku Hassan, T. N. A.; Lock, S. S. M.; Mohd Shariff, A. Global Development and Readiness of Nuclear Fusion Technology as the Alternative Source for Clean Energy Supply. *Sustainability* **2024**, *16*, 4089. [[CrossRef](#)]
95. Khaykin, M. M.; Priyma, K. A. Digital transformation management issues: An oil-and-gas industry example. Navigating Digital Transformation: Original Research Across Smart Cities. *Sustain. Dev. Beyond* **2024**, *99*–112. Available online: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85201999356&origin=resultslist> (accessed on 20 May 2024).
96. Romasheva, N. V.; Babenko, M. A.; Nikolaichuk, L. A. Sustainable development of the Russian Arctic region: Environmental problems and ways to solve them. *MIAB. Min. Inf. Anal. Bull.* **2022**, *78*–87. (In Russian) [[CrossRef](#)]
97. Zhang, L.; Ponomarenko, T. V. Directions for Sustainable Development of China's Coal Industry in the Post-Epidemic Era. *Sustainability* **2023**, *8*, 6518. [[CrossRef](#)]
98. Sergeeva, B. E.; Ponomarenko, T. V.; Tesovskaya, S. O. Key Corporate Sustainability Assessment Methods for Coal Companies. *Sustainability* **2023**, *15*, 5763. [[CrossRef](#)]
99. Zhang, B.; Ma, J.; Khan, M. A.; Repnikova, V.; Shidlovskaya, K.; Barykin, S.; Ahmad, M. S. The Effect of Economic Policy Uncertainty on Foreign Direct Investment in the Era of Global Value Chain: Evidence from the Asian Countries. *Sustainability* **2023**, *15*, 6131. [[CrossRef](#)]
100. Iakhiaev, D.; Grigorishchin, A.; Zaikov, K.; Bezdudnaya, A.; Ukhanova, A.; Tsvetkova, A.; Fadeev, A. Methodological approach to assessing the digital infrastructure of the northern regions of the Russian Federation. *J. Infrastruct. Policy Dev.* **2024**, *8*, 8747. [[CrossRef](#)]
101. Tamitskiy, A.; Maltseva, L.; Zaikov, K.; Kuprikov, N.; Tsvetkova, A.; Kuprikov, M. Students' Subjective Perceptions of Extremism in the Russian Arctic. *J. Infrastruct. Policy Dev.* **2024**, *8*, 7591. [[CrossRef](#)]
102. Zeng, J.; Dai, X.; Li, W.; Xu, J.; Li, W.; Liu, D. Quantifying the Impact and Importance of Natural, Economic, and Mining Activities on Environmental Quality Using the PIE-Engine Cloud Platform: A Case Study of Seven Typical Mining Cities in China. *Sustainability* **2024**, *16*, 1447. [[CrossRef](#)]
103. Kuprikov, M.; Kuprikov, N.; Zaikov, K.; Zadorin, M.; Tsvetkova, A. Regional climate change adaptation plans in Russia: Legal political overview. *J. Infrastruct. Policy Dev.* **2024**, *8*, 5303. [[CrossRef](#)]
104. Нечитайло А. Р., Маринина О. А. Анализ технологологических направлений электрификации объектов добычи углеводородов на слабоосвоенных территориях. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2022. № 2. С. 45–57. [[CrossRef](#)]
105. Talanov, N. A.; Khlopomina, V. S.; Fedorov, M. C. Systematic and Analytical Research of Methods for Analysing and Identifying the Technical Condition of Complex Technical Systems. In Proceedings of the 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russia, 21–23 September 2023; pp. 92–95. [[CrossRef](#)]
106. Boronko, E. A.; Novozhilov, I. M. Designing an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Power Plant. In Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 29–31 January 2024; pp. 331–334. [[CrossRef](#)]
107. Semenova, T. Value Improving Practices in Production of Hydrocarbon Resources in the Arctic Regions. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *10*, 187. [[CrossRef](#)]
108. Afanaseva, O.; Tulyakov, T.; Romashin, D.; Panova, A. Development of a Robotic Complex for the Manufacture of Parts Used in Civil Engineering. *Eng. Res. Transcr.* **2023**, *3*, 51–58. [[CrossRef](#)]
