

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ХАБАРОВСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Васюта Алексей Дмитриевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА
ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ КОМПЛЕКСЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА**

Специальность: 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Серый Руслан Сергеевич

Хабаровск 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОДОБЫЧИ	11
1.1 Горно-геологические особенности россыпных месторождений золота, влияющие на процессы промывки	11
1.2 Характеристики золотосодержащих песков россыпных месторождений и их влияние на технологический процесс промывки	15
1.3 Анализ традиционных методов управления процессом промывки золотосодержащих песков	19
1.4 Обоснование необходимости разработки системы автоматизации процесса подачи песков на перерабатывающий комплекс	26
1.5 Постановка задач по разработке системы управления процессом подачи песков и обоснование требований к автоматизированной системе	29
1.6 Выводы по главе 1	31
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ РОССЫПНЫХ ПЕСКОВ НА ПРОМЫВКУ И РАБОТЫ ПРОМЫВОЧНОГО КОМПЛЕКСА	32
2.1 Методический подход к исследованию процессов подачи песков и регулирования расхода технологической воды	32
2.2 Методика экспериментальных исследований процесса промывки песков. 35	
2.2.1 План участка	35
2.2.2 Геолого-технологическая характеристика исследуемого участка	36
2.2.3 Методика экспериментальных исследований	43
2.3 Установление зависимости производительности по пескам от тока нагрузки промывочного прибора	49
2.4 Установление зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам	50
2.5 Формирование расчётной основы алгоритма адаптивного регулирования	53

2.6 Экспериментальная оценка влияния адаптивного регулирования на энергопотребление насосного оборудования	56
2.7 Выводы по главе 2	58
3 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДАЧИ ПЕСКОВ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПРОМЫВОЧНОГО КОМПЛЕКСА	60
3.1 Обоснование комплекса технических средств автоматизированной системы управления процессами подачи песков	60
3.2 Апробация разработанной системы автоматизации на промывочных приборах бочечного типа в промышленных условиях	63
3.3 Результаты опытно-промышленной эксплуатации разработанной системы автоматизации	73
3.4 Выводы к главе 3	79
4 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ.....	81
4.1 Выводы по главе 4	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия разработки россыпных месторождений золота характеризуются нарастающими требованиями к эффективности и устойчивости производственных процессов. В условиях высокой конкуренции и роста затрат на энергоресурсы и эксплуатацию техники особую значимость приобретает оптимизация процессов переработки песков – одного из ключевых этапов технологической цепочки россыпной золотодобычи, непосредственно влияющего на технико-экономические показатели отработки месторождений [1–5].

Россыпные месторождения имеют ряд особенностей, таких как низкое содержание и неравномерное распределение полезного компонента, высокая степень неоднородности гранулометрического и минерального состава, сезонный характер их отработки и применение циклических технологий, нестабильность водоснабжения, климатических условий и др. Эти факторы затрудняют обеспечение равномерной подачи сырья, поддержание оптимальных режимов обогащения и стабильное качество получаемых полезных ископаемых и концентратов. В результате возникают частые отклонения от проектных параметров, увеличивается расход электроэнергии и технологической воды, повышается износ оборудования и снижается эффективность обогащения [1, 6–8].

Традиционные подходы к управлению технологическим процессом, основанные на ручной корректировке параметров и визуальном контроле, оказываются недостаточными в условиях постоянно меняющихся параметров перерабатываемых песков. Современное развитие технологий автоматизации и цифрового мониторинга позволяет внедрять адаптивные системы, способные самостоятельно приспосабливаться к текущим условиям отработки месторождения, предсказывать отклонения и автономно управлять процессами в режиме реального времени. Однако для успешного внедрения таких систем в условиях отработки россыпного месторождения необходимо учитывать специфику самих процессов, характер движения пульпы, колебания плотности, расхода и состава сырья. Это требует научного обоснования параметров системы

автоматизированного регулирования расхода технологической воды и режимов работы оборудования с учётом конкретных горно-геологических и технологических условий эксплуатации промывочного комплекса [9–14].

Для россыпных объектов, использующих дизельные электростанции, разработка средств автоматизации технологических процессов имеет важное значение, поскольку позволяет уменьшить энергопотребление и эксплуатационные затраты на переработку золотосодержащих песков. В связи с этим обоснование параметров автоматизированного регулирования расхода технологической воды по текущей загрузке промывочного комплекса является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности процесса промывки золотосодержащих песков при разработке россыпных месторождений золота на основе автоматизированного регулирования расхода технологической воды с учётом текущей загрузки промывочного комплекса.

Идея диссертационной работы заключается в определении текущей производительности промывочного комплекса по току нагрузки привода скруббер-бутары и последующем автоматизированном регулировании расхода технологической воды в зависимости от установленной производительности.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать технологические факторы, определяющие эффективность промывки золотосодержащих песков при неравномерной подаче исходного материала;
2. Установить зависимости между производительностью по пескам, расходом технологической воды и показателями эффективности процесса промывки, необходимыми для формирования алгоритма автоматизированного регулирования;
3. Разработать алгоритм автоматизированного регулирования расхода технологической воды с учётом текущей загрузки промывочного комплекса;
4. Провести опытно-промышленную апробацию разработанных технических решений в производственных условиях;

5. Оценить влияние автоматизированного регулирования на устойчивость и эффективность режима промывки, энергозатраты и производительность промывочного комплекса.

Объект исследования – технологический процесс промывки золотосодержащих песков на промывочном комплексе при эксплуатации россыпных месторождений золота.

Предмет исследования – закономерности изменения параметров режима промывки золотосодержащих песков при неравномерной подаче материала, а также принципы автоматизированного регулирования расхода технологической воды, обеспечивающие повышение эффективности работы промывочного комплекса.

Методы исследований. Использован комплекс методов, включающий анализ и обобщение научно-технических источников, натурные наблюдения и опытно-промышленные испытания на действующем промывочном комплексе, статистическую обработку экспериментальных данных, установление зависимостей между параметрами загрузки оборудования, производительностью по пескам и расходом технологической воды, разработку алгоритма автоматизированного регулирования, а также технико-экономическую оценку эффективности предложенных решений.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Использование значений токовых нагрузок электропривода скруббер-бутары является основой алгоритма расчета производительности прибора по пескам в системе автоматического регулирования расхода технологической воды.

2. Автоматизированное регулирование расхода технологической воды с учётом загрузки скруббер-бутары песками обеспечивает снижение колебаний соотношения Т:Ж при изменении фактической производительности, что приводит к снижению потребления технологической воды и увеличению извлечения мелкого и тонкого золота при сохранении требуемой производительности по пескам.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость между электрическими параметрами электроприводов промывочного оборудования и текущей производительностью промывочного комплекса по пескам, что позволяет использовать указанные параметры для оперативной оценки загрузки промывочного комплекса.

2. Обоснован принцип автоматизированного регулирования расхода технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного комплекса, обеспечивающий поддержание оптимального режима обогащения на шлюзах при неравномерной подаче песков.

3. Установлено снижение потребляемой мощности насосного оборудования при автоматизированном регулировании расхода технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного комплекса при сохранении требуемой производительности по пескам.

4. Обоснованы параметры частотного регулирования насосной установки в диапазоне 35–50 Гц, обеспечивающие изменение расхода технологической воды в соответствии с текущей загрузкой промывочного комплекса.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются применением комплекса методов научного исследования, работоспособность алгоритмов работы электрооборудования и внедренных технических решений подтверждена результатами опытно-промышленной эксплуатации оборудования в реальных условиях действующего горнодобывающего предприятия.

Практическая ценность работы заключается в разработке и практическом применении предлагаемых технических решений и алгоритмов работы автоматизированного управления насосными установками промывочного комплекса при отработке россыпных месторождений золота Хабаровского края, обеспечивающих значительное снижение эксплуатационных затрат и устойчивость работы обогатительного оборудования, в том числе при автономном энергоснабжении от дизельных электростанций.

Личный вклад автора заключается в:

- постановке цели и задач исследования, выборе объекта исследования и разработке программы экспериментальных работ на промывочном комплексе, эксплуатируемом на действующем горнодобывающем предприятии;
- организации и проведении натурных исследований технологических и энергетических параметров, инструментальной регистрации сигналов системы управления, формировании и статистической обработке массива полученных исходных данных;
- разработке методики расчёта расхода технологической воды на основе выходной частоты преобразователя частоты насосной установки, обработке полученных экспериментальных данных и построении регрессионных моделей, описывающих зависимости параметров процесса промывки;
- разработке алгоритмов адаптивного регулирования расхода технологической воды по индикатору загрузки минеральной массы в промывочный прибор, а также структуры автоматизированной системы управления;
- участии в реализации и внедрении автоматизированной системы управления на разрабатываемом россыпном месторождении золота, проведении её опытно-промышленной апробации, анализе результатов внедрения и выполнении технико-экономической оценки эффективности разработанной системы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, конкурсах молодых ученых и научных школах, в том числе: XXV Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 2023 г.); XVI Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2023 г.); XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2023 г.); IX Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2023 г.); XVIII Всероссийской молодежной

научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2024 г.); XXVI Краевом конкурсе молодых ученых (г. Хабаровск, 2024 г.); Российско-Китайской научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Харбин, Китай, 2025 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 5 опубликованных работах, в том числе в 2 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы опубликованы в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus, 1 работа в материалах научной конференции.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, к.т.н. Серому Р.С. за научное руководство, постоянную поддержку и ценные рекомендации на всех этапах выполнения диссертационной работы, к.т.н. Алексееву В.С. за консультации по отдельным вопросам исследования и конструктивные замечания при выполнении работы. Автор считает своим долгом выразить благодарность чл.-корр. РАН Шулюпину А.Н. за внимание к работе, ценные рекомендации и помощь в её реализации, коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь, поддержку и ценные советы при выполнении исследований, а также руководству и специалистам артели старателей «Восток» за содействие в организации и проведении опытно-промышленных исследований, предоставление производственной информации и внедрение результатов диссертационной работы в производственный процесс.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (120 источников), приложения (1), 15 иллюстраций, 15 таблиц. Общий объем – 108 страниц.

В первой главе рассмотрены особенности переработки золотосодержащих песков в условиях неравномерной подачи и изменчивости свойств минеральной массы; обоснована необходимость регулирования расхода технологической воды как важного фактора, обеспечивающего стабильность режима промывки песков и повышение энергоэффективности технологического оборудования; сформулированы требования к системе автоматизированного регулирования технологических процессов и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описана методика экспериментальных исследований процесса подачи песков и регулирования расхода технологической воды, выполнена обработка полученных эмпирических данных и установлены количественные зависимости между текущей загрузкой промывочного комплекса, производительностью по пескам и расходом технологической воды.

В третьей главе представлена разработка и опыт внедрения автоматизированной системы управления процессом регулирования расхода технологической воды на промывочном приборе ПБШ-100, приведены состав и структура технических средств автоматизации, алгоритм функционирования системы, а также результаты её опытно-промышленной эксплуатации.

В четвертой главе приведены результаты технико-экономической оценки применения автоматизированной системы управления, выполнены анализ эксплуатационных затрат и расчёт показателей экономической эффективности предложенных технических решений.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОДОБЫЧИ

1.1 Горно-геологические особенности россыпных месторождений золота, влияющие на процессы промывки

Золотодобывающая промышленность представляет собой важнейший сектор горной индустрии, основанный на комплексном изучении и освоении месторождений полезных ископаемых. В процессе подготовки к эксплуатации месторождений горнодобывающими предприятиями проводятся необходимые геологические исследования и осуществляется анализ состава пород, что впоследствии позволяет эффективно разрабатывать только те месторождения, которые признаны экономически выгодными для промышленного освоения [1, 7, 15–17].

Отработка россыпных месторождений осуществляется открытым, подводным и подземным способами. При открытой разработке применяются бульдозерно-скреперные, экскаваторные и гидравлические технологические схемы, а при подводной разработке применяются дражные комплексы. Выбор способа и схемы отработки определяется условиями залегания россыпи, горно-геологическими и гидрогеологическими особенностями участка, масштабом запасов, сезонностью работ и степенью разведанности месторождения [1, 4, 17–20]. Специфика разработки россыпей не позволяет в полной мере переносить на них проектные решения, характерные для рудных объектов, что обуславливает необходимость учёта местных условий и адаптации технологических режимов. Современное совершенствование технологий отработки россыпей связано с повышением полноты извлечения мелких классов золота, снижением удельных энергозатрат и сокращением потерь технологической воды, что делает актуальным внедрение автоматизированного регулирования подачи песков и расхода технологической воды на промывочном комплексе [3, 13, 21–24].

В отличие от большинства зарубежных стран, в России россыпные месторождения по-прежнему играют существенную роль в структуре золотодобычи. По данным Союза золотопромышленников РФ, в 2022 году в стране было добыто 87 т россыпного золота. В целом добыча россыпного золота превышает 70 т в год, и по этому показателю Россия в течение многих лет занимает первое место в мире [20, 25–30]. По данным за 2021 год, из общероссийского объёма добычи золота россыпное золото составляло 26 % (82,4 т). Основная часть россыпной добычи приходилась на Магаданскую область (25 %), Якутию (21 %), Иркутскую область (13,7 %), Красноярский край (10,9 %) и Амурскую область (10 %) [25, 26, 30]. В Магаданской области, Якутии, Красноярском крае и Амурской области добычей россыпного золота было занято около 270 предприятий, из которых порядка 100 размещались в Магаданской области. Это накладывает отпечаток на общие сравнительные показатели добычи по регионам, так как если добыча рудного золота происходит круглогодично, то россыпное добывается лишь в течение 6–8-месячного промывочного сезона, причем отработка осуществляется преимущественно небольшими компаниями с объемами добычи от менее 1 кг до 100 кг [25, 26].

Несмотря на снижение доли россыпей в структуре золотодобычи (с 70–75 % в конце XX века до 24–26 % в настоящее время), их разработка по-прежнему актуальна. Это связано не только с природными особенностями месторождений, но и с ростом интереса к повторному освоению техногенных объектов. Проблема повышения эффективности освоения россыпных месторождений особое значение приобретает для регионов Дальнего Востока, где золотодобыча играет ключевую роль в экономике и зачастую является единственным источником занятости населения [31–39].

По характеру образования россыпные месторождения разделяются на следующие типы: элювиальные, делювиальные, аллювиальные, прибрежно-морские, прибрежно-озерные, ледниковые и эоловые (таблица 1.1) [6–8, 16].

Характеристика выделяемых генетических разновидностей россыпей приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Генетические типы и характеристика россыпей

Генетические типы	Характерные особенности и условия образования
Элювиальные	Близость к материнским породам, местам разрушения коренных пород. Преобладание несортированного материала их обломков коренных пород.
Делювиальные	Продолжение группы аллювиальных россыпей. Образуются при движении выветренного материала коренных пород под влиянием силы тяжести при смыве дождевыми и снеговыми водами.
Аллювиальные (руслловые и долинные)	Приурочены к руслам рек, речным долинам и логам и образованы в процессе переноса водой выветренного обломочного материала на значительное расстояние от своего первоисточника.
Прибрежно-морские	Образуются в прибрежной полосе морей и крупных озер под действием волн прибоя, прилива и отлива, морских береговых течений в результате отложения выветренного материала, приносимого реками, или разрушения коренных пород на берегу озер или морей.
Ледниковые	Образуются в горных районах путем переноса и накопления обломочного материала сползающими с гор ледниками.
Эоловые	Образуются в результате деятельности ветра при переносе мельчайших фракций полезного ископаемого.

Различие условий формирования россыпей определяет изменчивость свойств перерабатываемых песков, что требует необходимость адаптации режимов промывки.

Наибольшее значение для минерально-сырьевой базы имеет аллювиальный тип россыпей, на долю которого приходится 80 % запасов и добычи золота [6–8].

Золотодобывающая отрасль России, несмотря на сохраняющееся значение в структуре минерально-сырьевого комплекса, характеризуется снижением роли россыпного сектора. Если в 2022 году доля россыпей в общем производстве драгоценного металла составляла 20,7 %, то в 2023 году она снизилась до 16,3 %, а в 2024 году – до 16,0 %. Физические объёмы россыпной добычи в 2024 году по сравнению с 2021 годом также сократились более чем на 15 %. Среди основных причин сложившейся ситуации следует выделить увеличение добычи рудного золота, кадровые проблемы и истощение минерально-сырьевой базы россыпной золотодобычи [27–30, 40].

В научной и производственной литературе закрепилось понятие «техногенные россыпи». Впервые как самостоятельный промышленный тип россыпных месторождений они были выделены академиком Н.А. Шиловым [6].

Техногенные россыпи, согласно существующим классификациям, подразделяются на две группы: остаточные целиковые и новообразованные отвальные [32, 34–39].

Техногенные россыпи (как новый дополнительный тип) образованы вследствие несовершенства применяемых технологий добычи и обогащения золотоносных песков [32, 34–39]. В XX столетии проявляется четкая тенденция роста добычи золота из техногенных месторождений, представленных отвалами, целиками и недоработками прошлых лет. Особенностью техногенных россыпей является высокое содержание труднообогатимых мелких классов золота, что затрудняет их дальнейшее промышленное освоения.

Необходимость вовлекать в отработку месторождения со сложными горно-геологическими условиями, включая техногенные россыпи, все больше сталкивает недропользователей с проблемой эффективной переработки песков с постоянно меняющимися параметрами, такими как глинистость, валунистость, колебание содержаний ценного компонента и его ситовых характеристик и др. [22, 24, 33].

Для всех генетических типов в строении россыпей общим является наличие следующих элементов [6–8, 16]:

1. Продуктивный пласт (пески), представляющий собой слой рыхлых отложений, в котором содержание полезного компонента является промышленным или близким к нему;
2. Отложения, перекрывающие продуктивный пласт (торфа), не содержащих полезных компонентов или содержащих их в непромышленных концентрациях;
3. Плотик – поверхность коренных пород, подстилающих продуктивный пласт.

Технологические процессы эксплуатации россыпных месторождений характеризуются высокой изменчивостью свойств добываемого минерального сырья и условий промывки золотосодержащих песков, обусловленной неоднородностью гранулометрического состава, изменением содержания глинистых частиц, влажности и других характеристик исходного материала. Эти факторы приводят к нарушению режима промывки песков, увеличению расхода технологической воды и росту потерь драгоценного металла [6, 22, 32].

В условиях традиционного управления промывочным комплексом параметры его работы, как правило, корректируются вручную или с использованием простых механических устройств. Такой подход не обеспечивает необходимой оперативности реагирования на изменения свойств промываемых песков и не позволяет поддерживать требуемые технологические режимы. Практика разработки россыпных месторождений показывает, что нестабильность подачи на промывку песков и расхода технологической воды является одной из главных причин снижения эффективности промывки и увеличения потерь добываемого золота [2, 3, 13, 21–24].

С развитием технических средств контроля и управления технологическим процессом промывки стали возможны автоматизированные системы, обеспечивающие стабилизацию параметров процесса промывки золотосодержащих песков в режиме реального времени. Автоматизация позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, адаптировать режимы промывки песков в зависимости от свойств перерабатываемой минеральной массы, снижать энергоёмкость процесса промывки и повышать степень извлечения золота [9–12].

Следовательно, изменчивость свойств золотосодержащих песков и недостаточная адаптивность традиционных способов регулирования подачи песков и технологической воды определяют необходимость разработки автоматизированной системы управления процессом промывки.

1.2 Характеристики золотосодержащих песков россыпных месторождений и их влияние на технологический процесс промывки

Россыпные месторождения золота представляют собой рыхлые или частично сцементированные обломочные отложения, сформированные в результате разрушения коренных пород и последующего переноса обломочного материала водными и гравитационными потоками. Особенности происхождения россыпей определяют высокую изменчивость их вещественного состава, гранулометрических характеристик. Данные факторы определяют горно-

геологические схемы разработки россыпных месторождений, влияют на эффективность гравитационных схем обогащения и формируют требования к автоматизированным системам управления процессом промывки песков [2, 7, 41–43].

Минералогический состав песков зависит от литологии коренных пород. В районах с преобладанием гранитоидов и метаморфических комплексов россыпные пески содержат повышенные концентрации кварца, полевых шпатов и слюды. В регионах с развитой корой выветривания значительная часть мелких фракций приходится на тонкодисперсные глинистые минералы [6, 7, 16, 42–44]. Исследования аллювиальных отложений Сибири показывают, что мелкие фракции ($<0,15$ мм), содержащие каолинит, гидрослюды и тяжелые минералы, составляют до 1 % массы песков, однако именно в них концентрируется значительная доля тонкого золота.

Для россыпей Приморья и юга Хабаровского края характерны повышенная глинистость и значительное содержание мелкого золота ($<0,1$ мм), тогда как россыпей Якутии и Магаданской области характерны хорошая промывистость песков и преобладание более крупного золота [22, 33, 41, 45–47]. Высокоглинистые пески обладают низкой водопроницаемостью и склонностью к образованию плотных глинистых сгустков, которые затрудняют размыв и нарушают процессы дезинтеграции и классификации. Отечественные исследования показывают, что в высокоглинистых песках россыпей Якутии значительная часть тонкого золота связана с глинистыми частицами, вследствие чего при промывке тонкое золото остаётся связанным с глинистыми частицами и теряется в хвостах при применении традиционных гравитационных методов обогащения [22, 24, 45, 46, 48–50].