109. Zhang, M.; Chen, E.; Zhang, C.; Liu, C.; Li, J. Multi-Scenario Simulation of Land Use Change and Ecosystem Service Value Based on the Markov–FLUS Model in Ezhou City, China. *Sustainability* **2024**, *16*, 6237. [[CrossRef](#)]
110. Kozyrev, B. A.; Sizyakov, V. M.; Arsentyev, V. A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids. *Non-Ferr. Met.* **2022**, *2*, 30–34. [[CrossRef](#)]
111. Fedorova, E.; Pupysheva, E.; Morgunov, V. Modelling of Red-Mud Particle-Solid Distribution in the Feeder Cup of a Thickener Using the Combined CFD-DPM Approach. *Symmetry* **2022**, *14*, 2314. [[CrossRef](#)]
112. Ben Youssef, A.; Dahmani, M. Assessing the Impact of Digitalization, Tax Revenues, and Energy Resource Capacity on Environmental Quality: Fresh Evidence from CS-ARDL in the EKC Framework. *Sustainability* **2024**, *16*, 474. [[CrossRef](#)]
113. Daniil, V. R. Application of Artificial Intelligence to Improve the Efficiency of Monitoring and Diagnosing the Condition of Complex Technical Objects. In Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoN), Saint Petersburg, Russia, 29–31 January 2024. [[CrossRef](#)]
114. Mal'tsev, P. A.; Abramkin, S. E.; Plotnikov, A. V.; Martirosyan, K. V. A conceptual Model of Controlled Gas Production Processes in Fields with a Complex Geological Structure. In Proceedings of the 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 17 June 2024; pp. 107–110. [[CrossRef](#)]
115. Mal'tsev, P. A.; Shatilova, N. A.; Abramkin, S. E. Synthesis of a Control System for the Oil Cooling Process in the Oil Supply System of a Gas Turbine Engine. In Proceedings of the 2022 XXV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 25–27 May 2022; pp. 68–71. [[CrossRef](#)]
116. Mani, Z. A.; Goniewicz, K. Transforming Healthcare in Saudi Arabia: A Comprehensive Evaluation of Vision 2030's Impact. *Sustainability* **2024**, *16*, 3277. [[CrossRef](#)]
117. Gafur, S.; Andrey, S.; Liliya, S.; Vadim, F. Assessment of Damage of Metallic Elements in Oil and Gas Facilities using Small Punch Test. *Int. J. Appl. Eng. Res.* **2017**, *12*, 11583–11587.

118. Semenova, T.; Martínez Santoyo, J. Y. Economic Strategy for Developing the Oil Industry in Mexico by Incorporating Environmental Factors. *Sustainability* **2024**, *16*, 36. [[CrossRef](#)]
119. Kozyrev, B. A.; Sizyakov, V. M. Heap leaching of red mud by the formate method. *Obogashchenie rud* **2021**, *4*, 40–45. [[CrossRef](#)]
120. Федорова Е. Р., Пупышева Е. А., Моргунов В. В. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов. *Цветные мет.* **2023**, *4*, 77–85. [[CrossRef](#)]
121. Nikolaichuk, L. A.; Tsvetkov, P. S. Prospects of ecological technologies development in the Russian oil industry. *Int. J. Appl. Eng. Res.* **2016**, *11*, 5271–5276.
122. Pavel, T.; Polina, S. Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions. *J. Clean. Prod.* **2024**, *434*, 139638. [[CrossRef](#)]
123. Cherepovitsyn, A.; Fedoseev, S.; Tsvetkov, P.; Sidorova, K.; Kraslawski, A. Potential of Russian regions to implement CO₂-enhanced oil recovery. *Energies* **2018**, *11*, 1528. [[CrossRef](#)]
124. Бабырь Н. В., Габов В. В., Носов А. А., Никифоров А. В. Особенности конструкции и технологии работы выемочного модуля для угольных месторождений Российской Арктики. *Горный. информ. анал. бюлл.* **2024**, *6*, 5–16. [[CrossRef](#)]
125. Maloziomov, B. V.; Martyushev, N. V.; Babyr, N. V.; Pogrebnoy, A.V.; Efremenkov, E.A.; Valuev, D.V.; Boltrushevich, A.E. Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. *Mathematics* **2024**, *12*, 2842. [[CrossRef](#)]

Отказ от ответственности/Примечание издателя: заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным авторам и составителям, а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) снимают с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в содержании.