На эффективность технологического процесса промывки существенное влияние оказывают горно-геологические характеристики золотосодержащих песков, определяющие условия формирования пульпы, гидродинамический режим на шлюзах и требования к автоматизированной системе управления. Основные характеристики песков и их влияние на процесс промывки представлены в таблице 1.2 [3, 13, 14, 21–24, 45, 51].

Таблица 1.2 – Влияние характеристик золотосодержащих песков на процесс промывки и требования к автоматизированной системе управления

Характеристика песков	Особенности проявление	Влияние на технологический режим	Последствия	Требования к системе управления
Глинистость	Высокая доля глинистых частиц <0,1 мм	Изменение условий формирования пульпы и распределения потока по шлюзам	Снижение эффективности извлечения тонких классов золота;	регулирование расхода воды; контроль перегрузок; сигнализация отклонений.
Содержание тонкого золота	Частицы золота <0,1 мм	Повышенная вероятность уноса тонких классов при отклонениях режима и неравномерном распределении потока	Рост потерь тонкого золота в хвостах	Поддержание заданного режима промывки по измеряемым параметрам;
Минералогические различия	Изменение состава песков по разным промывочным участкам	Изменение параметров формирования пульпы и условий разделения на шлюзах	Колебания технологического режима; снижение извлечения золота	Регулирование расхода технологической воды; контроль параметров режима, регистрируемых системой управления;
Гранулометрическая неоднородность	Смещение соотношения крупной и мелкой фракции песков	Изменение условий формирования пульпы и распределения потока по шлюзам	Рост расхода технологической воды, ухудшение условий разделения на шлюзах	Регулирование расхода технологической воды по текущей загрузке; контроль перегрузок и аварийных состояний;
Различия свойств песков по участкам месторождения	Колебания содержания золота и физико-механических свойств	Изменение нагрузки на оборудование и параметров режима промывки	Потери металла, снижение качества промывки	Мониторинг технологических параметров и корректировка параметров управления в пределах допустимых режимов

Изменчивость характеристик золотосодержащих песков непосредственно влияет на параметры процесса промывки и определяет необходимость непрерывной корректировки расхода технологической воды, что невозможно обеспечить традиционными методами ручного регулирования.

На основе приведённых характеристик можно отметить, что глинистость, дисперсность, минералогический состав и гранулометрический состав золотосодержащих песков существенно влияют на режим промывки песков. Эти свойства определяют необходимость применения адаптивных систем автоматического регулирования процесса промывки песков [3, 13, 14, 22, 24, 45].

Смешение крупной и мелкой фракций приводит к изменению условий движения пульпы и характера распределения материала по шлюзам, что сопровождается изменением режима промывки и увеличением расхода технологической воды. Повышенная доля лёгких и тонких классов ухудшает условия осаждения и удержания тяжёлой фракции на шлюзах, вследствие чего снижается эффективность извлечения золота. Тонкое золото обладает повышенной подвижностью в потоке и при отсутствии автоматического контроля параметров промывки легко уносится в хвосты [5, 13, 23, 42, 51–54].

Состав золотосодержащих песков изменяется как по отдельным участкам месторождения, так и в процессе его отработки, что затрудняет поддержание стабильных режимов промывки. Даже в пределах одного месторождения содержание золота может различаться в несколько раз при близких значениях плотности и влажности песков. Согласно данным, приведённым в работе [6, 7, 41, 43, 46, 47], при исследовании структурно сложных россыпей установлено, что колебания содержания золота в пределах одного добычного блока достигают от 0,2 до 0,5 г/м³, что повышает требования к устойчивости технологического режима и увеличивает вероятность отклонения таких параметров, как производительность по пескам, расход технологической воды и содержание твёрдой фазы в пульпе.

Глинистые и тонкие фракции, различия в грансоставе и нестабильность свойств песков на разных участках месторождения делают процесс промывки крайне чувствительным к любым изменениям параметров сырья. При увеличении

содержания мелких частиц возрастает вязкость пульпы, снижается эффективность дезинтеграции, повышается вероятность образования застойных зон и нарушается равномерность распределения потока. В условиях ручного или полуавтоматического управления такие изменения приводят к перерасходу воды, росту энергозатрат и значительным потерям тонкого золота [22, 24, 45, 48–50, 55, 56].

Необходимость автоматизации управления процессом промывки золотосодержащих песков обусловлена тем, что традиционные методы регулирования не обеспечивают своевременного учета изменчивости свойств песков и эффективной корректировки параметров процесса. Для поддержания стабильных гидродинамических условий требуется динамическое управление расходом воды и подачей песков, непрерывный контроль плотности пульпы, автоматическая корректировка соотношения твёрдой и жидкой фаз (Т:Ж) и адаптивное регулирование мощности насосного оборудования. Исследования россыпей показывают, что внедрение автоматизированных систем управления позволяет повысить извлечение золота на 10–15 % и снизить расход воды на 12–18 % за счет стабилизации гидродинамического режима [3, 9–14].

Таким образом, особенности состава и свойств россыпных песков являются основным фактором, определяющим необходимость автоматизации процесса промывки. Высокая изменчивость свойств сырья делает ручное регулирование недостаточным и требует внедрения систем адаптивного регулирования, обеспечивающих изменение параметров процесса в соответствии с текущими условиями работы промывочного комплекса.

1.3 Анализ традиционных методов управления процессом промывки золотосодержащих песков

Гидроэлеваторные приборы типа ПГШ-50 являлись одним из распространённых видов промывочного оборудования, применявшегося при разработке россыпных месторождений золота, прежде всего в условиях

обводнённых песков и сравнительно невысокого содержания глинистой фракции. Их применение было обусловлено конструктивной простотой, сравнительно высокой мобильностью, небольшим числом механизмов и возможностью оперативного монтажа и демонтажа в полевых условиях [1, 2, 4, 18, 19, 57].

Вместе с тем длительная эксплуатация приборов ПГШ-50 выявила ряд существенных ограничений. К их числу относятся снижение эффективности переработки при повышенной глинистости и неоднородности гранулометрического состава песков, рост потерь мелких и тонких классов золота, а также ограниченные возможности оперативного регулирования технологического режима. Отсутствие развитых средств автоматизации не позволяет в реальном времени согласовывать расход технологической воды с текущей загрузкой прибора, что приводит к нарушению оптимального соотношения твёрдой и жидкой фаз в пульпе, перерасходу ресурсов и ухудшению условий гравитационного разделения [3, 13, 14, 21–23, 52, 53].

В связи с этим модернизация промывочного оборудования должна рассматриваться не как прямая замена одного конструктивного типа другим, а как переход к более совершенным промывочным комплексам, обеспечивающим повышение управляемости процесса, снижение эксплуатационных издержек и улучшение технологических показателей переработки песков. В современных условиях наибольший интерес представляют промывочные приборы с развитой системой дезинтеграции и классификации материала, а также с возможностью автоматизированного регулирования подачи технологической воды [2, 5, 13, 42, 54, 58].

В практике разработки россыпных месторождений золота применяются различные типы промывочного оборудования, включая гидроэлеваторные, шлюзовые и бочечно-шлюзовые. Выбор конструктивного исполнения определяется гранулометрическим составом песков, степенью их обводнённости и глинистости, требуемой производительностью, а также условиями размещения и эксплуатации оборудования [1, 2, 4, 18, 19, 57, 59].

Промывочные приборы бочечно-шлюзового типа получили распространение благодаря сочетанию интенсивной дезинтеграции исходного материала, эффективной классификации и сравнительно устойчивой работе при переработке песков сложного состава. Однако и для них при отсутствии автоматизированного регулирования расхода технологической воды сохраняются колебания режима промывки, что отрицательно влияет на устойчивость процесса и показатели извлечения мелких классов золота [3, 5, 13, 23, 42, 52, 54].

Традиционные методы управления процессом промывки песков, основанные на ручной корректировке расхода воды и нерегулируемой подаче материала. Такие подходы характеризуются низкой адаптивностью и не позволяют оперативно реагировать на изменчивость свойств перерабатываемого сырья. Это приводит к нарушению стабильности технологических режимов, перерасходу ресурсов и увеличению потерь драгоценного металла [3, 14, 22, 24, 51, 52].

Одной из ключевых проблем традиционных систем является неравномерность подачи песков, возникающая вследствие различных факторов, в том числе и гранулометрического состава. Даже незначительное увеличение глинистости (3–5 %) приводит к росту вязкости пульпы, ухудшению процессов дезинтеграции и повышению вероятности сноса тонкого золота в хвосты [13, 14, 22, 24, 45, 48, 51, 52, 56]. Нерегулярность подачи материала вызывает колебания гидродинамических параметров, что отрицательно сказывается на устойчивости процесса гравитационного разделения на шлюзах и снижает эффективность извлечения мелких классов золота.

Другой существенной проблемой является отсутствие непрерывной обратной связи. При ручном управлении оператор оценивает состояние пульпы визуально и корректирует параметры с задержкой. При изменении плотности, крупности или влажности песков такие задержки приводят к нарушению оптимального соотношения твёрдой и жидкой фаз (Т:Ж), перерасходу воды и снижению эффективности удержания тяжёлой фракции. Зарубежные исследования показывают, что мелкие частицы золота ($<0,1$ мм) обладают высокой

подвижностью в нестабильных потоках и легко переходят в суспензию, уносясь в хвосты при отсутствии адаптивного регулирования [5, 13, 14, 23, 52, 53].

В исследованиях по анализу технологий добычи аллювиального золота отмечается, что ручные методы управления не способны поддерживать стабильные параметры потока при переработке неоднородных россыпей [5, 52, 53, 58, 60, 61].

Основные причины потерь золота при работе шлюзовых систем связаны с технологическими ограничениями и недостаточным контролем режимов обогащения. Неравномерное распределение потока материала и воды по ширине и длине шлюза приводит к тому, что часть тяжёлой фракции не успевает осесть на рифлях и уносится с хвостами. Отсутствие точной регулировки расхода воды, подачи пульпы, уклона и скорости потока вызывает нестабильность гидродинамических условий, при которой нарушаются оптимальные режимы осаждения золота. Исследования показывают, что гидродинамические колебания непосредственно увеличивают потери: высокие пульсации приводят к выносу тяжёлой фракции, тогда как чрезмерное снижение скорости вызывает заиливание и заэфеливание рабочей поверхности и ухудшение качества разделения [5, 13, 14, 21–23, 52, 53, 61, 62].

При отсутствии системы автоматического поддержания стабильного режима подачи пульпы возрастает вероятность как потерь золота при перепадах расхода, так и снижения производительности при неоптимальных режимах работы.

Кроме снижения извлечения металла, ручное управление имеет и другие недостатки. Человеческий фактор вызывает неритмичность операций, задержки в реагировании на отклонения и повышенную вероятность ошибок персонала, особенно в условиях непрерывной эксплуатации на удалённых и труднодоступных участках. Автоматизация позволяет обеспечить постоянный контроль и управление, устраняя влияние усталости и субъективных факторов. Автоматизированные устройства способны работать без выходных и длительных остановок, повышая общую производительность и безопасность работ [9–12, 63, 64].

Ещё одной значимой проблемой является высокая энергоёмкость процесса промывки. На большинстве промывочных приборов подача технологической воды устанавливается фиксировано и не корректируется в зависимости от свойств поступающего материала. Это приводит к перерасходу воды до 30–40 % и увеличению нагрузки на насосное оборудование. Для промприборов типа ПГШ и ПЗШ доля энергозатрат, приходящаяся на подачу воды, достигает 60–80 %, что существенно увеличивает эксплуатационные расходы [3, 14, 19, 22, 52].

Отсутствие адаптивного управления также приводит к повышенным потерям тонкого золота. Исследования показывают, что при нарушении соотношения Т:Ж потери золота могут увеличиваться в 1,5–2 раза, особенно при переработке высокодисперсных и глинистых песков [3, 13, 14, 23, 24, 45, 51–54, 65, 66]. Это связано с тем, что мелкие частицы обладают высокой подвижностью и легко уносятся в хвосты при неустойчивом гидродинамическом режиме.

Основные недостатки традиционных методов управления технологическими процессами включают:

- отсутствие адаптивности и задержку реакции на изменение свойств песков;
- цикличность подачи материала;
- невозможность поддержания оптимального Т:Ж;
- высокий перерасход воды и энергоёмкость процесса;
- значительные потери золота, особенно мелкого и тонкого;
- влияние человеческого фактора.

Перечисленные проблемы подтверждают, что традиционные методы регулирования не соответствуют современным требованиям к устойчивости и эффективности процесса гравитационного обогащения россыпных песков. В условиях высокой изменчивости их свойств такие системы оказываются неспособными обеспечить стабильность гидродинамических режимов, минимизацию потерь металла и экономную работу технологического оборудования.

Эти ограничения носят системный характер и не могут быть устранены исключительно совершенствованием конструкции промывочного оборудования. Необходим переход к автоматизированным системам управления, обеспечивающим непрерывный мониторинг параметров пульпы, адаптивную регулировку подачи песков и воды, а также поддержание оптимальных режимов обогащения в реальном времени. Совокупность выявленных факторов формирует объективную необходимость внедрения автоматизированных комплексов регулирования, ориентированных на стабилизацию технологического процесса при изменчивости свойств перерабатываемых россыпных песков.

Системы адаптивного и предиктивного управления (Advanced Process Control) успешно применяются на фабриках для стабилизации параметров измельчения, классификации и гравитационного разделения [9–12]. Как отмечается в исследованиях по процессному контролю, автоматизация позволяет минимизировать влияние стохастических факторов, связанных с изменением состава руды, и обеспечивает более высокую стабильность технологического процесса. Применение датчиков плотности и расхода позволяет поддерживать постоянный режим пульпы даже при резких изменениях свойств материала, что существенно повышает извлечение золота.

Исследования в области автоматизации золотодобывающих предприятий подтверждают, что применение систем мониторинга и регулирования параметров пульпы (скорости, плотности, расхода твёрдой фазы и воды) обеспечивает устойчивость процессов разделения и позволяет существенно снизить потери металла. На современных предприятиях используются SCADA-платформы, DCS-архитектуры, PLC-контроллеры, интеллектуальные датчики и модули адаптивного регулирования [9–12, 64].

Исследования в области автоматизации процессов гравитационного обогащения подтверждают, что автоматизация управления снижает амплитуду гидродинамических колебаний, улучшает распределение потоков в шлюзовых системах и обеспечивает более устойчивые условия разделения материала. Это особенно важно для эффективного извлечения частиц тонкого золота,

чувствительных к малейшим отклонениям гидравлического режима [5, 13, 23, 52, 53].

Следовательно, внедрение автоматизированных систем регулирования расхода технологической воды следует рассматривать как одно из ключевых направлений повышения энергоэффективности промывочного комплекса.

Для россыпных месторождений золота автоматизация технологических процессов представляет собой перспективное направление повышения эффективности промывки песков, устойчивости режимов работы оборудования и снижения энергозатрат. В то же время уровень автоматизации промывочных комплексов в данной области остаётся недостаточным, что определяет актуальность разработки специализированных систем управления [3, 9–12].

На обогатительных фабриках по извлечению ценных металлов (включая золото) автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) давно стали обязательным атрибутом производства. При проектировании новых объектов системы комплексной автоматизации закладываются с самых ранних этапов, а функционирующие предприятия постепенно переходят на автоматизированные способы ведения процессов [9–12, 67].

Такая тенденция отражает общие современные вызовы горнодобывающей индустрии. Усложнение условий добычи, повышение требований к экологической и промышленной безопасности, ужесточение регулятивного контроля требуют от отрасли новых подходов, реализуемых с помощью цифровых технологий [10, 12, 63, 68].

Крупнейшие компании золотодобычи, такие как ПАО «Полюс», «Полиметалл» и другие, уже внедрили высокий уровень автоматизации и цифровизации, что стало одной из отличительных черт отрасли. Автоматизация позволяет также соответствовать стандартам безопасности и принципам устойчивого развития (ESG), снижая экологические риски и повышая социальную ответственность производства [10, 12, 63, 68].

Вместе с тем уровень автоматизации промывочных комплексов, применяемых при переработке россыпных золотосодержащих песков, остаётся

недостаточным, что обуславливает необходимость разработки специализированных систем управления, учитывающих изменчивость свойств исходного материала и особенности конкретных горно-геологических условий. Необходимость автоматизации процессов подачи песков и технологической воды при промывке золота обусловлена конкретными техническими проблемами традиционных методов [9–12, 64].

1.4 Обоснование необходимости разработки системы автоматизации процесса подачи песков на перерабатывающий комплекс

Технологический процесс промывки россыпных песков на промывочном комплексе характеризуется тем, что его параметры постоянно меняются вследствие изменчивости гранулометрического состава, глинистости, влажности и неравномерностью подачи исходного материала. Указанные факторы приводят к колебаниям режима формирования пульпы и, как следствие, к отклонениям гидродинамических условий на шлюзах, ухудшению извлечения тонких классов золота и росту удельных энергозатрат на транспортирование и подачу технологической воды. В этих условиях управление технологическим режимом следует реализовывать на основе автоматического регулирования [3, 13, 14, 22, 24, 45, 51, 52].

Анализ традиционных методов управления показал, что ручная корректировка расхода воды и подачи песков не обеспечивает необходимой точности и скорости реагирования при изменении характеристик сырья. При отсутствии автоматизированного регулирования технологические режимы остаются неустойчивыми, что приводит к перерасходу воды, снижению эффективности дезинтеграции и ухудшению условий гравитационного разделения. Совокупность этих факторов определяет объективную необходимость внедрения автоматизированных систем управления (АСУ), ориентированных на адаптацию технологического процесса к изменчивости перерабатываемых песков [3, 13, 14, 22, 24, 52].

Неравномерность подачи материала и изменчивость его свойств приводят к нарушению оптимального соотношения Т:Ж, изменению консистенции пульпы и гидравлических параметров потока. По данным исследований, потери тонкого золота при традиционной промывке могут достигать 15–30 %, что обусловлено неравномерным распределением потоков по ширине шлюзов, пульсацией скорости и колебаниями глубины потока, что приводит к уносу тяжёлой фракции, нарушению захвата золота и его сносу с шлюзов [13, 14, 21–23, 52, 53].

Автоматизация является не просто технологической модернизацией, а необходимым инструментом для обеспечения устойчивости гравитационного процесса при переменных характеристиках сырья.

Ключевые подходы к автоматизации процессов промывки россыпных песков включают следующие направления:

1. Внедрение систем мониторинга технологических параметров в реальном времени, включающих контроль плотности пульпы, расхода воды, объема подачи песков, уровня загрузки и вибрационных характеристик. Эти системы обеспечивают непрерывный сбор данных и позволяют системе управления реагировать на отклонения раньше, чем это возможно при визуальном контроле [9–12].

2. Использование частотно-регулируемых приводов (ЧРП), позволяющих динамически регулировать производительность насосов, оптимизировать расход воды, поддерживать стабильное соотношение Т:Ж и снижать энергоёмкость процесса [3, 9, 12, 69].

3. Применение программируемых логических контроллеров (PLC), выполняющих обработку данных от датчиков, реализацию алгоритмов управления, стабилизацию параметров подачи пульпы и воды, а также защиту оборудования от перегрузок [9, 10, 12, 64].

4. Внедрение SCADA-систем, обеспечивающих визуализацию параметров процесса, регистрацию и хранение данных, удалённое управление оборудованием и анализ трендов для оптимизации работы комплекса [9–12, 67].

5. Использование адаптивных алгоритмов управления, позволяющих корректировать режимы промывки при изменении гранулометрического состава, колебаниях глинистости, изменении содержания золота и пульсациях подачи песков. Это является ключевым механизмом, компенсирующим изменчивость свойств песков [10, 12].

6. Применение адаптивных систем оптимизации подачи воды. Исследования показывают, что автоматическая коррекция расхода воды в зависимости от загрузки прибора позволяет улучшить дезинтеграцию материала, снизить потери металла, сократить общий расход воды на 10–30 % и стабилизировать гидродинамику потока [3, 12–14, 24].

7. Создание комплексных АСУ ТП промывочных комплексов, объединяющих контроль технологических параметров, автоматическое регулирование подачи, диагностику оборудования и оптимизацию режимов по критериям энергоэффективности и извлечения золота. Такие системы обеспечивают интегрированное управление всеми узлами комплекса от подачи песков до разделения концентрата [9–12, 67].

Необходимость автоматизации процессов промывки россыпных песков обусловлена высокой изменчивостью свойств сырья, нестабильностью традиционных методов управления и значительными потерями мелкого золота. Современные подходы автоматизации, подтверждённые международной практикой и отечественными исследованиями, обеспечивают повышение стабильности технологического процесса, снижение издержек и рост извлечения золота. Внедрение SCADA-систем, PLC-контроллеров, частотных приводов и адаптивных алгоритмов управления является ключевым направлением повышения эффективности работы промывочных комплексов и формирует научно-техническую основу для дальнейшего развития автоматизированных систем управления [9–12].

1.5 Постановка задач по разработке системы управления процессом подачи песков и обоснование требований к автоматизированной системе

Для формализации задачи выделим основные элементы системы управления:

- изменение расхода технологической воды Q_w ;
- изменение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки (через частотно-регулируемый привод) f , определяющее Q_w ;
- регулирование объема подачи песков Q_s .

К параметрам, доступным для оперативного контроля на промывочном комплексе, относятся: ток или потребляемая мощность электроприводов промывочного оборудования (как показатель текущей загрузки); выходная частота преобразователя частоты и (или) потребляемая электрическая мощность насосной установки, определяющие режим подачи технологической воды. При наличии средств измерений дополнительно используются расход технологической воды и напор, а также диагностические сигналы (аварии, перегрузки и др.), фиксируемые системой управления [9, 12, 64, 69].

Ограничения управления определяются требованиями надёжной и безопасной эксплуатации оборудования. К ним относятся: недопущение перегрузки приводов по току и мощности; соблюдение допустимого диапазона выходной частоты преобразователя частоты насосной установки; обеспечение минимального и максимального расхода технологической воды, необходимых для формирования пульпы и предотвращения аварийных режимов (засоров, переполнения, заэфеливания и т.п.) [9, 12, 64, 69].

Следовательно, задача управления состоит в том, чтобы по текущей загрузке промывочного комплекса формировать требуемое значение расхода технологической воды и обеспечивать его изменением выходной частоты преобразователя частоты насосной установки. Это позволяет поддерживать оптимальный режим обогащения, в том числе требуемое соотношение Т:Ж.

Практически это означает необходимость построения зависимости вида:

$$Q_w = \varphi (X), \quad (1.1)$$

где Q_w – требуемый расход технологической воды, м³/ч;

X – измеряемый показатель загрузки оборудования, используемый для формирования требуемого режима промывки.

Одновременно должна быть определена процедура настройки управления, а именно заданные значения параметров режима, допустимые пределы и параметры регулирования, обеспечивающие стабильность технологического процесса промывки песков.

Качество управления целесообразно оценивать по совокупности технологических и энергетических показателей, включая:

- ограничение отклонений соотношения Т:Ж от заданного значения и уменьшение разброса параметров режима;
- снижение доли времени работы в перегрузочных режимах и сокращение числа вынужденных остановок;
- уменьшение удельных энергозатрат на подачу технологической воды при сохранении требуемой производительности промывочного комплекса.

Проведённый анализ показал, что существующие способы управления процессом промывки ориентированы преимущественно на ручную корректировку технологических параметров и не обеспечивают автоматическое регулирование расхода технологической воды в зависимости от текущей производительности промывочного комплекса. Следовательно, разработка алгоритма автоматизированного регулирования, использующего измеряемые параметры работы оборудования, является актуальной научно-технической задачей.

1.6 Выводы по главе 1

1. Установлено, что режим промывки россыпных песков на промывочном комплексе определяется изменчивостью гранулометрического состава, глинистости и влажности исходного материала, а также неравномерностью его подачи. Эти факторы вызывают колебания параметров пульпы и отклонения гидродинамических условий на шлюзах, что снижает эффективность извлечения тонких классов золота.

2. Обосновано, что расход технологической воды является одним из ключевых технологических параметров процесса промывки, влияющих одновременно на условия формирования пульпы, содержание твёрдой фазы в пульпе и удельные энергозатраты процесса. В связи с этим регулирование расхода технологической воды следует рассматривать как приоритетное направление повышения эффективности работы промывочного комплекса.

3. Установлено, что ручные способы регулирования подачи песков и расхода технологической воды не обеспечивают требуемой оперативности регулирования и устойчивости технологического режима при изменении свойств исходного материала и условий работы оборудования.

4. Установлено, что в реальных условиях работы промывочного комплекса измерение параметров пульпы затруднено, поэтому оценку режима целесообразно выполнять по регистрируемым параметрам работы оборудования.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ РОССЫПНЫХ ПЕСКОВ НА ПРОМЫВКУ И РАБОТЫ ПРОМЫВОЧНОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Методический подход к исследованию процессов подачи песков и регулирования расхода технологической воды

Для достижения цели исследования и решения задач, сформулированных в первой главе, разработан методический подход, основанный на экспериментальном исследовании процессов подачи песков и регулирования расхода технологической воды в условиях действующего промывочного комплекса. Методический подход предусматривает регистрацию технологических и энергетических параметров работы оборудования, последующую обработку экспериментальных данных и построение зависимостей, необходимых для разработки алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды в зависимости от текущей производительности по пескам.

В рамках предложенного методического подхода выполняются регистрация технологических и энергетических параметров работы промывочного комплекса, статистическая обработка экспериментальных данных, установление количественных зависимостей между измеряемыми параметрами и разработка алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды. Использование экспериментальных данных, получаемых непосредственно в процессе эксплуатации оборудования, позволяет реализовать алгоритм автоматизированного регулирования без применения специализированных средств измерения производительности по пескам.

Одним из основных показателей эффективности процесса промывки является соотношение твёрдой и жидкой фаз в пульпе (Т:Ж), определяющее условия транспортирования материала, гидродинамический режим на шлюзах и эффективность извлечения золота. Поддержание соотношения Т:Ж в рациональном диапазоне позволяет обеспечить устойчивость технологического процесса при

минимально необходимых расходах технологической воды и энергетических ресурсов [3, 13, 14, 21–24, 52].

В связи с невозможностью прямого непрерывного измерения производительности по пескам в условиях эксплуатации промывочного комплекса в качестве информативных параметров использованы электрические параметры электропривода промывочного оборудования. Использование электрических параметров электропривода в качестве косвенных показателей загрузки позволяет оперативно оценивать текущую загрузку комплекса и формировать требуемое значение расхода технологической воды на насосную установку посредством изменения расхода технологической воды.

В условиях эксплуатации россыпных месторождений равномерность подачи песков на промывочный комплекс не обеспечивается вследствие изменчивости горно-геологических характеристик разрабатываемых песков и особенностей работы горнотранспортного оборудования. Это приводит к колебаниям производительности по пескам, изменению требуемого расхода технологической воды и отклонению режима промывки от рациональных значений, что обуславливает необходимость автоматизированного регулирования технологического процесса [3, 13, 14, 22, 24, 52].

В основу исследования положена гипотеза о том, что ток нагрузки электропривода промывочного прибора I может использоваться как косвенный показатель текущей загрузки по твёрдой фазе и служить основой для расчётной оценки производительности по пескам Q_s [3, 9, 67, 69]. На основе полученной оценки определяется требуемый расход технологической воды Q_w , обеспечивающий поддержание требуемого режима промывки без применения специализированных средств непрерывного измерения производительности по пескам, эксплуатация которых затруднена в условиях абразивной и загрязнённой среды.

Для дальнейшего изложения введём следующие обозначения:

Q_s – производительность по пескам, $\text{м}^3/\text{ч}$;

Q_w – расход технологической воды, м³/ч;

I – ток нагрузки привода промывочного прибора, А;

f – выходная частота преобразователя частоты (ПЧ) насосной установки, Гц;

P – активная мощность насоса, кВт.

Алгоритм формирования режима подачи технологической воды представляется последовательностью:

$$Q_s = \psi(I), \quad (2.1)$$

$$Q_w = \varphi(Q_s), \quad (2.2)$$

$$f = \chi(Q_w), \quad (2.3)$$

где функции $\psi(I)$ и $\varphi(Q_s)$ определены по результатам экспериментальных исследований в конкретных горно-геологических условиях, а зависимость $\chi(Q_w)$ определяется характеристиками насосной установки и законами подобия центробежных насосов при частотном регулировании.

Эффективность разработанного алгоритма оценивается по технологическим и энергетическим показателям, включающим:

- поддержание соотношения Т:Ж в заданных пределах и уменьшение разброса параметров режима промывки (расхода технологической воды, содержания твёрдой фазы в пульпе и производительности по пескам);
- ограничение перегрузочных режимов оборудования по измеряемым электрическим параметрам;
- снижение удельных энергозатрат на подачу технологической воды при сохранении производительности по пескам.

Предложенный методический подход обеспечивает последовательный переход от регистрации технологических параметров работы промывочного комплекса к построению расчётных зависимостей, разработке алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды и экспериментальной оценке эффективности предложенной системы управления.

2.2 Методика экспериментальных исследований процесса промывки песков

Экспериментальные исследования выполнены в производственных условиях на действующем промывочном комплексе ПБШ-100 артели старателей «Восток» при разработке россыпного месторождения золота ручья Хребтовый (Хабаровский край). Выбор данного объекта обусловлен характерной для россыпных месторождений изменчивостью горно-геологических условий, оказывающих существенное влияние на параметры процесса промывки и эффективность извлечения золота.

Россыпь ручья Хребтовый расположена в верхнем и среднем течении долины ручья Хребтовый, в 70 и 214 км соответственно от посёлков Утур и Ушман районного центра. Горно-геологические особенности исследуемого месторождения определяют условия эксплуатации промывочного комплекса и оказывают непосредственное влияние на выбор параметров автоматизированной системы управления. Её балансовые запасы категории C_1 – 148,9 тыс. м³ песков и 86,6 кг золота, категории C_2 – 58,8 тыс. м³ песков и 35,1 кг золота; забалансовые категории C_2 – 41,8 тыс. м³ песков и 20,5 кг золота.

2.2.1 План участка

План участка исследований представлен на рисунке 2.1. На плане показаны контур россыпи, буровые линии, элементы рельефа, водотоки и участки отработки, что позволяет установить пространственное положение зоны проведения экспериментальных исследований относительно общего контура россыпи. Экспериментальные исследования проводились на действующем промывочном комплексе при разработке указанного участка.

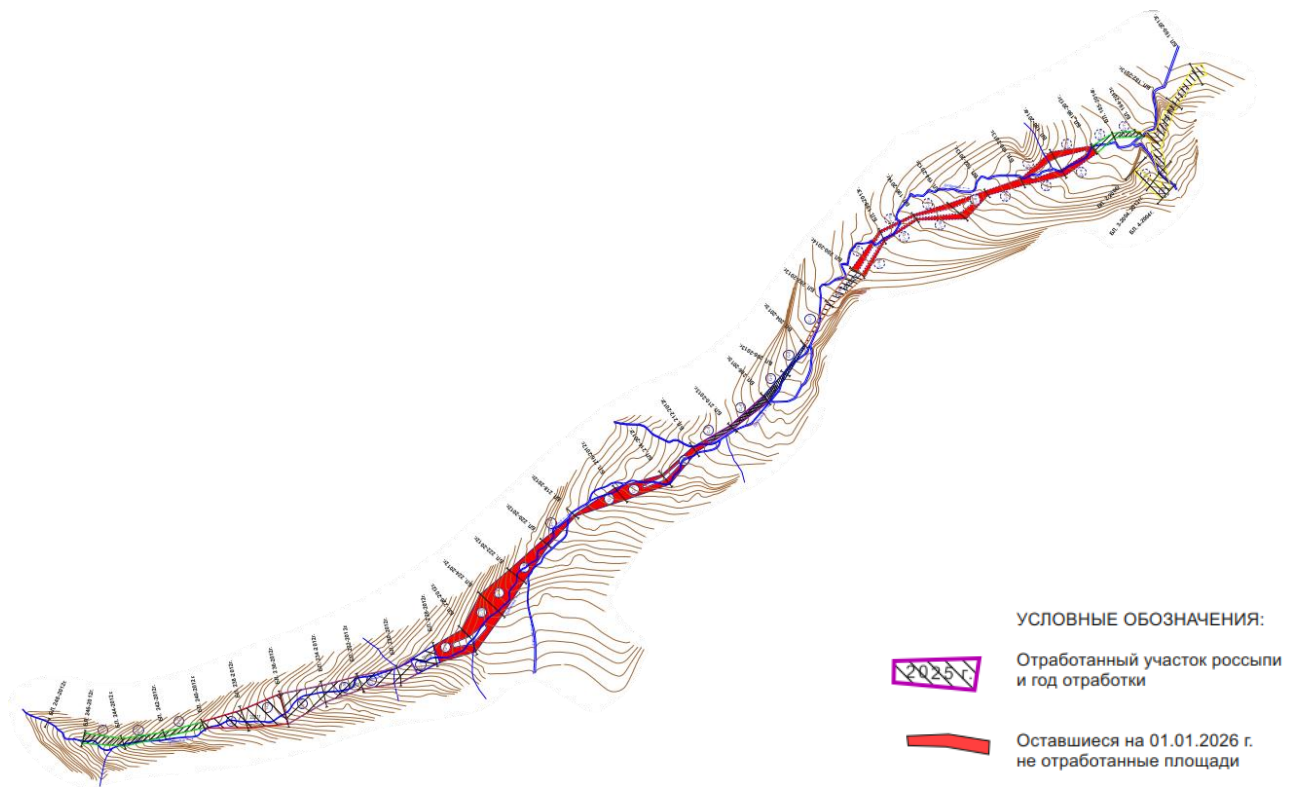


Рисунок 2.1 – План участка россыпного месторождения ручья Хребтовый

2.2.2 Геолого-технологическая характеристика исследуемого участка

Геологоразведочные работы выполнены системой буровых линий, что позволило установить пространственную изменчивость мощности продуктивного пласта, содержания золота и литологического состава рыхлых отложений. Схема размещения буровых линий обеспечивает представительное изучение исследуемого участка россыпи и позволяет оценить особенности пространственного распределения геологических параметров, оказывающих влияние на процесс промывки золотосодержащих песков. Полученные материалы использованы при выборе участка проведения экспериментальных исследований, а также при анализе взаимосвязи геологического строения россыпи с технологическими параметрами работы промывочного комплекса. Схема буровых линий исследуемого участка представлена на рисунке 2.2.

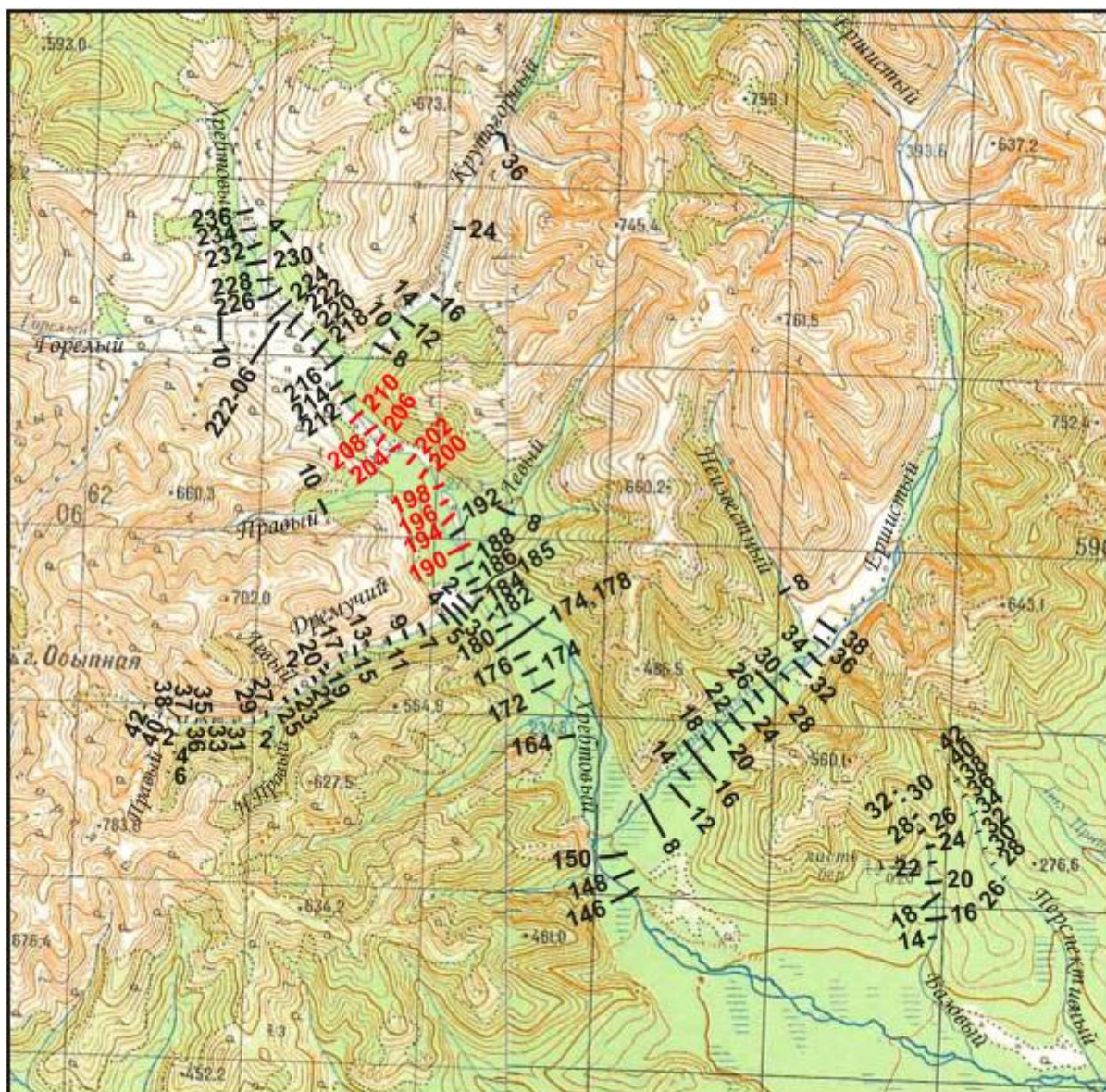


Рисунок 2.2 – Схема расположения буровых линий участка исследований россыпи
Хребтовый

Указанные материалы использованы при выборе участка проведения натурных исследований и обосновании необходимости регистрации параметров работы промывочного комплекса в режиме реального времени.

Это позволило выбрать представительный участок исследований, отражающий характерную изменчивость условий разработки россыпи.

Литологические разрезы свидетельствуют о существенной изменчивости мощности торфов, продуктивного пласта и состава рыхлых отложений по ширине

долины. Установленные различия определяют изменение объёма поступающей на промывочный комплекс минеральной массы, её гранулометрического состава, что оказывает непосредственное влияние на условия формирования пульпы и параметры технологического процесса промывки. Такая неоднородность обуславливает изменение фактической производительности промывочного комплекса и потребности в технологической воде, что определяет необходимость применения автоматизированного регулирования режима промывки. Литологические разрезы исследуемого участка представлены на рисунке 2.3.

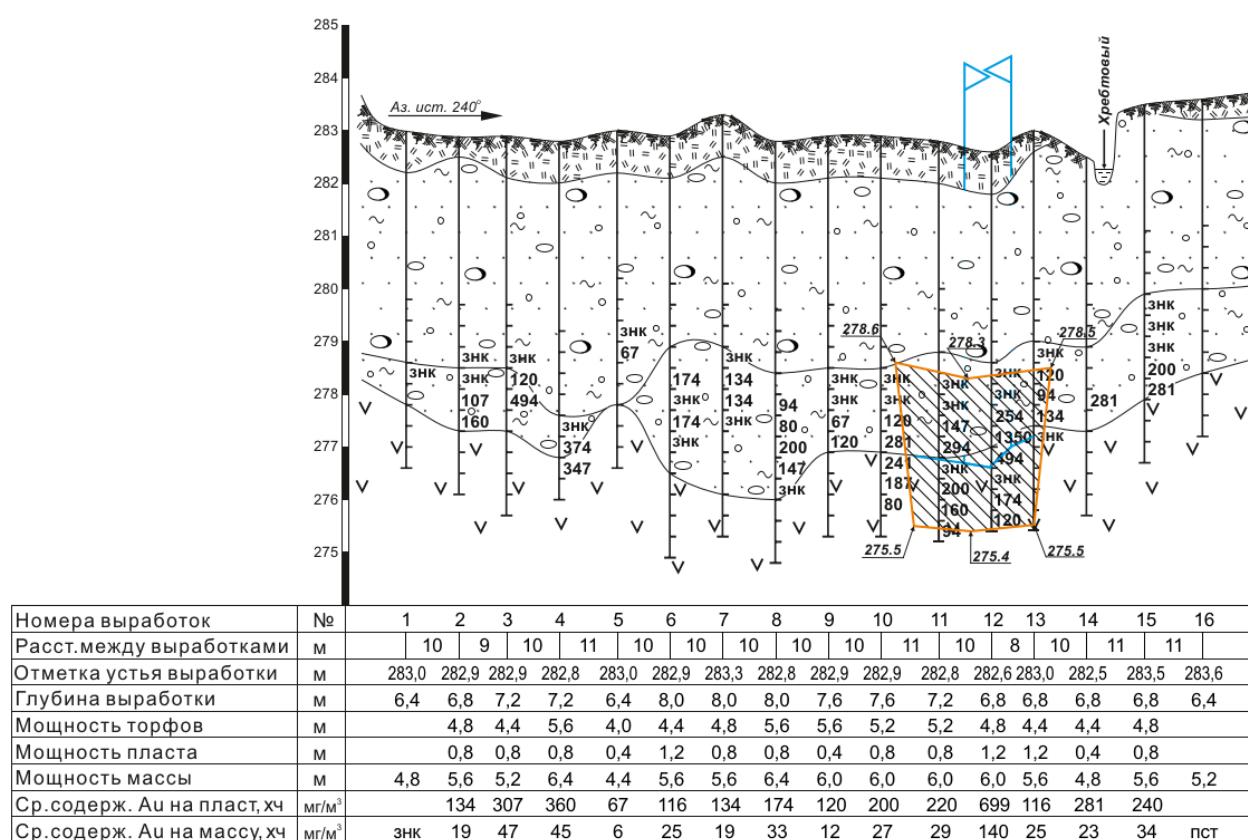


Рисунок 2.3 – Литологические разрезы участка россыпи ручья Хребтовый

Полученные сведения о строении россыпи использованы при выборе участка проведения экспериментальных исследований и послужили основой для анализа влияния изменения геологических условий на параметры работы промывочного комплекса. Именно указанная изменчивость легла в основу экспериментальных

исследований по автоматизированному регулированию расхода технологической воды.

Геологоразведочные работы на россыпное золото в среднем течении руч. Хребтовый впервые были проведены комплектом «Эмпайр» Херпучинской партией ДВГРЭ объединения «Приморзолото» в 1976–77 гг. В единичных скважинах была отмечена повышенная золотоносность аллювия лишь по руч. Ершистому, левому притоку руч. Хребтовый.

Разведочные работы в долине руч. Хребтовый на площади проведены в 2012–2014 гг. станком ударно-вращательного бурения УБР-2М по сети 80–243х10–20 м. Всего было пробурено 517 скважин в 27 линиях суммарным объемом бурения 3364,4 м и опробования 5400 проб.

Днище долины выполнено аллювиальными отложениями поймы и первой надпойменной аккумулятивной террасы, прослеживающейся почти непрерывно по обоим бортам долины. Ширина поймы в районе буровых линий 200–206 и 228–236 не превышает 100–200 м, на остальных участках долины 400–600 и террасы 100–300 м. Отложения поймы и террасы по литолого-гранулометрическому составу не различаются и сформированы в единый эрозионный цикл. Повсеместно они представлены валунно-галечными образованиями с гравийно-глинисто-песчаным заполнителем. Аллювиальные отложения зачастую перекрыты слоем органогенных торфяников мощностью 0,4–2,0 м, максимальная мощность их до 3–4,8 м установлена на верхнем участке россыпи выше линии 226. Мощность рыхлых отложений по данным бурения от 2,4 до 9,2–10 м.

В строении бортов и ложа долины участвуют позднемеловые образования Ульбанской вулканоплутонической ассоциации – вулканиты андезитовой толщи и плутонические тела умеренно кислого состава.

Разведочными работами в долине среднего и верхнего течения руч. Хребтовый оконтурена промышленная россыпь протяженностью 5410 м и средней шириной 49 м при колебаниях от 10 до 150 м. Расширение контура до 50–150 м устанавливается во второй половине россыпи. Литологическое строение рыхлых отложений, вмещающих россыпь руч. Хребтовый, приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Литологическое строение рыхлых отложений исследуемого участка россыпи

Литологический элемент разреза	Мощность, м
Почвенно-растительный гумусный слой	0,0–0,1 м
Валунно-гравийно-галечные отложения с глинисто-песчаным заполнителем серо-бурого цвета	0,1–4,0 м
Гравийно-галечные отложения с песчано-глинистым заполнителем бурого, серо-бурого цвет	4,0–4,4 м

Согласно данным таблицы 2.1, нижний интервал разреза представлен гравийно-галечными отложениями с песчано-глинистым заполнителем, распространёнными преимущественно на нижнем отрезке россыпи (ниже БЛ-206).

Окатанность обломочного материала средняя и хорошая. Вниз по течению ручья степень окатанности постепенно улучшается. Обломочная фракция аллювия представлена в основном андезитами, реже гранодиорит-порфирами и гранодиоритами, в небольшом количестве встречаются плохо окатанные обломки кварца и вторичных кварцитов. Распределение валунов в слое 2 неравномерное, наблюдается постепенное уменьшение их количества с 15–20 % в верхней части разреза до 5–10 % в нижней. В этом же направлении происходит увеличение глинистой составляющей в связующей массе аллювия.

Коренные породы – интенсивно трещиноватые и выветрелые до суглинистого состояния андезиты, на отдельных участках интенсивно метасоматически окварцованные (вплоть до вторичных кварцитов) и сульфидизированные, и гранодиорит-порфиры. Поверхность плотика волнистая, с западинами глубиной до 1–2 м. Продольный профиль плотика слабоволнистый и в целом повторяет уклон поверхности долины. Уклон его варьирует в основном в пределах 0,01–0,02.

Золото локализуется в приплотиковой части аллювия – в слое 3 и низах слоя 2 и россыпь может быть отнесена к инстративной. Продуктивный пласт залегает непосредственно на коренном плотике, иногда приподнят над ним на 0,4–1,6 м. Отмечается просадка золота в трещиноватые коренные породы на глубину 0,4–0,8 м. Промышленный пласт выделяется только по результатам опробования. Мощность пласта изменяется от 0,4 до 1,2 м, иногда достигает 1,6–2,0 м, в среднем

по россыпи она составляет 1,0 м. Мощность торфов колеблется от 0,4 до 7,2 м, средняя по россыпи 3,4 м.

Распределение золота в плане и вертикальном разрезе продуктивного пласта неравномерное. Содержание его по выработкам изменяется от 107 мг/м³ (С-11 БЛ-228) до 4209 мг/м³ (С-3 БЛ-224), по блокам от 312 до 1154 мг/м³. Среднее содержание по россыпи 597 мг/м³.

Количество золота мелкой размерности уменьшается вверх по россыпи от 85–91 % до 60–70 %, средний металл устанавливается в основном во второй половине россыпи, а крупный – только на верхнем отрезке (выше БЛ-228). Предварительные расчеты показали среднее извлечение золота при промывке песков на гидроэлеваторных промывочных установках 90,4 % и технологические потери – 9,6 %, и намечается тенденция увеличения извлечения вверх по простиранию изученной части россыпи.

Пески месторождения представлены гравийно-галечными грунтами с глинисто-песчаным и песчано-глинистым заполнителем. Они относятся к среднефракционным с повышенным выходом гальки 47,3 %, гравия 14,2 % и небольшим количеством мелких валунов (7,0 %). По содержанию песка (25,3 %) и глинистого материала (6,3 %) они являются среднепромывистыми. Основные характеристики россыпи руч. Хребтовый приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики россыпи руч. Хребтовый

№ п/п	Показатели	Единицы измерения	Количество
1	Длина россыпи	м	7065
2	Средняя ширина	м	48
3	Площадь	тыс. м ²	336,0
4	Средняя мощность торфов	м	3,3
5	Средняя мощность песков	м	0,9
6	Объем торфов	тыс. м ³	1116,4
7	Объем песков	тыс. м ³	307,5
8	Среднее содержание в х/ч	мг/м ³	597
9	Запас металла в х/ч	кг	181,0
10	Проба золота		864
11	Категория запасов		C _{2заб.} + C ₂ + C ₁

Согласно данным таблицы 2.2, россыпь руч. Хребтовый характеризуется протяжённостью 7065 м, средней шириной 48 м и объёмом песков 307,5 тыс. м³. Усреднённый гранулометрический состав рыхлых отложений в бассейне руч. Хребтовый приведён в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Усредненный гранулометрический состав рыхлых отложений в бассейне руч. Хребтовый

Класс крупности	Содержание, %
Валуны 500 мм	3
Валуны 200 мм.	10
Валуны 100 мм	22
Галька 80 мм	17
Галька 50 мм	21
Галька 20 мм	6
Галька 10 мм	6
Гравий 8 мм	3
Гравий 3 мм	4
Песчаные 1мм	3
Глинистые 0,05 мм	5
Средний размер	83 мм

Согласно данным таблицы 2.3, в составе рыхлых отложений преобладают валунно-галечные фракции, тогда как доля песчаного и глинистого материала сравнительно невелика. Это подтверждает, что пески месторождения относятся к среднепромывистым и характеризуются значительной долей крупнообломочного материала.

Исследуемая россыпь характеризуется значительной изменчивостью мощности продуктивного пласта, гранулометрического состава и содержания глинистых частиц, что приводит к изменению производительности промывочного комплекса и потребности в технологической воде. Это подтверждает необходимость применения автоматизированного регулирования режима промывки.

2.2.3 Методика экспериментальных исследований

Установленные геолого-технологические особенности объекта исследования обусловили необходимость регистрации параметров, характеризующих текущую загрузку промывочного комплекса и режим подачи технологической воды. Регистрация параметров осуществлялась в режиме реального времени с дискретностью 5 секунд с последующей обработкой данных в электронных таблицах. Первичные данные регистрировались штатными средствами промышленной системы управления промывочным комплексом. Значения тока нагрузки I , управляющей частоты f и активной мощности P считывались из шкафа управления (ПЛК/преобразователи частоты) и архивировались для последующей обработки. Расход технологической воды Q_w определялся расчётным способом по текущей частоте f на основе законов подобия центробежных насосов при частотном регулировании.

В ходе исследований регистрировались следующие параметры: ток нагрузки промывочного прибора $I(A)$, производительность промывочного прибора по пескам Q_s ($m^3/ч$), управляющая частота насосных установок $f(Гц)$, активная электрическая мощность насосов $P(кВт)$, а также расход технологической воды Q_w ($m^3/ч$) для насосных установок номинальной мощностью 55 и 110 кВт.

Подача песков на промывочный прибор ПБШ-100 осуществлялась экскаватором в приёмный бункер прибора. Производительность по пескам Q_s определялась по объёму поданного материала за заданный интервал времени по данным оперативного учёта подачи. Рассчитывался объём материала, поступивший в бункер за фиксированный интервал времени Δt , и далее Q_s принималась равной отношению указанного объёма к длительности интервала наблюдения. Объём подачи определялся по вместимости ковша экскаватора $V_k = 1,6 m^3$ и числу рабочих циклов загрузки n за интервал Δt с учётом коэффициента заполнения ковша k_z .

$$Q_s = \frac{V_k \times N_c \times k_z}{\Delta t} \times 60, \quad (2.4)$$

где Q_s – производительность по пескам, м³/ч;

V_k – вместимость ковша экскаватора, м³;

N_c – число рабочих циклов загрузки за интервал наблюдения;

k_z – коэффициент заполнения ковша;

Δt – продолжительность интервала наблюдения, мин.

При типичном темпе загрузки порядка 1 ковша в минуту ($N_c=1$, $\Delta t=1$ мин) расчётная подача при $k_z = 1$, что соответствует характерному диапазону рабочих режимов промывочного комплекса.

$$Q_s = \frac{1,6 \times 1 \times 1}{1} \times 60 = 96 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Указанный порядок величин согласуется с принятым при фильтрации диапазоном $Q_s = 0 - 200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Полученные значения Q_s использовались в качестве экспериментальной базы для идентификации зависимости $Q_s = \psi(I)$.

Коэффициент заполнения ковша k_z отражает фактическое заполнение и может уточняться по данным наблюдений, при его уменьшении ($k_z = 0,8$) типичная подача составит порядка $77 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Расход технологической воды Q_w определялся расчётным способом по законам подобия центробежных насосов на основе измеренной частоты вращения и известного базового режима насоса при частоте вращения 980 и 1450 обр./мин. При неизменном рабочем колесе и близком режиме работы выполняется соотношение:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.5)$$

где Q_1 – расход технологической воды в базовом режиме, м³/ч;

Q_2 – расход технологической воды в текущем режиме, м³/ч;

n_1 – базовая частота вращения рабочего колеса насос, об/мин;

n_2 – текущая частота вращения рабочего колеса насоса, об/мин.

При частотном регулировании в рассматриваемом рабочем диапазоне изменение частоты вращения электродвигателя насосной установки определяется изменением выходной частоты преобразователя частоты, что позволяет представить зависимость подачи через отношение f/f_1 .

Расчет выполнен по паспортной характеристике центробежного насоса типа 1Д800-56, применяемого в системе подачи технологической воды промывочного комплекса. В качестве базового режима принята подача Q_1 по паспортной характеристике при номинальной выходной частоте преобразователя частоты $f_1 = 50$ Гц. Тогда текущий расход технологической воды определялся по выражению:

$$Q_w = Q_1 \times \frac{f}{f_1}, \quad (2.6)$$

где f – текущая выходная частота преобразователя частоты насосной установки, Гц;

f_1 – базовая (номинальная) выходная частота преобразователя частоты насосной установки, Гц;

При необходимости пересчёта напора и мощности использовались зависимости:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad (2.7)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3, \quad (2.8)$$

где H_1 – напор при базовой частоте вращения, м;

H_2 – напор при изменённой частоте вращения, м;

P_1 – мощность насоса при базовой частоте вращения, кВт;

P_2 – мощность насоса при изменённой частоте вращения, кВт.

Таким образом, значение Q_w для каждого момента времени вычислялось по текущей частоте преобразователя частоты с привязкой к базовому режиму работы насоса.

Применение расчёта расхода по законам подобия обусловлено особенностями производственных условий и схемой питающей водяной линии насоса, где установка расходомера на напорной линии затруднена (абразивность технологической воды, вибрации, неоднородность потока, необходимость обслуживания). Определение Q_w по текущей частоте ПЧ является корректным в пределах диапазона регулирования, поскольку геометрия рабочего колеса и гидравлическая схема остаются неизменными, а изменение подачи в основном определяется изменением скорости вращения.

Нижняя граница диапазона выходной частоты преобразователя частоты насосной установки обусловлена эксплуатационными ограничениями электропривода и требованиями к минимально допустимому расходу технологической воды и минимального напора, необходимому для преодоления перепада высот установки промприборов и насосных установок. При снижении частоты вращения ухудшаются условия охлаждения электродвигателя, возрастает тепловая нагрузка и риск перегрева при длительной работе. Кроме того, уменьшение частоты приводит к снижению подачи насоса и может нарушить обеспечение минимально необходимого расхода технологической воды одновременно на узлы загрузки (бункер) и шлюза. В связи с этим в ходе опытной эксплуатации нижняя граница выходной частоты преобразователя частоты насосной установки была принята равной 35 Гц. Рабочий диапазон регулирования принят $f = 35\text{--}50$ Гц.

Адекватность расчётной оценки Q_w косвенно подтверждается высокой согласованностью последующих регрессионных зависимостей $Q_w(Q_s)$ в рабочем диапазоне частот.

Ограничения применимости и оценка погрешности расчёта Q_w . Расчёт расхода технологической воды Q_w по частоте вращения насосной установки на основе законов подобия центробежных насосов является корректным при условии неизменности гидравлической характеристики насоса (геометрии рабочего колеса, состояния проточной части) и близости режимов работы к области, для которой известна паспортная характеристика. В реальных условиях эксплуатации отклонения от идеализированных зависимостей могут быть обусловлены изменением напора в водоводе, гидравлическими потерями, износом рабочего колеса, а также наличием кавитационных явлений при работе на пониженных частотах. В связи с этим расчётный Q_w в рамках настоящего исследования рассматривается как оперативная оценка, достаточная для построения зависимости регулирования и выбора параметров управления в рабочем диапазоне частот (в частности, 35–50 Гц), при обязательном соблюдении ограничений по устойчивости работы насоса и недопущению аварийных режимов.

Для исключения некорректных записей и выбросов при статистической обработке применена фильтрация Q_s , которая принималась в диапазоне 0–200 м³/ч, I– 10–150 А. Значения расхода воды учитывались при условии положительности и принадлежности технологически допустимому диапазону. Выбросами считались записи с пропусками, а также значения, выходящие за физически возможные границы для исследуемого комплекса.

Всего в исходном массиве содержалось 33118 записей. После фильтрации для статистической обработки использовано 27160 записей. Для выявления закономерностей применялась линейная регрессия методом наименьших квадратов и оценка качества аппроксимации по коэффициенту детерминации R^2 . Предварительный анализ диаграмм рассеяния (рисунки 2.4–2.6) показал отсутствие

выраженной нелинейности в рабочих диапазонах режимов, что подтверждает применение линейной модели.

Линейный характер аппроксимации зависимости $Q_s = f(I)$ в пределах рассматриваемого диапазона режимов объясняется тем, что ток нагрузки привода отражает изменение электромеханического момента сопротивления, обусловленного ростом массы и сопротивления перемещаемого материала при увеличении подачи песков. При работе привода в установившемся режиме и при отсутствии резких изменений механического состояния оборудования (засоры, пробуксовка, ударные нагрузки) изменение тока в рабочем диапазоне является монотонным и достаточно хорошо коррелирует с изменением производительности по твёрдой фазе. Следовательно, использование линейной модели $Q_s = aI + b$ является обоснованным в пределах идентифицированных диапазонов данных и при соблюдении условий исключения выбросов, что подтверждается метриками качества аппроксимации (в том числе значениями R^2).

Для обеспечения воспроизводимости результатов в таблице 2.4 приведён обобщённый паспорт регистрируемых параметров, используемых при статистической обработке и формировании расчётной основы алгоритма управления.

Таблица 2.4 – Паспорт регистрируемых параметров и источники данных

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Источник/способ получения
Ток нагрузки промывочного прибора	I	А	ПЛК/ПЧ электропривода промывочного прибора (канал измерения тока)
Производительность по пескам	Q_s	м ³ /ч	Производственный замер (объём/время), оперативный учёт подачи
Выходная частота преобразователя частоты насосной установки	f	Гц	Преобразователь частоты насосной установки
Мощность насоса	P	кВт	ПЧ/анализатор мощности/счётчик (мгновенная активная мощность)
Расход технологической воды	Q_w	м ³ /ч	Расчёт по законам подобия центробежных насосов по текущей частоте ПЧ и базовому режиму; диапазон $f = 35 - 50$ Гц

2.3 Установление зависимости производительности по пескам от тока нагрузки промывочного прибора

Обработка экспериментальных данных проводилась после предварительной фильтрации и исключения недостоверных измерений в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 2.2.3.

По результатам обработки экспериментальных данных установлена линейная связь между током электропривода I и производительностью по пескам Q_s . Полученная зависимость позволяет использовать ток электропривода как оперативный показатель текущей загрузки промывочного прибора. Уравнение регрессии имеет вид ($R^2=0,956$):

$$Q_s = 3,306 \times I - 162,469. \quad (2.9)$$

Средняя абсолютная ошибка модели составляет $4,51 \text{ м}^3/\text{ч}$, RMSE – $7,80 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Высокое значение R^2 объясняется тем, что ток является интегральной характеристикой момента сопротивления на приводе промывочного узла, который в рассматриваемых режимах в основном определяется текущей загрузкой песками и сопротивлением перемешиванию/перемещению пульпы. Указанная зависимость применима в пределах диапазонов режимов, охваченных экспериментом, и может использоваться для оперативной оценки подачи песков без введения дополнительных датчиков расхода твёрдой фазы.

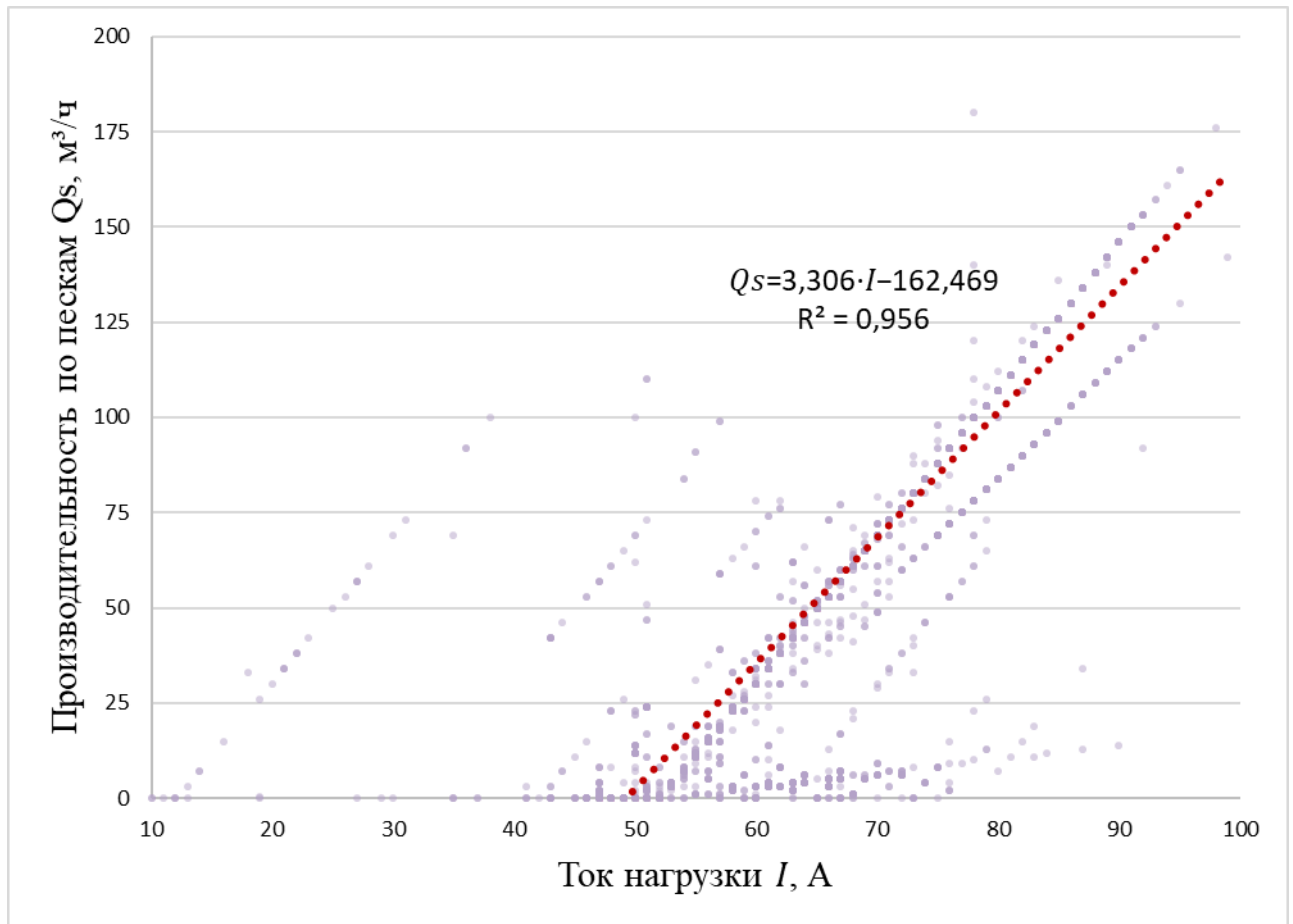


Рисунок 2.4 – Зависимость производительности по пескам Q_s от тока нагрузки I .

Линейная модель выбрана как наиболее простая и практически реализуемая для промышленного алгоритма регулирования. Анализ экспериментальных данных показал, что использование более сложных моделей не обеспечивает существенного повышения точности расчёта производительности.

2.4 Установление зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам

Следующим этапом выполнено установление зависимости требуемого расхода технологической воды Q_w от производительности по пескам Q_s . Поскольку система подачи (распределения) технологической воды обеспечивается насосными установками различной мощности, зависимости приведены отдельно для насосов 110 и 55 кВт.

Под требуемым расходом Q_w в рамках настоящего исследования понимается расход, фактически обеспечивавший устойчивый технологический режим в наблюдаемых производственных условиях. Полученная зависимость используется как эмпирическая база для формирования целевого задания расхода в алгоритме.

Для насоса 110 кВт получено:

$$Q_{w,110} = 3,046 \times Q_s + 388,515. \quad (2.10)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0,825$.

Для насоса 55 кВт получено:

$$Q_{w,55} = 1,503 \times Q_s + 342,460. \quad (2.11)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0,789$.

Физический смысл зависимостей состоит в том, что при увеличении подачи песков требуется увеличение расхода воды для поддержания требуемой концентрации твёрдой фазы в пульпе и недопущения превышения допустимого содержания твёрдой фазы (и связанного с этим роста плотности пульпы), приводящего к ухудшению качества промывки. При уменьшении подачи избыточный расход воды вызывает перерасход энергии на перекачку и ухудшение условий удержания мелкого золота из-за усиления транспортной способности потока [13, 22, 23, 51, 52, 53]. Следовательно, адаптивное регулирование расхода воды является необходимым элементом стабилизации режима промывки.

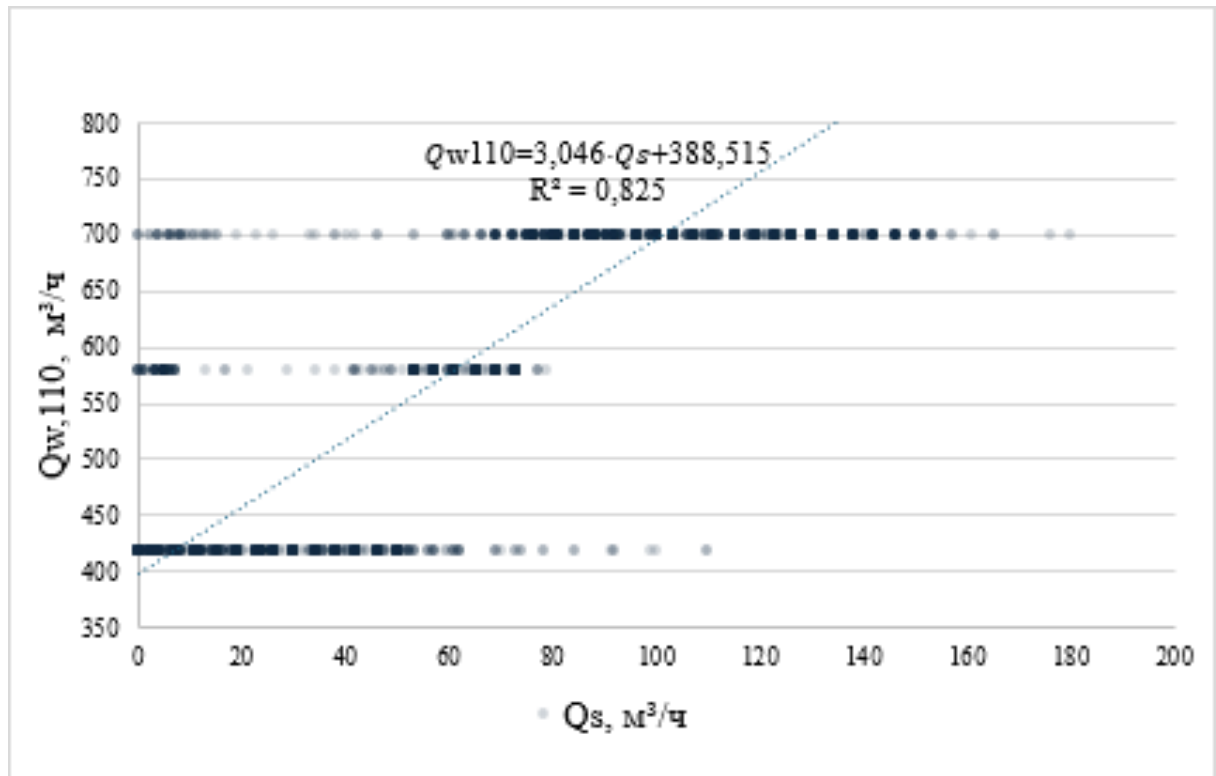


Рисунок 2.5 – Зависимость расхода технологической воды $Q_{w,110}$ от производительности по пескам Q_s .

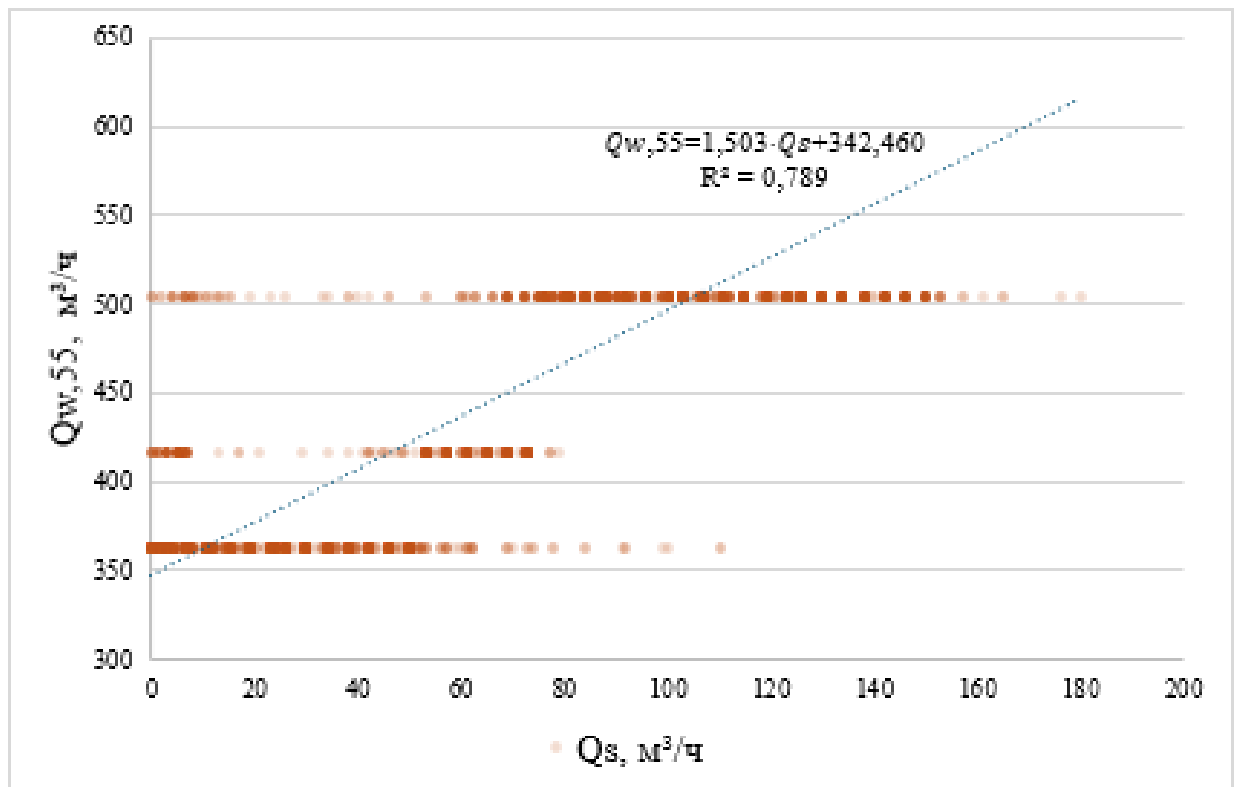


Рисунок 2.6 – Зависимость расхода технологической воды $Q_{w,55}$ от производительности по пескам Q_s .

Оценка точности аппроксимации. Помимо коэффициента детерминации R^2 качество полученных регрессионных моделей оценивалось по метрикам средней абсолютной ошибки (MAE) и среднеквадратической ошибки (RMSE), вычисленным на массиве экспериментальных данных после фильтрации (27 160 записей). Для модели $Q_s = \psi(I)$ ошибки определялись как $e_{Q_s} = Q_{s, \text{факт}} - Q_{s, \text{расч}}$. Для моделей $Q_w = \varphi(Q_s)$ отклонения определялись относительно оценённых значений расхода Q_w , вычисленных по текущей частоте ПЧ $e_{Q_w} = Q_{w, \text{оцен}} - Q_{w, \text{мод}}$. Полученные значения MAE и RMSE приведены в таблице 2.5 и используются при оценке применимости моделей и настройке ограничителей алгоритма управления.

Таблица 2.5 – Оценка точности и качества построенных регрессионных моделей (MAE, RMSE)

Модель	R^2	MAE, м³/ч	RMSE, м³/ч
$Q_s = 3,306 \times I - 162,469$	0,956	4,51	7,80
$Q_{w,110} = 3,046 \times Q_s + 388,515$	0,825	41,29	51,91
$Q_{w,55} = 1,503 \times Q_s + 342,460$	0,789	24,96	28,74

Для зависимостей $Q_{w,110}(Q_s)$ и $Q_{w,55}(Q_s)$ значения MAE и RMSE составляют соответственно 41,29/51,91 м³/ч и 24,96/28,74 м³/ч.

Оценка точности аппроксимации подтвердила возможность использования полученных регрессионных зависимостей в качестве расчётной основы для определения производительности по пескам, оценки требуемого расхода технологической воды и настройки параметров алгоритма управления в рабочем диапазоне режимов.

Полученная зависимость определяет расчётное значение расхода технологической воды, обеспечивающее поддержание требуемого технологического режима при изменении производительности по пескам.

2.5 Формирование расчётной основы алгоритма адаптивного регулирования

Полученные эмпирические зависимости позволяют сформировать расчётную основу алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды по измеряемому току нагрузки электропривода промывочного прибора. Расчётная схема включает два последовательных этапа:

1. Оценка текущей загрузки промывочного прибора по измеряемому току нагрузки его электропривода;
2. Расчёт требуемого расхода технологической воды, по полученной оценке, в соответствии с зависимостями (2.10) и (2.11).

Далее требуемый расход технологической воды Q_w , рассчитанный по формуле (2.10) или (2.11) в зависимости от мощности применяемой насосной установки, обеспечивается изменением выходной частоты преобразователя частоты насосной установки. С учётом зависимости (2.6) и установленного рабочего диапазона 35–50 Гц расчётное значение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки определяется выражением:

$$f = \min \left\{ 50; \max \left[35; f_1 \frac{Q_w}{Q_1} \right] \right\}. \quad (2.12)$$

Полученные экспериментальные зависимости и расчётная схема управления позволяют обосновать следующие параметры АСУ подачи песков и технологической воды на промывочный комплекс:

1. Параметры зависимости производительности по пескам от тока нагрузки электропривода промывочного прибора, определяемые коэффициентами регрессионного уравнения (2.9), полученными по экспериментальным данным с учётом фильтрации и исключения выбросов.
2. Параметры зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам, определяемые коэффициентами уравнений (2.10) и (2.11) для насосных установок мощностью соответственно 110 и 55 кВт.
3. Диапазон формирования закона регулирования по выходной частоте преобразователя частоты насосной установки: рабочий диапазон выходной частоты

преобразователя частоты, в котором обеспечивается регулирование расхода технологической воды с соблюдением эксплуатационных ограничений (в настоящем исследовании – 35–50 Гц).

4. Эксплуатационные ограничения алгоритма, включающие допустимые диапазоны измеряемых и расчётных параметров системы и обеспечивающие исключение нештатных режимов работы оборудования, в том числе ограничения по току и мощности электроприводов, а также по минимальной и максимальной выходной частоте преобразователя частоты насосной установки.

5. Коэффициент вариации используется для количественной оценки изменчивости анализируемого параметра во времени. В рамках исследования данный показатель применяется совместно со средним значением, медианой и стандартным отклонением при сопоставлении режимов работы насосного оборудования. Изменение коэффициента вариации мощности характеризует степень изменения нагрузки насосной установки при автоматическом регулировании и не рассматривается отдельно как критерий стабилизации технологического режима.

Для количественной оценки изменчивости анализируемого параметра используется коэффициент вариации:

$$K_v(X) = \frac{\sigma(X)}{\bar{X}} \times 100\%, \quad (2.13)$$

где $K_v(X)$ – коэффициент вариации анализируемого параметра, %;

X – анализируемый параметр;

$\sigma(X)$ – стандартное отклонение параметра X ;

$\bar{X}$ – среднее арифметическое значение параметра X .

Разработанный алгоритм обеспечивает последовательное преобразование измеряемого значения тока нагрузки в расчётное значение производительности по

пескам, после чего определяется требуемая выходная частота преобразователя частоты насосной установки.

2.6 Экспериментальная оценка влияния адаптивного регулирования на энергопотребление насосного оборудования

Оценка энергоэффективности выполнена методом сравнительного анализа режимов «фиксированная подача» и «частотное (адаптивное) регулирование» на основе экспериментально зарегистрированных значений активной мощности насосных установок. Для каждого режима рассчитаны статистические характеристики распределения мощности (среднее значение, медиана, стандартное отклонение и коэффициент вариации), что обеспечивает количественную оценку как изменения среднего уровня энергопотребления, так и вариабельности нагрузки во времени.

В режиме фиксированной подачи насосные установки в течение значительной части времени работают с производительностью, превышающей текущую потребность в технологической воде.

По результатам опытной эксплуатации установлено, что насос с электродвигателем номинальной мощностью 55 кВт при частотном регулировании потреблял в среднем 29,6 кВт, тогда как в режиме фиксированной подачи средняя потребляемая мощность составляла 55 кВт. Для насоса с электродвигателем номинальной мощностью 110 кВт средняя потребляемая мощность при частотном регулировании составила 52,0 кВт, тогда как в режиме фиксированной подачи – 103 кВт. Таким образом, применение частотного регулирования обеспечило снижение средней потребляемой электрической мощности приблизительно на 46 % для насоса с электродвигателем 55 кВт и на 50 % для насоса с электродвигателем 110 кВт в условиях россыпного месторождения руч. Хребтовый.

Сравнительные характеристики потребляемой мощности насосного оборудования при фиксированной подаче и автоматическом регулировании приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Потребление насосов с автоматической регулировкой и без

Наименование	Значения параметров			
	110 кВт, адаптивный режим	110 кВт, без регулировки	55 кВт, адаптивный режим	55 кВт, без регулировки
Средняя потребляемая мощность, кВт	52,0	103,0	29,6	55,0
Стандартное отклонение мощности, кВт	35,3	0,0	13,5	0,0
Медиана мощности, кВт	22,2	103,0	19,0	55,0
Коэффициент вариации мощности, %	67,9	0,0	45,6	0,0

Для каждого насоса определены среднее значение потребляемой мощности, стандартное отклонение, медиана и коэффициент вариации, рассчитанные по данным регистрации в период опытной эксплуатации. Анализ результатов показывает, что при автоматическом регулировании средняя потребляемая мощность насоса мощностью 110 кВт снизилась с 103,0 до 52,0 кВт, а насоса мощностью 55 кВт с 55,0 до 29,6 кВт.

Полученные зависимости $Q_s(I)$ и $Q_w(Q_s)$ демонстрируют удовлетворительное качество аппроксимации в пределах исследованных режимов, что подтверждается значениями R^2 и показателями ошибок (MAE, RMSE), рассчитанными по массиву экспериментальных данных. Следовательно, зависимости могут применяться для формирования алгоритма управления в режиме реального времени при условии сохранения конструктивного исполнения промывочного прибора, характеристик насосных установок и схемы подачи технологической воды, а также диапазона частот регулирования.

При существенном изменении гранулометрического состава, плотности пульпы и доли глинистых примесей возможно изменение коэффициентов зависимостей, что является основанием для их периодического уточнения по данным эксплуатации. Уточнение коэффициентов регрессии может быть выполнено на основе накопленной статистики без остановки оборудования, что

соответствует принципу адаптивности и обеспечивает сохранение эффективности управления при изменении условий разработки россыпного месторождения.

Полученные результаты опытно-промышленной эксплуатации подтвердили работоспособность разработанного алгоритма автоматизированного регулирования и его способность обеспечивать снижение энергопотребления насосной установки при сохранении производительности по пескам.

2.7 Выводы по главе 2

1. На основе производственных измерений установлена зависимость между током нагрузки промывочного прибора и производительностью по пескам, что подтверждает возможность использования тока нагрузки как косвенного показателя текущей подачи песков.

2. Установлены зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам для насосных установок различной мощности.

3. Выполнена оценка точности полученных регрессионных моделей по метрикам MAE и RMSE, что подтверждает возможность их использования для расчёта параметров алгоритма управления в рабочем диапазоне режимов.

4. На основе установленных зависимостей сформирована расчётная основа алгоритма адаптивного регулирования расхода технологической воды по измеряемому току нагрузки, обеспечивающая определение требуемого расхода технологической воды по текущей загрузке промывочного комплекса.

5. Предложен критерий оценки устойчивости технологического режима на основе коэффициента вариации управляемого параметра, позволяющий количественно оценивать эффект стабилизации режима при автоматизированном регулировании.

6. Экспериментальная оценка энергопотребления насосного оборудования подтвердила эффективность адаптивного регулирования – энергопотребление насосов снизилось до 50 %.

7. Обосновано, что изменение расхода технологической воды и режима работы насосного оборудования с учётом текущей загрузки обеспечивает поддержание требуемого режима промывки в рабочем диапазоне производительности по пескам.

3 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДАЧИ ПЕСКОВ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПРОМЫВОЧНОГО КОМПЛЕКСА

3.1 Обоснование комплекса технических средств автоматизированной системы управления процессами подачи песков

В соответствии с установленными эмпирическими зависимостями и обоснованными ограничениями по выходной частоте преобразователя частоты насосной установки разработана структура автоматизированной системы управления технологическим режимом промывочного комплекса. Реализация системы ориентирована на использование штатных измерительных каналов и частотно-регулируемых приводов насосов технологической воды. В настоящей главе приведены выбор технических средств, архитектура системы, а также результаты внедрения на промывочном приборе ПБШ-100 на месторождении россыпного золота руч. Хребтовый.

Система автоматизированного управления технологическими процессами строится на основе комплекса технических средств, обеспечивающих измерение параметров, обработку информации, формирование команд на изменение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки и диспетчеризацию процесса. В общем виде типовая система автоматизации включает четыре основных компонента: контрольно-измерительные приборы (датчики, сенсоры и сигнализаторы) для контроля параметров технологического процесса, промышленный контроллер для обработки данных и формирования команд, исполнительные устройства (клапаны, приводы, частотно-регулируемые приводы и другая пускорегулирующая аппаратура) для непосредственного воздействия на процесс, а также интерфейс (системы визуализации и управления) для взаимодействия оператора с системой [9–12, 67–69].

Такая многоуровневая структура соответствует принятой в автоматизации трехуровневой модели АСУ ТП. Нижний уровень – полевая автоматика (датчики и

исполнительные механизмы), средний уровень – контроллеры, верхний уровень – серверы, станции оператора и программное обеспечение диспетчеризации.

При выборе технических средств автоматизации для системы управления подачей песков и воды на шлюзы учитываются особенности технологического процесса, требования по надежности и точности, а также условия эксплуатации на россыпном месторождении (удаленность объекта, климатические факторы, запыленность и влажность). В настоящем разделе приведены описание и обоснование выбора основных классов оборудования автоматизации, применяемых в рассматриваемой системе: программируемых логических контроллеров, измерительных датчиков, исполнительных приводов с частотным регулированием и систем верхнего уровня типа SCADA.

К современным техническим средствам автоматизации, позволяющим стабилизировать процесс обогащения и снизить потери, отнесены следующие элементы системы. Их выбор выполнен с учётом требований к надёжности, точности, быстродействию, совместимости с промышленными средствами автоматизации и условий эксплуатации на россыпном месторождении.

1. Программируемый логический контроллер (ПЛК) выбран в качестве центрального устройства системы ввиду его надёжности, функциональности и соответствия промышленным стандартам. ПЛК представляет собой специализированный промышленный компьютер, предназначенный для работы в тяжёлых производственных условиях. Его применение обеспечивает приём и обработку сигналов от измерительных датчиков, выполнение расчётных и логических операций по заложенному алгоритму, а также формирование команд на изменение частоты вращения насосной установки. К преимуществам ПЛК относятся устойчивость к внешним воздействиям, возможность работы в режиме реального времени, модульность и совместимость с частотными преобразователями и системами визуализации. Ограничениями являются необходимость квалифицированной настройки и программирования, а также повышенные требования к качеству электропитания и защите от внешних помех [64];

2. Частотно-регулируемые приводы насосных установок выбраны в качестве исполнительных средств системы, поскольку обеспечивают плавное изменение частоты вращения насосов и, соответственно, регулирование расхода технологической воды в зависимости от текущих производственных условий. Их применение позволяет исключить резкие перепады подачи, снизить пусковые нагрузки, уменьшить энергопотребление и повысить устойчивость режима промывки. Дополнительным преимуществом является возможность реализации автоматического изменения подачи воды по сигналам ПЛК в пределах допустимого диапазона частот. К ограничениям данного решения относятся более высокая стоимость по сравнению с нерегулируемыми приводами, необходимость настройки параметров преобразователя частоты и соблюдения эксплуатационных ограничений по минимальной и максимальной частоте вращения [9, 10, 67, 69];

3. Средства измерения выбраны с учётом фактической доступности параметров на промывочном комплексе. Основными информационными сигналами системы являются электрические параметры привода промывочного прибора, параметры частотно-регулируемого привода насосной установки, а также сигналы оперативного контроля режима работы оборудования. Это позволяет оценивать текущую загрузку комплекса и формировать требуемый режим расхода технологической воды без установки специализированных датчиков прямого измерения параметров пульпы [12, 64, 69];

4. Система типа SCADA выбрана для оперативного контроля, визуализации и архивирования параметров технологического процесса. Она обеспечивает отображение текущего состояния оборудования, регистрацию значений контролируемых параметров, ведение архива данных и информационную поддержку принятия решений оператором. Преимуществами SCADA-системы являются наглядность представления информации, удобство анализа режимов работы, возможность быстрого выявления отклонений и повышения эксплуатационной дисциплины. К ограничениям относятся необходимость настройки интерфейсов обмена данными, сопровождения программного

обеспечения и обеспечения устойчивой работы средств связи и вычислительной техники [9, 11, 67, 68].

Выбор программируемого логического контроллера, измерительных датчиков, частотно-регулируемых приводов и SCADA-системы обусловлен требованиями к надёжности, точности, оперативности регулирования и условиям эксплуатации промывочного комплекса [9, 10, 64, 67]. Выбранный состав технических средств обеспечивает измерение параметров технологического процесса, обработку информации, формирование команд регулирования, изменение частоты вращения насосной установки и визуализацию режима работы оборудования, что позволяет реализовать разработанную систему автоматизированного управления на промывочном приборе ПБШ-100.

3.2 Апробация разработанной системы автоматизации на промывочных приборах бочечного типа в промышленных условиях

В 2023 году в рамках повышения эффективности работ на месторождении руч. Хребтовый (Хабаровский край) был спроектирован и изготовлен новый промывочный прибор бочечного типа ПБШ-100 (рисунок 3.1). Этот прибор разработан для работы с хорошо- и среднепромывистыми песками, оснащён системой автоматического управления и может быть включён в общую систему производственного мониторинга и управления. Благодаря применению полиуретановых сит, обладающих высокой износостойкостью и низким сопротивлением потоку, удалось добиться высокой пропускной способности – до 150 м³/ч при переработке хорошо промывистых песков. Эффективная классификация по классу крупности 7–20 мм позволяет отказаться от использования дополнительных классификаторов и направлять подрешетный материал непосредственно на шлюзы мелкого наполнения, что позволяет упростить обогатительный цикл и сократить затраты.



Рисунок 3.1 – Промывочный прибор ПБШ-100 на месторождении руч. Хребтовый, Хабаровского края

Основным потребителем энергии в процессе переработки песков выступает система подачи технологической воды – от 60 до 100 % от общей энергоёмкости процесса обогащения.

В результате сравнительного анализа различных типов промывочных приборов установлено, что элеваторные установки ПГШ-50 демонстрируют один из самых высоких удельных расходов топлива – $1,25 \text{ кг/м}^3$, тогда как модернизированный скрубберно-бочечный прибор ПБШ-100, разработанный авторами, обеспечил рекордно низкий расход при отработке гравийно-галечных песков с высоким процентом галечной фракции $0,28 \text{ кг/м}^3$ [9, 23, 29, 36, 46].

Для количественного сопоставления энергетических и эксплуатационных показателей промывочных приборов, применяемых при переработке россыпных песков, выполнена укрупнённая сравнительная оценка по паспортным и фактическим данным.

Сопоставление выполнено по показателям производительности, установленной мощности приводов и насосных агрегатов, расходу дизельного топлива и удельным топливным затратам, приведённым к единице переработанного объёма песков. Расчёт сезонных показателей выполнен для режима суточного работы 20 часов, продолжительность сезона промывки 150 дней.

В таблице 3.1 показаны сравнительные технические и энергетические показатели промывочных приборов при переработке россыпных песков. Удельный расход топлива определён как отношение сезонного расхода топлива к сезонной производительности по пескам. Источники исходных данных: паспортные характеристики оборудования и производственный учёт.

Представленные данные подтверждают, что энергетическая нагрузка промывочных комплексов в значительной степени определяется работой насосных агрегатов, обеспечивающих расход технологической воды [23].

Таблица 3.1 – Сравнительные технические и энергетические показатели промывочных приборов при переработке россыпных песков

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	ППМ-5	ГИТ-52	ПГШ-50	ПЗШ-100	ПБШ-100
1	Производительность паспортная	м ³ /ч	100	200	50	100	100
2	Производительность фактическая	м ³ /ч	80	120	40	90	90
3	Установленная мощность привода	кВт	45	30	–	360	60
4	Тип используемого насоса		1Д-1250-63а	1Д800-56	1Д-1250-63	1Д-1250-63	1Д800-56Б
5	Установленная мощность насоса	кВт	250	132	290	290	110
6	Суммарная установочная мощность	кВт	280	177	290	650	170

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	ППМ-5	ГИТ-52	ПГШ- 50	ПЗШ- 100	ПБШ- 100
7	Суточный расход дизельного топлива	т/сут.	1,1	0,45	1	1,9	0,5
8	Масса прибора	т	36,4	17	25	35	22
9	Стоимость прибора без НДС	млн руб.	18	11	8	12	17
10	Годовые эксплуатационные затраты	млн руб./год	8	1,2	1	6	1,3
11	Сезонная производительность, 150 дней	тыс. м ³ /сезон	240	360	120	270	270
12	Сезонный расход топлива	т/сезон	165,00	67,50	150,00	285,00	75,00
13	Сезонные расходы (запчасти, амортизация 20 %)	млн руб./сезон	11,6	3,4	2,6	8,4	4,7
14	Удельный расход топлива	кг/м ³	0,69	0,19	1,25	1,06	0,28
15	Удельные затраты работы прибора на 1 м ³ песков	руб./м ³	88,33	18,33	108,33	106,67	27,04

Расчёт выполнен при продолжительности смены 20 ч/сут и длительности промывочного сезона 150 дней.

В рамках натурных испытаний системы на промывочном приборе ПБШ-100 проведены замеры отношения твёрдой и жидкой фаз в пульпе (Т:Ж), скорости потока на шлюзах, а также эффективности грохочения, достигшей 80–97 % в зависимости от класса крупности. В конструкции реализован ряд инновационных решений, включая применение полиуретановых футеровок, частотное регулирование, использование световой индикации загрузки и модернизированный привод ведущих колёс, что позволило значительно снизить эксплуатационные расходы и увеличить надёжность работы оборудования. В таблице 3.2 рассмотрены основные технические характеристики ПБШ-100 со шлюзовой приставкой.

Таблица 3.2 – Технические характеристики ПБШ-100 со шлюзовой приставкой

Технические характеристики	Значение
Средняя производительность по пескам, м ³ /час	100
Масса прибора, тонн	24
Суммарная установленная мощность привода скруббер-бутары, кВт	60
Регулируемая частота вращения скруббер-бутары, об/мин	9,5–14
Габаритные размеры прибора в сборе, Д×Ш×В, мм	13000×2400×4200
Габаритные размеры несущей рамы – саней, Д×Ш, мм	10500×2400
Длина бочки скруббер-бутары, мм	9300
Диаметр входного отверстия скруббер-бутары, мм	900
Диаметр скруббер-бутары, мм	1900
Длина дезинтегрирующего става, мм	3500
Длина сеющего става, мм	4500
Приёмный бункер (загрузочная часть) Д×Ш, мм	2400×2400
Труба оросительная завалочного бункера, диаметр, мм	50
Размер отверстий полиуретановых сит, мм	7–20
Шлюза мелкого наполнения 4 шт. Д×Ш, мм	8000×750
Высота трафаретов лестничных, мм	25
Ковры дражные, м ²	21
Производительность насоса 1Д800-56Б, м ³ /час.	700
Напор, развиваемый насосом, м	40

На основании представленных данных установлено, что промывочный прибор ПБШ-100 со шлюзовой приставкой обеспечивает высокую производительность и требуемую эффективность переработки песков при производительности до 100 м³/ч, что позволяет рассматривать его как эффективное техническое средство для переработки хорошо и среднепромывистых песков.

Конструктивные решения, реализованные в промывочном приборе ПБШ-100, направлены на повышение надёжности, упрощение технического обслуживания и увеличение ресурса работы оборудования в тяжёлых производственных условиях. Особое внимание при проектировании было уделено конструкции привода скруббер-бутары, износостойкости элементов, а также удобству управления и контроля за технологическим процессом. Привод скруббер-бутары осуществляется от 4 мотор-редукторов специальной конструкции, позволяющих воспринимать большие осевые нагрузки. Такое инженерное решение позволило исключить из конструкции прибора муфты и валы, ранее использовавшиеся для передачи крутящего момента от редукторов к опорным колесам. Колёса устанавливаются непосредственно на валы редукторов, что исключает использование

дополнительных валов и повышает надежность конструкции. Привод скруббер-бутары выполнен на базе пневматических колес от вилочного погрузчика, рассчитанных на большие нагрузки.

Управление прибором осуществляется через шкаф управления с частотным преобразователем. Эта система позволяет не только регулировать частоту вращения скруббер-бутары в процессе работы, но и в реальном времени отслеживать нагрузку привода с помощью сигнальных ламп. Внутренняя поверхность скруббер-бутары полностью футерована полиуретановыми лифтерами-дезинтеграторами, повышающие срок службы оборудования. Такое покрытие полностью предотвращает износ несущей поверхности и способствует эффективной дезинтеграции материала. Процесс обогащения осуществляется на четырёх шлюзах мелкого наполнения (ШМН) длиной по 8 м и шириной 0,75 м каждый, что обеспечивает достаточную площадь улавливания и высокую эффективность извлечения золота.

На рисунке 3.2 показан шкаф управления системой автоматизированного регулирования, размещенный отдельно от промывочного прибора ПБШ-100 и насосной установки. Он обеспечивает приём и регистрацию электрических параметров работы ПБШ-100, оснащённого четырьмя мотор-редукторами, а также управление насосной установкой через преобразователь частоты насосной установки. В нем размещены программируемый логический контроллер, частотный преобразователь, а также аппаратура коммутации и защиты, обеспечивающие приём сигналов от измерительных датчиков и формирование команд на изменение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки. Конструктивное исполнение шкафа управления ориентировано на эксплуатацию в полевых условиях россыпного месторождения и учитывает требования к надёжности, ремонтпригодности и устойчивости к запылённости, влажности и температурным колебаниям.



Рисунок 3.2 – Шкаф управления системой автоматизированного регулирования с сигнальной колонной

В верхней части шкафа управления установлена сигнальная колонна, предназначенная для оперативной индикации текущего состояния загрузки промывочного прибора. Применение световой индикации обусловлено необходимостью быстрого информирования машиниста экскаватора о характере загрузки в процессе подачи песков. В системе принята трёхцветная схема отображения: зелёный сигнал соответствует работе вхолостую или недостаточной

загрузке, жёлтый – нормальному режиму подачи песков, красный – перегрузке либо аварийному отклонению режима. Такое решение позволяет уменьшить запаздывание реакции оператора на изменение загрузки и способствует поддержанию стабильного режима промывки.

Наличие сигнальной индикации особенно важно при работе машиниста экскаватора, когда требуется быстро оценивать текущую загрузку промывочного прибора без постоянного обращения к панели оператора и числовым значениям контролируемых параметров. В отличие от визуальной оценки режима по косвенным признакам, световая индикация обеспечивает простую, однозначную и быстро воспринимаемую форму представления информации. Это создаёт условия для более согласованной работы машиниста экскаватора и промывочного прибора, что способствует уменьшению перегрузок и недогрузок самого прибора.

На рисунке 3.3 представлена панель оператора, предназначенная для визуализации, регистрации и архивирования параметров работы промывочного комплекса в режиме реального времени. Функционально панель оператора выполняет несколько задач:

- обеспечивает наглядное отображение текущего состояния системы и облегчает эксплуатационный контроль;
- архивирование параметров позволяет анализировать динамику режима работы за выбранный промежуток времени и сопоставлять изменения загрузки с реакцией системы регулирования;
- оператор получает возможность оценивать устойчивость процесса промывки не по косвенным визуальным признакам, а по фактически измеряемым и зарегистрированным в системе параметрам.

Применение панели оператора имеет важное значение и с точки зрения опытно-промышленной апробации разработанной системы. Именно через неё осуществлялся оперативный контроль корректности функционирования алгоритма, сопоставление текущих значений параметров с ожидаемыми режимами и проверка реакции системы на изменение загрузки. Таким образом, панель оператора служит

не только средством визуализации, но и инструментом эксплуатационной оценки работоспособности разработанной автоматизированной системы.

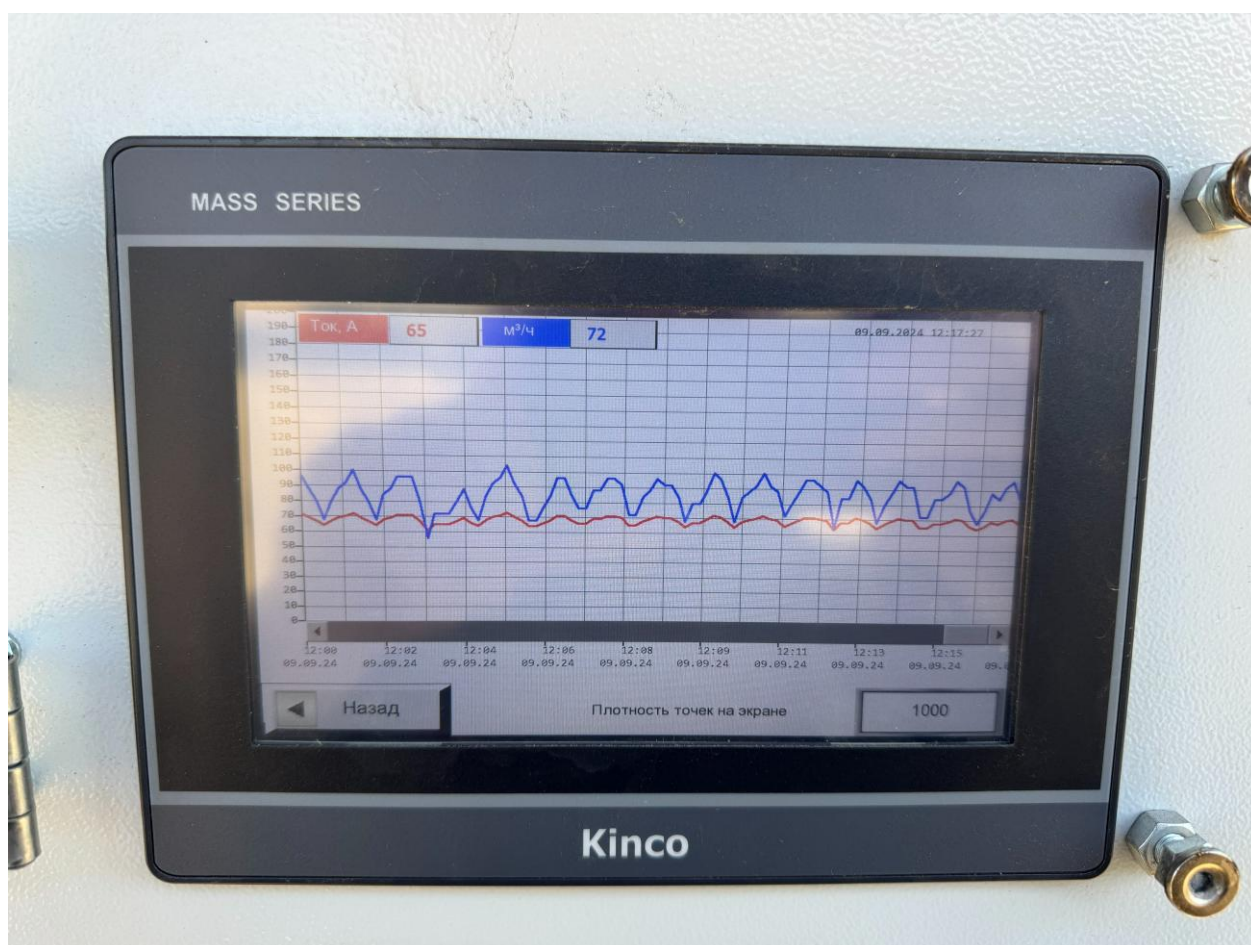


Рисунок 3.3 – Панель оператора системы автоматизированного управления

На рисунке 3.4 представлен шлюз-самородкоуловитель, используемый в составе промывочного прибора ПБШ-100. На данном приборе предусмотрена схема обогащения, разделяющая материал на фракции до 20 мм и от 20 до 70 мм. Пески крупностью $-70+20$ мм направляются на специализированный шлюз-самородкоуловитель, предназначенный для улавливания крупных частиц золота. На этом участке используется шлюз среднего наполнения, оснащённый металлическими трафаретами высотой 50 мм, что обеспечивает эффективное извлечение золота крупностью от 20 до 70 мм [100–104].



Рисунок 3.4 – Шлюз-самородкоуловитель промприбора ПБШ-100

Одним из ключевых энергетических показателей работы промывочного оборудования является удельный расход дизельного топлива на единицу переработанной горной массы [105–109]. Для количественной оценки данного показателя использовалась следующая расчётная зависимость:

$$W_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{топл}} \times \rho_{\text{топл}}}{V_{\text{песков}}}, \quad (3.1)$$

где $W_{\text{уд}}$ – удельный расход дизельного топлива, г/м³;

$V_{\text{топл}}$ – объём дизельного топлива, израсходованный за сутки, л;

$\rho_{\text{топл}}$ – плотность дизельного топлива, г/л;

$V_{\text{песков}}$ – объём переработанных песков за сутки, м³.

Для последующих расчётов плотность дизельного топлива принята равной $\rho_{\text{топл}} = 840$ г/л (0,84 кг/л). Расчёт удельного расхода дизельного топлива по формуле (3.1) выполняется отдельно для каждого исследуемого режима работы промывочного комплекса с использованием соответствующих значений суточного расхода топлива и объёма переработанных песков. Количественная оценка удельного расхода дизельного топлива для насосных установок различной мощности и сопоставление показателей до и после автоматизации приведены в главе 4.

Опытно-промышленная эксплуатация позволила оценить не только работоспособность разработанной автоматизированной системы, но и корректность реализованных алгоритмических решений в условиях изменения производительности по пескам. Полученные результаты подтвердили возможность практической реализации разработанного алгоритма автоматизированного регулирования и послужили основанием для проведения экспериментальной проверки эффективности системы в различных режимах эксплуатации промывочного комплекса.

3.3 Результаты опытно-промышленной эксплуатации разработанной системы автоматизации

Экспериментальная проверка разработанной системы автоматизации выполнена на промывочном приборе ПБШ-100 с регулируемой подачей технологической воды. Целью проверки являлась оценка работоспособности алгоритма автоматизированного регулирования в реальных производственных условиях, а также определение его влияния на устойчивость режима промывки, соотношение твёрдой и жидкой фаз в пульпе, энергопотребление насосного оборудования и технологические показатели переработки песков [110–114].

В ходе опытно-промышленной эксплуатации регистрировались параметры, характеризующие текущую загрузку промывочного прибора и режим работы

насосной установки. Особое внимание уделялось изменению расхода технологической воды при колебаниях подачи песков, поддержанию требуемого соотношения Т:Ж и снижению избыточной подачи воды в режимах неполной загрузки прибора [115–117].

Проверка системы проводилась на основе сопоставления фактических параметров работы промывочного комплекса до и после внедрения автоматизированного регулирования. Это позволило оценить степень стабилизации технологического режима, изменение энергозатрат на подачу технологической воды и влияние регулирования на эффективность работы промывочного оборудования [118–120].

Для обеспечения автоматизированного регулирования расхода технологической воды в составе комплекса использована насосная установка с частотно-регулируемым приводом электродвигателя. На рисунке 3.5 представлена насосная установка 1Д800-56Б, используемая совместно с промывочным прибором ПБШ-100.



Рисунок 3.5 – Насосная установка 1Д800-56Б

Для реализации автоматизированного регулирования были разработаны алгоритмы управления преобразователями частоты электродвигателей насосных установок, обеспечивающие динамическое изменение подачи технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного прибора.

В панели оператора шкафа управления ПБШ-100 (рисунок 3.6) предусмотрен раздел настроек, позволяющий выполнять настройку параметров регулирования соотношения Т:Ж путём задания выходной частоты преобразователя частоты насосной установки при различных значениях производительности прибора.



Рисунок 3.6 – Панель оператора (меню настройки насоса)

Настройка параметров регулирования через панель оператора обеспечила адаптацию режима подачи технологической воды к текущей производительности прибора. Внедрение автоматизированной системы управления на установке ПБШ-

100 позволило улучшить технологические и энергетические показатели процесса. Важнейшим результатом стало поддержание стабильного режима обогащения по параметру Т:Ж. При изменении производительности прибора по пескам система оперативно регулирует подачу технологической воды, поддерживая требуемое соотношение твёрдой и жидкой фаз в пределах установленных норм.

На рисунках 3.7 и 3.8 отражены изменения производительности по пескам и расхода технологической воды при использовании насосов с электродвигателями номинальной мощностью 55 и 110 кВт в зависимости от загрузки промывочного прибора. На графиках видно, что изменения производительности прибора по пескам приводит к синхронному снижению подачи воды, колебания подачи воды позволяют снижать колебания Т: Ж. Эти колебания связаны с динамикой загрузки подачи песков, но система работает в пределах нормы, обеспечивая минимальные отклонения. График энергопотребления насоса показывает пульсирующую динамику с регулярным снижением и повышением значений. Пульсации связаны с изменениями нагрузки и согласуются с циклом подачи песков.

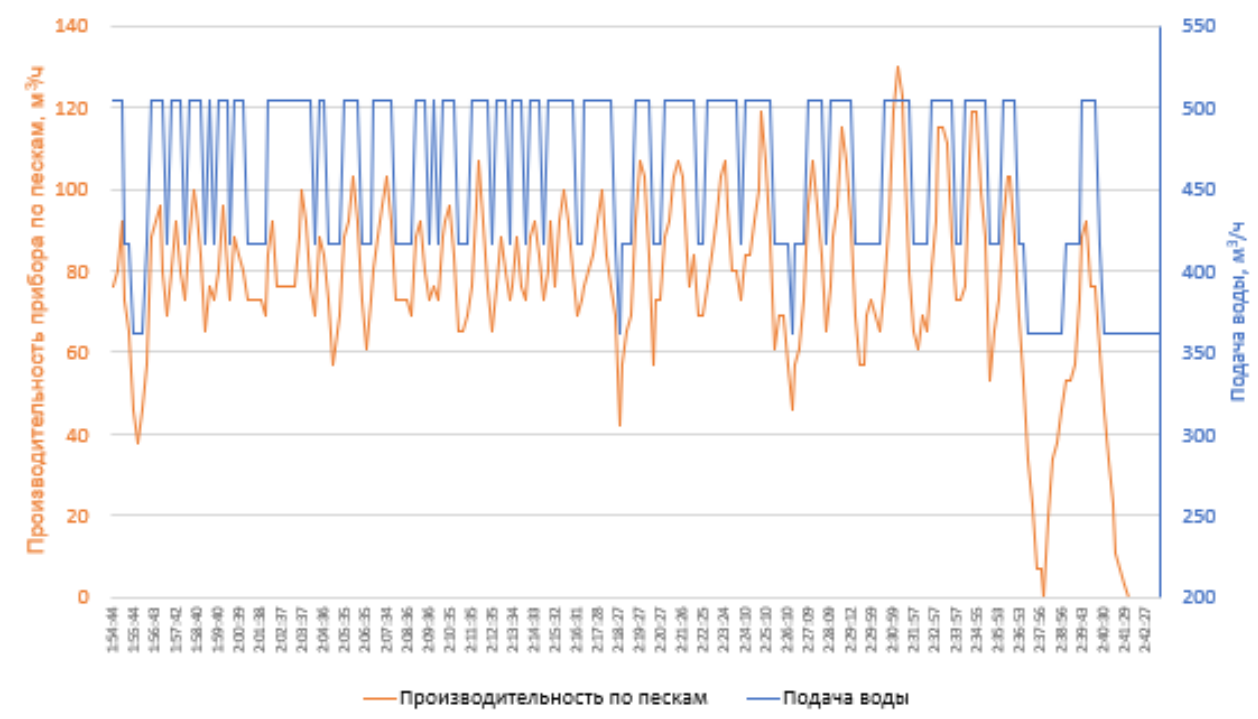


Рисунок 3.7 – Изменение производительности по пескам и расхода технологической воды при работе насоса 1Д800-56Б (55 кВт)

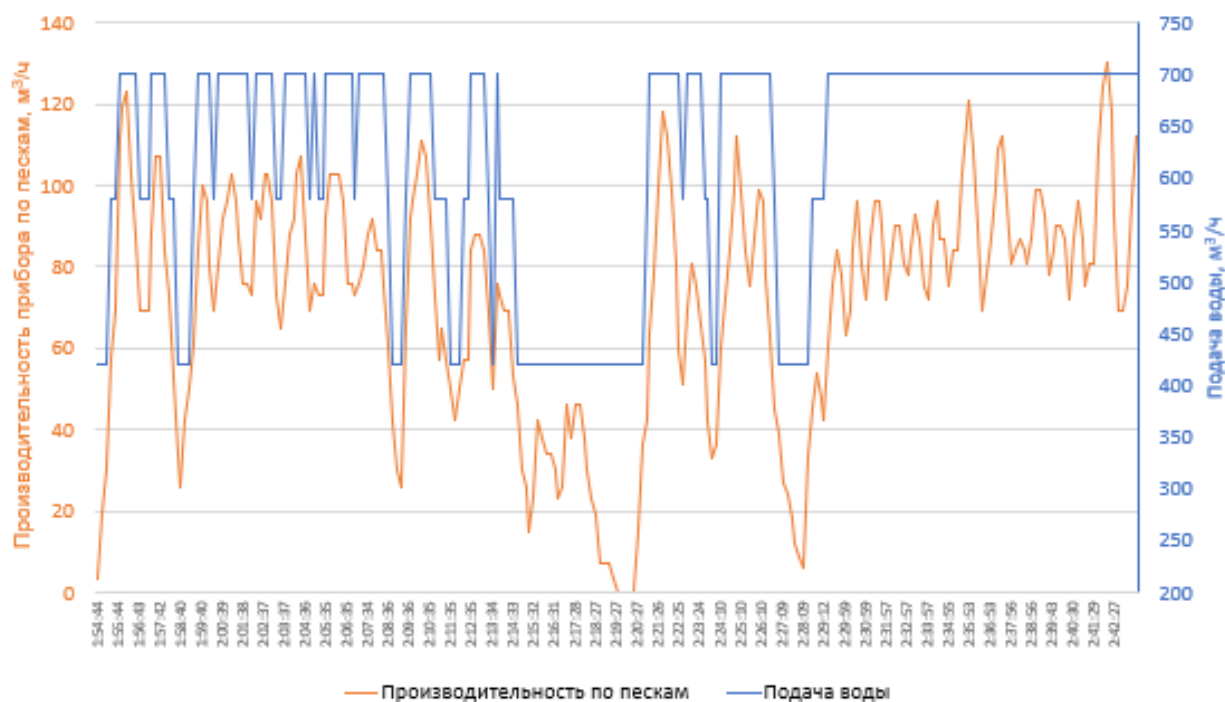


Рисунок 3.8 – Изменение производительности по пескам и расхода технологической воды при работе насоса 1Д800-56Б (110 кВт)

Полученные результаты показывают, что автоматическое регулирование подачи технологической воды обеспечивает изменение расхода технологической воды в соответствии с текущей загрузкой промывочного прибора, снижает разброс параметра Т:Ж и уменьшает энергопотребление насосного оборудования. Тем самым подтверждается работоспособность разработанного алгоритма регулирования в производственных условиях.

Дополнительным направлением повышения устойчивости процесса промывки являлось выравнивание распределения пульпы по шлюзам мелкого наполнения. С этой целью на выходе из эфельной ванны прибора были установлены шиберы, позволяющие регулировать распределение потока материала между шлюзами и создавать более равномерные условия разделения.

Анализ результатов показал, что регулирование положения шиберов способствует выравниванию соотношения твёрдой и жидкой фаз по отдельным шлюзам и формированию более стабильных условий разделения золота.

Анализ внедрения данной системы показал, что установка шибера и последующая регулирование потока материала на шлюзах на основе данных эксперимента по измерению Т:Ж на каждом шлюзе позволяет сделать вывод о значимости управления потоком материала в процессе разделения и обогащения россыпного золота. Это дает возможность повысить эффективность работы и снизить потери драгоценных металлов, что является важным аспектом для успешной добычи и производства золота.

На рисунке 3.9 показано изменение соотношения твёрдого и жидкого фаз (Т:Ж) на шлюзах до (синий цвет) и после регулировки с помощью шиберов (оранжевый цвет). Наиболее заметное улучшение наблюдается на третьем шлюзе – разброс Т:Ж сократился более чем в два раза. Аналогичная тенденция отмечена и на остальных шлюзах мелкого наполнения (ШМН), где разброс показателя не превышал 37 %. Это свидетельствует о повышении равномерности распределения пульпы и создании более стабильных условий для разделения золота.

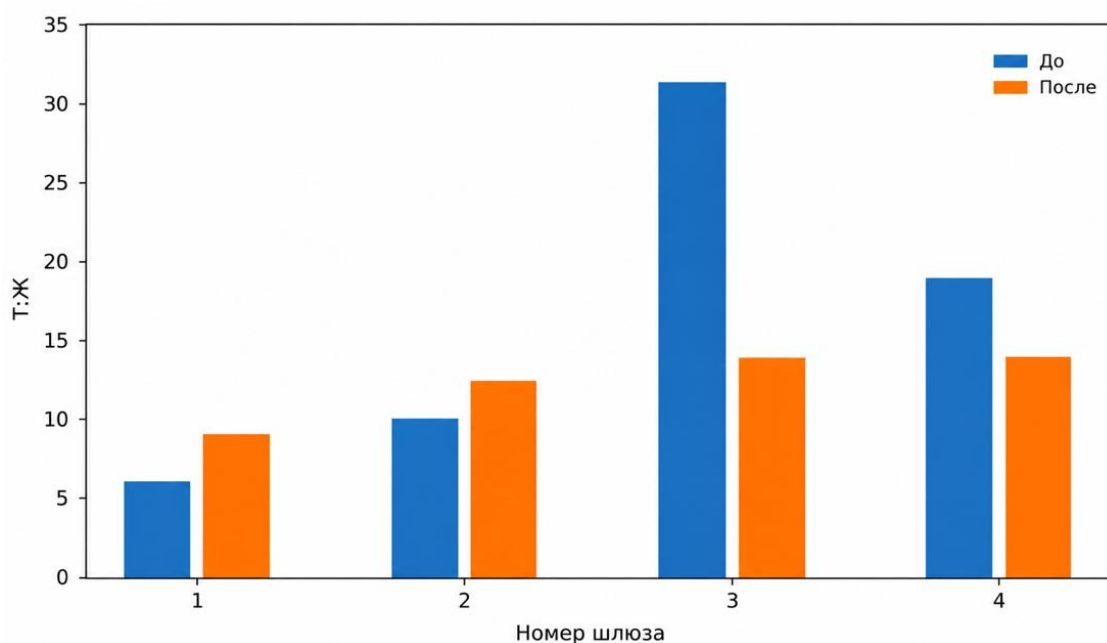


Рисунок 3.9 – Разница в Т:Ж до и после установки шибера

Дополнительно в ходе экспериментальной проверки подтверждён энергосберегающий эффект автоматического регулирования подачи

технологической воды. Как показано таблице 2.6, применение частотного регулирования позволило снизить среднюю потребляемую мощность насосного оборудования приблизительно на 46 % для насоса с электродвигателем 55 кВт и на 50 % для насоса с электродвигателем 110 кВт. Указанные результаты подтверждают, что адаптация подачи технологической воды к текущей загрузке прибора обеспечивает не только стабилизацию параметра Т:Ж, но и снижение энергозатрат на работу насосных установок.

Проведённая экспериментальная проверка показала, что внедрённые технические решения обеспечивают стабильную, надёжную и экономичную работу как насосного оборудования, так и промывочного прибора ПБШ-100 в целом. Испытания на приборе ПБШ-100 подтвердили корректность выбранного подхода и его высокую эффективность, снижение энергопотребления насосного оборудования до 50 %, стабилизацию технологических процессов, рост извлечения, а также повышение оперативности управления за счёт применения световой индикации загрузки промывочного прибора.

Полученные результаты подтверждают, что регулирование расхода технологической воды по измеряемому параметру, отражающему текущую загрузку оборудования, обеспечивает устойчивую работу промывочного комплекса в пределах рабочего диапазона режимов, повышение энергоэффективности процесса промывки и улучшение технологических показателей переработки песков.

3.4 Выводы к главе 3

1. Разработана структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления процессами подачи песков и расхода технологической воды промывочного комплекса, включающая подсистемы измерения, формирования расчётного значения расхода технологической воды.

2. Реализован алгоритм адаптивного регулирования расхода технологической воды на базе измеряемых параметров электроприводов и частотного управления

насосным агрегатом с учётом эксплуатационных ограничений по минимальной выходной частоте преобразователя частоты насосной установки и обеспечению минимально допустимого расхода технологической воды на узлы загрузки и шлюзы.

3. Обоснованы ограничения и условия перехода в безопасные режимы, обеспечивающие предотвращение перегрузок оборудования и исключение работы в областях, выходящих за границы применимости идентифицированных зависимостей.

4. По результатам опытно-промышленной эксплуатации подтверждена работоспособность разработанной системы, обеспечена стабильность режима промывки на шлюзах и достигнуто снижение энергопотребления насосного оборудования.

5. Экспериментально подтверждено, что регулирование положения шиберов на выходе из эфельной ванны способствует выравниванию параметра Т:Ж по шлюзам мелкого наполнения и формированию более стабильных условий разделения золота.

6. Установлено, что применение панели оператора и световой индикации загрузки повышает оперативность контроля и управления технологическим режимом промывочного комплекса в производственных условиях.

4 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Технико-экономическая оценка выполнена с целью определения эффективности внедрения разработанной автоматизированной системы регулирования расхода технологической воды и оценки экономической целесообразности её применения на действующих промывочных комплексах.

Исходные данные для расчёта экономического эффекта получены в ходе экспериментальных исследований на россыпном месторождении золота руч. Хребтовый. В разные периоды на одном и том же участке промывки применялись насосы мощностью 55 кВт при работе прибора без шлюза-самородкоуловителя и 110 кВт – при работе со шлюзом-самородкоуловителем. До установки автоматизированного шкафа управления насосы работали в режиме фиксированной подачи, при котором потребляемая мощность оставалась практически постоянной независимо от текущей загрузки промывочного прибора перерабатываемым материалом. После внедрения автоматики выполнялась настройка параметров работы насосов, что обеспечило снижение потребления электроэнергии в зависимости от производственной загрузки промывочного прибора в автоматическом режиме.

Регистрация данных, отображаемых на панели шкафа управления, а также их последующая выгрузка в Excel-таблицы для дальнейшего анализа производились с шагом 5 секунд. Фиксировались ток нагрузки электропривода промывочного прибора, выходная частота преобразователя частоты насосной установки, активная электрическая мощность насосной установки, расход технологической воды и соотношение твёрдой и жидкой фаз на шлюзах. Сопоставление этих показателей до и после внедрения автоматизированной системы управления позволило определить изменение эксплуатационных и экономических показателей работы насосных установок.

Источником электроэнергии в обоих вариантах являлась дизельная электростанция мощностью 160 кВт. Средняя потребляемая мощность

электропривода ПБШ-100 составляла 36 кВт и не зависела от количества подаваемой технологической воды. Потребляемая мощность привода ПБШ-100 в сравниваемых режимах оставалась практически постоянной, поэтому в расчёте экономического эффекта учитывались только изменения затрат, связанных с работой насосных установок.

Поскольку закупка дизельного топлива в условиях удалённого расположения артели осуществляется по массе, стоимостные показатели в настоящей главе определялись по расходу топлива в тоннах. При этом суточный расход топлива в таблицах 4.1 и 4.2 приведён в литрах как эксплуатационный показатель режима работы насосных установок $V_{\text{сут}}$, средний объём переработанных песков Q и сезонные затраты на обслуживание насосного оборудования R , полученные по результатам опытно-промышленной эксплуатации до и после внедрения автоматизированного управления. Продолжительность промывочного сезона принималась равной $T_{\text{сез}} = 150$ сут., плотность дизельного топлива $\rho = 0,84$ кг/л, стоимость дизельного топлива $C_{\text{топл}} = 100\,000$ руб./т.

Для перевода объёма дизельного топлива за сезон в массу использовалась формула:

$$G_{\text{сез}} = \frac{\rho \times V_{\text{сут}} \times T_{\text{сез}}}{1000}, \quad (4.1)$$

где $G_{\text{сез}}$ – расход дизельного топлива за промывочный сезон, т;

$V_{\text{сут}}$ – суточный расход дизельного топлива, л/сут;

ρ – плотность дизельного топлива, кг/л;

$T_{\text{сез}}$ – продолжительность промывочного сезона, сут.

Стоимость топлива за сезон определялась по выражению:

$$S_{\text{сез}} = G_{\text{сез}} \times C_{\text{топл}}, \quad (4.2)$$

где $S_{\text{сез}}$ – стоимость дизельного топлива за промывочный сезон, руб.;

$C_{\text{топл}}$ – стоимость 1 т дизельного топлива, руб./т.

Перевод суточного расхода дизельного топлива в массу определялась по выражению:

$$m_{\text{сут}} = \rho \times V_{\text{сут}}, \quad (4.3)$$

где $m_{\text{сут}}$ – масса дизельного топлива, израсходованного за сутки, кг/сут.

Для расчёта удельного расхода топлива на 1 м³ используется формула:

$$q = \frac{1000 \times m_{\text{сут}}}{Q}, \quad (4.4)$$

где q – удельный расход дизельного топлива, г/м³;

Q – средний объём переработанных песков за сутки, м³/сут.

Сезонные затраты на обслуживание насосных установок принимались по данным производственного учёта и укрупнённой оценке расходов на текущий ремонт, замену изнашиваемых элементов и устранение внеплановых ремонтов в течение промывочного сезона.

Для насосной установки мощностью 55 кВт в качестве исходных величин принимались $V_{\text{сут, до}} = 410$ л/сут, $V_{\text{сут, после}} = 271,4$ л/сут, $Q = 1450$ м³/сут, $R_{\text{до}} = 800\,000$ руб./сезон и $R_{\text{после}} = 600\,000$ руб./сезон. Тогда сезонный расход топлива до автоматизации составил:

$$G_{\text{до}} = \frac{0,84 \times 410 \times 150}{1000} = 51,66 \text{ т.}$$

После автоматизации сезонный расход дизельного топлива составил:

$$G_{\text{после}} = \frac{0,84 \times 271,4 \times 150}{1000} = 34,20 \text{ т.}$$

Стоимость топлива за сезон при этом составила:

$$S_{\text{до}} = 51,66 \times 100\,000 = 5\,166\,000 \text{ руб.},$$

$$S_{\text{после}} = 34,20 \times 100\,000 = 3\,420\,000 \text{ руб.}$$

Суточный расход топлива в массовом выражении составил:

$$m_{\text{сут, до}} = 0,84 \times 410 = 344,4 \text{ кг/сут.},$$

$$m_{\text{сут, после}} = 0,84 \times 271,4 = 228,0 \text{ кг/сут.}$$

Удельный расход дизельного топлива до и после автоматизации составил соответственно:

$$q_{\text{до}} = \frac{1000 \times 344,4}{1450} = 237,5 \approx 238 \text{ г/м}^3,$$

$$q_{\text{после}} = \frac{1000 \times 228,0}{1450} = 157,2 \approx 157 \text{ г/м}^3.$$

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ эксплуатационных и экономических показателей насосной установки 55 кВт до и после автоматизации

Показатель	До автоматизации	После автоматизации
Расход топлива, л/сут	410	271,4
Расход топлива за сезон, т	51,66	34,20
Стоимость топлива за сезон, руб.	5 166 000	3 420 000
Средний объём переработанных песков, м ³ /сут	1450	1450
Удельный расход, г/м ³	238	157
Расходы на обслуживание, руб./сезон	800 000	600 000

Для насосной установки мощностью 110 кВт в качестве исходных величин принимались $V_{\text{сут, до}} = 640 \text{ л/сут}$, $m_{\text{сут, после}} = 370 \text{ л/сут}$, $Q = 2200 \text{ м}^3/\text{сут}$, $R_{\text{до}} = 1\,000\,000 \text{ руб./сезон}$ и $R_{\text{после}} = 700\,000 \text{ руб./сезон}$. Тогда сезонный расход топлива до автоматизации составил:

$$G_{\text{до}} = \frac{0,84 \times 640 \times 150}{1000} = 80,64 \text{ т.}$$

После автоматизации сезонный расход дизельного топлива составил:

$$G_{\text{после}} = \frac{0,84 \times 370 \times 150}{1000} = 46,62 \text{ т.}$$

Стоимость топлива за сезон при этом составила:

$$S_{\text{до}} = 80,64 \times 100\,000 = 8\,064\,000 \text{ руб.},$$

$$S_{\text{после}} = 46,62 \times 100\,000 = 4\,662\,000 \text{ руб.}$$

Суточный расход топлива в массовом выражении составил:

$$m_{\text{сут, до}} = 0,84 \times 640 = 537,6 \text{ кг/сут.},$$

$$m_{\text{сут, после}} = 0,84 \times 370 = 310,8 \text{ кг/сут.}$$

Удельный расход дизельного топлива до и после автоматизации составил соответственно:

$$q_{\text{до}} = \frac{1000 \times 537,6}{2200} = 244,4 \approx 244 \text{ г/м}^3,$$

$$q_{\text{после}} = \frac{1000 \times 310,8}{2200} = 141,3 \approx 141 \text{ г/м}^3.$$

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ эксплуатационных и экономических показателей насосной установки 110 кВт до и после автоматизации

Показатель	До автоматизации	После автоматизации
Расход топлива, л/сут	640	370
Расход топлива за сезон, т	80,64	46,62
Стоимость топлива за сезон, руб.	8 064 000	4 662 000
Средний объём переработанных песков, м ³ /сут	2200	2200
Удельный расход, г/м ³	244	141
Расходы на обслуживание, руб./сезон	1 000 000	700 000

На основании данных таблиц 4.1 и 4.2 выполнен расчёт экономического эффекта за промысловый сезон по следующим направлениям: экономия по дизельному топливу, снижение затрат на обслуживание, капитальные затраты на автоматизацию, срок окупаемости и коэффициент экономической эффективности.

Для расчёта суммарной экономии за промывочный сезон по топливу использовалась формула:

$$\Delta E_{\text{топл}} = (G_{\text{до}} - G_{\text{после}}) \times C_{\text{топл}}, \quad (4.5)$$

где $G_{\text{до}}, G_{\text{после}}$ – сезонный расход диз. топлива до и после автоматизации, т.

Для расчёта снижения затрат на обслуживание использовалась формула:

$$\Delta E_{\text{обслуживание}} = R_{\text{до}} - R_{\text{после}}, \quad (4.6)$$

где $R_{\text{до}}, R_{\text{после}}$ – сезонные затраты на обслуживание насосной установки до и после внедрения автоматизированной системы управления, руб.

Для расчёта суммарного экономического эффекта за промывочный сезон использовалась формула:

$$E_{\text{сез}} = \Delta E_{\text{топл}} + \Delta E_{\text{обслуживание}}. \quad (4.7)$$

Эксплуатация промывочного прибора в обоих рассматриваемых режимах осуществлялась одним оператором промывочного прибора (прибористом). Внедрение автоматизированной системы управления не сопровождалось сокращением численности персонала и не изменяло принятую организацию обслуживания промывочного комплекса. В связи с этим экономия по фонду оплаты труда в расчёт суммарного экономического эффекта не включалась. Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления определялся за счёт снижения расхода дизельного топлива и уменьшения затрат на обслуживание насосного оборудования. Расчёт экономии по дизельному топливу для насосных установок мощностью 55 и 110 кВт приведён в таблице 4.3, а расчёт снижения затрат на обслуживание насосного оборудования в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – Расчёт экономии по дизельному топливу

Насос	Расчёт
Насос 55 кВт	$51,66 - 34,20 = 17,46 \text{ т}$ $17,46 \times 100\,000 = 1\,746\,000 \text{ руб.}$
Насос 110 кВт	$80,64 - 46,62 = 34,02 \text{ т}$ $34,02 \times 100\,000 = 3\,402\,000 \text{ руб.}$

Таблица 4.4 – Снижение затрат на обслуживание

Насос	Расчёт
Насос 55 кВт	$800\,000 - 600\,000 = 200\,000 \text{ руб.}$
Насос 110 кВт	$1\,000\,000 - 700\,000 = 300\,000 \text{ руб.}$

Для насоса 55 кВт экономия по дизельному топливу составила:

$$\Delta E_{\text{топл, 55}} = (51,66 - 34,20) \times 100\,000 = 1\,746\,000 \text{ руб.}$$

Снижение затрат на обслуживание составило:

$$\Delta E_{\text{обслуживание, 55}} = 800\,000 - 600\,000 = 200\,000 \text{ руб.}$$

Суммарный экономический эффект за сезон для насоса 55 кВт равен:

$$E_{\text{сез, 55}} = 1\,746\,000 + 200\,000 = 1\,946\,000 \text{ руб.}$$

Для расчёта срока окупаемости использовались формулы:

$$E_{\text{мес}} = \frac{E_{\text{сез}}}{n_{\text{сез}}}, \quad (4.8)$$

где $E_{\text{сез}}$ – экономический эффект за сезон, руб.;

$n_{\text{сез}}$ – продолжительность промывочного сезона, мес.;

$E_{\text{мес}}$ – среднемесячный экономический эффект, руб./мес.;

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{мес}}}, \quad (4.9)$$

где K – капитальные вложения, руб.;

$T_{ок}$ – срок окупаемости, мес.

При капитальных вложениях $K_{55} = 1\,300\,000$ руб. среднемесячный экономический эффект составил:

$$E_{мес, 55} = \frac{1\,946\,000}{5} = 389\,200 \text{ руб./мес.}$$

Срок окупаемости:

$$T_{ок, 55} = \frac{1\,300\,000}{389\,200} = 3,34 \text{ мес.}$$

Для расчёта коэффициента экономической эффективности использовалась формула:

$$K_{ээ} = \frac{E_{сез}}{K}, \quad (4.10)$$

где $K_{ээ}$ – коэффициент экономической эффективности.

$$K_{ээ, 55} = \frac{1\,946\,000}{1\,300\,000} = 1,50.$$

Для насоса 110 кВт экономия по дизельному топливу составила:

$$\Delta E_{топл, 110} = (80,64 - 46,62) \times 100\,000 = 3\,402\,000 \text{ руб.,}$$

Снижение затрат на обслуживание составило:

$$\Delta E_{обслуживание, 110} = 1\,000\,000 - 700\,000 = 300\,000 \text{ руб.}$$

Суммарный экономический эффект за сезон для насоса 110 кВт равен:

$$E_{сез, 110} = 3\,402\,000 + 300\,000 = 3\,702\,000 \text{ руб.}$$

При капитальных вложениях $K_{110} = 1\,450\,000$ руб. среднемесячный экономический эффект составил:

$$E_{мес, 110} = \frac{3\,702\,000}{5} = 740\,400 \text{ руб./мес.}$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок, 110}} = \frac{1\,450\,000}{740\,400} = 1,96 \text{ мес.}$$

Коэффициент экономической эффективности для насоса 110 кВт составил:

$$K_{\text{ээ, 110}} = \frac{3\,702\,000}{1\,450\,000} = 2,55.$$

В таблице 4.5 представлены сводные показатели экономической эффективности внедрения автоматизированной системы управления насосными установками.

Таблица 4.5 – Сводные показатели экономической эффективности внедрения автоматизированной системы управления насосными установками

Показатель	Ед. изм.	Насос 55 кВт	Насос 110 кВт
Экономия по топливу	млн руб.	1,75	3,40
Снижение затрат на обслуживание	млн руб.	0,20	0,30
Общая экономия за сезон	млн руб.	1,95	3,70
Капитальные вложения	млн руб.	1,30	1,45
Срок окупаемости	мес.	3,34	1,96
Коэффициент экономической эффективности	–	1,50	2,55
Снижение расхода дизельного топлива	%	33,8	42,2

Следует отметить, что в представленную оценку не включён дополнительный экономический эффект, связанный с возможным повышением извлечения золота при снижении колебаний соотношения Т:Ж. Поэтому приведённые значения экономического эффекта учитывают снижение расхода дизельного топлива и уменьшение затрат на обслуживание насосного оборудования.

Результаты расчёта показали, что внедрение автоматизированной системы управления обеспечивает выраженный экономический эффект за счёт снижения расхода дизельного топлива и уменьшения затрат на обслуживание насосного оборудования. Для насосной установки мощностью 55 кВт суммарный экономический эффект за промывочный сезон составил 1 946 000 руб. при

капитальных вложениях 1 300 000 руб. Срок окупаемости составил 3,34 месяца, а коэффициент экономической эффективности – 1,50.

Для насосной установки мощностью 110 кВт суммарный экономический эффект за промывочный сезон составил 3 702 000 руб. при капитальных вложениях 1 450 000 руб. Срок окупаемости составил 1,96 месяца, а коэффициент экономической эффективности – 2,55.

Сопоставление полученных результатов показывает, что применение автоматизированного регулирования расхода технологической воды экономически целесообразно для обоих рассмотренных вариантов насосных установок, однако наибольший абсолютный экономический эффект достигается при эксплуатации насоса мощностью 110 кВт. Это обусловлено большей исходной энергоёмкостью режима его работы и, соответственно, более значительным потенциалом снижения топливных затрат при переходе от фиксированной подачи к адаптивному регулированию.

Практическая значимость разработанной системы особенно возрастает в условиях удалённого расположения россыпных объектов, где доля топливных и эксплуатационных затрат в себестоимости промывки является повышенной, а снижение расхода топлива и сокращение объёма ремонтных воздействий приобретают дополнительное производственное значение.

Таким образом, автоматизация насосных установок промывочного комплекса подтвердила свою эффективность как с технологической, так и с экономической точки зрения. Реализованный подход обеспечивает снижение эксплуатационных затрат, повышение устойчивости работы оборудования и может быть рекомендован для внедрения на аналогичных промывочных комплексах, работающих в условиях неравномерной подачи песков и автономного энергоснабжения.

4.1 Выводы по главе 4

1. Установлено, что при эксплуатации насосной установки с электродвигателем мощностью 55 кВт снижение расхода дизельного топлива

составило 33,8 %, а суммарный экономический эффект за промывочный сезон достиг 1 946 000 руб. при капитальных вложениях 1 300 000 руб. Срок окупаемости составил 3,34 месяца, коэффициент экономической эффективности – 1,50.

2. Для насосной установки с электродвигателем мощностью 110 кВт показано снижение расхода дизельного топлива на 42,2 %, а суммарный экономический эффект за промывочный сезон составил 3 702 000 руб. при капитальных вложениях 1 450 000 руб. Срок окупаемости составил 1,96 месяца, коэффициент экономической эффективности – 2,55.

3. Установлено, что основной вклад в экономический эффект внедрения автоматизированной системы управления вносит снижение расхода дизельного топлива, тогда как дополнительный эффект обеспечивается уменьшением затрат на обслуживание насосного оборудования.

4. Показано, что экономический эффект внедрения автоматизированной системы управления формируется за счёт снижения расхода дизельного топлива и уменьшения затрат на обслуживание насосного оборудования, при этом дополнительный экономический эффект, связанный с возможным увеличением извлечения мелкого и тонкого золота при снижении колебаний соотношения Т:Ж, в расчёте не учитывался.

5. Подтверждена экономическая целесообразность внедрения автоматизированной системы управления насосными установками на промывочных комплексах, эксплуатируемых в условиях удалённого расположения и высокой доли топливных и эксплуатационных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-практическая задача повышения эффективности процесса промывки золотосодержащих песков при разработке россыпных месторождений золота на основе обоснования параметров автоматизированной системы управления процессами подачи песков и регулирования расхода технологической воды в соответствии с текущей загрузкой промывочного комплекса.

В процессе исследований получены следующие научные и научно-практические результаты.

1. Установлена количественная зависимость между током нагрузки электропривода промывочного прибора и производительностью по пескам, позволяющая выполнять расчётную оценку текущей производительности без применения специализированных средств её непрерывного измерения.

2. Получены зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам для насосных установок с электродвигателями номинальной мощностью 55 и 110 кВт, используемые для формирования требуемого режима подачи технологической воды при изменении текущей производительности промывочного комплекса.

3. Сформирована расчётная основа алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды, включающая последовательное определение производительности по пескам по току нагрузки, расчёт требуемого расхода технологической воды и определение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки с учётом установленного рабочего диапазона 35–50 Гц и эксплуатационных ограничений.

4. Разработаны структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления и алгоритм автоматизированного регулирования расхода технологической воды, обеспечивающие адаптацию расхода технологической воды к текущей производительности промывочного комплекса в условиях неравномерной подачи песков.

5. Опытнo-промышленная эксплуатация разработанной автоматизированной системы на промывочном комплексе ПБШ-100 подтвердила её работоспособность в производственных условиях. Применение автоматизированного регулирования обеспечило повышение устойчивости технологического режима и снижение средней потребляемой электрической мощности насосного оборудования приблизительно на 46 % для насоса мощностью 55 кВт и на 50 % для насоса мощностью 110 кВт при сохранении требуемой производительности по пескам.

6. Установлено, что применение автоматизированного регулирования расхода технологической воды обеспечивает снижение расхода дизельного топлива на 33,8 % для насосной установки с электродвигателем мощностью 55 кВт и на 42,2 % для насосной установки с электродвигателем мощностью 110 кВт.

7. По результатам технико-экономической оценки подтверждена экономическая эффективность внедрения разработанной автоматизированной системы управления. Полученные результаты свидетельствуют о практической применимости разработанной системы при модернизации действующих и создании новых промывочных комплексов, особенно в условиях удалённого расположения объектов и высокой доли эксплуатационных затрат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лешков, В. Г. Разработка россыпных месторождений : учебник для студентов вузов / В. Г. Лешков ; Московский государственный горный университет. – Москва : Горная книга : Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 906 с.
2. Андреева, Г. С. Переработка и обогащение полезных ископаемых россыпных месторождений : учебник / Г. С. Андреева, С. Я. Горюшкина, В. П. Небера. – Москва : Недра, 1992. – 410 с.
3. Васюта, А. Д. Анализ работы шлюзовых промывочных приборов и оценка их энергоемкости / А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // Проблемы недропользования. – 2023. – № 2 (37). – С. 32–39. – DOI 10.25635/2313-1586.2023.02.032.
4. Сулин, Г. А. Техника и технология разработки россыпей открытым способом / Г. А. Сулин. – Москва : Недра, 1974. – 232 с.
5. Silva, M. A. Placer Gold Recovery Methods / M. A. Silva. – Sacramento : California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, 1986. – 32 p.
6. Шило, Н. А. Основы учения о россыпях / Н. А. Шило ; отв. ред. В. И. Смирнов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Наука, 1985. – 400 с.
7. Россыпные месторождения России и других стран СНГ : минерагения, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы / отв. ред. Н. П. Лаверов, Н. Г. Патык-Кара. – Москва : Научный мир, 1997. – 454 с.
8. Бондаренко, Н. Г. Образование, строение и разведка россыпей / Н. Г. Бондаренко. – Москва : Недра, 1975. – 56 с.
9. АСУ ТП – обязательный атрибут современных ОФ // Добывающая промышленность. – 2024. – № 4. – 3 сентября. – URL: <https://dprom.online/processing/asu-tp-obyazatelnyj-atribut-sovremennyh-of/> (дата обращения: 25.04.2025).

10. Equipment and Operations Automation in Mining : A Review / M. Long, S. Schafrik, P. Kolapo, Z. Agioutantis, J. Sottile // *Machines*. – 2024. – Vol. 12, no. 10. – Article 713. – DOI 10.3390/machines12100713.
11. Внедрение SCADA-системы на золотоизвлекательной фабрике в Киргизии // Силумин-Восток. – URL: <https://www.silumin.kz/kompaniya/novosti/2020/09/02/vnedrenie-scada-sistemyi-na-zolotoizvlekatelnoj-fabrike-v-kirgizii/> (дата обращения: 25.04.2025).
12. Бабий, Ю. И. Опыт дистанционного сбора данных работы горного оборудования при разработке россыпного месторождения золота. Часть 1 / Ю. И. Бабий, В. И. Москалевич, В. Г. Пятаков // *Золотодобыча*. – 2022. – № 1 (278). – URL: <https://zolotodb.ru/article/12759> (дата обращения: 01.04.2025).
13. Алексеев, В. С. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа / В. С. Алексеев, Р. С. Серый, А. А. Соболев // *Обогащение руд*. – 2019. – № 5. – С. 13–18. – DOI 10.17580/or.2019.05.03.
14. Журавлев, К. А. Анализ факторов, влияющих на потери драгоценных металлов при разработке россыпных месторождений / К. А. Журавлев, А. Д. Васюта // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 12-2. – С. 53–63. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_122_0_53.
15. Серый, Р. С. Обоснование параметров автоматизированной системы управления подачей песков на перерабатывающем комплексе при эксплуатации россыпных месторождений золота / Р. С. Серый, А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // *Горная промышленность*. – 2026. – № 2. – С. 129–134. – DOI 10.30686/1609-9192-2026-2-129-134.
16. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю. С. Будилин, Н. А. Вашко, В. А. Джобадзе [и др.] ; под ред. И. Б. Флерова, В. И. Куторгина. – Москва : ЦНИГРИ : НТК «Геоэксперт», 1992. – 286 с.
17. Агошков, М. И. Разработка рудных и россыпных месторождений : учебник / М. И. Агошков, С. С. Борисов, В. А. Боярский. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1962. – 680 с.

18. Лешков, В. Г. Справочник дражника / В. Г. Лешков. – Москва : Недра, 1968. – 496 с.
19. Богданов, Е. И. Оборудование для транспорта и промывки песков россыпей / Е. И. Богданов. – Москва : Недра, 1978. – 240 с.
20. Емельянов, В. И. Основные направления развития россыпной золотодобычи в Российской Федерации / В. И. Емельянов, В. В. Гудовичев // Открытые горные работы. – 2000. – № 2. – С. 28–31.
21. Инструкция по нормированию технологических потерь золота при промывке золотосодержащих песков на промывочных приборах / Восточный научно-исследовательский институт золота и редких металлов ; сост. Н. П. Лавров, В. В. Милентьев, Ф. Ф. Умрихин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Магадан : Кордис, 2004. – 19 с.
22. Серый, Р. С. Анализ работы шлюзовых промывочных приборов при отработке россыпных месторождений золота Хабаровского края / Р. С. Серый // Недра ДВ. – 2018. – 19 января. – URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_industry?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4abb4ca (дата обращения: 16.04.2026).
23. Серый, Р. С. Оценка эффективности работы шлюзовых промывочных приборов при отработке месторождения с мелким и пластинчатым золотом / Р. С. Серый, В. С. Алексеев, П. П. Сас // Золото и технологии. – 2015. – № 1 (27). – С. 104–107.
24. Чебан, А. Ю. Повышение эффективности освоения маломасштабных месторождений путем снижения потерь золота при промывке песков / А. Ю. Чебан // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 4. – С. 5–13. – DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-4-5-13.
25. Производство золота в России // Золотодобыча. – 2015. – 20 июля. – URL: <https://zolotodb.ru/article/10922/?page=all> (дата обращения: 20.03.2025).
26. Таракановский, В. И. Россыпная золотодобыча в России : состояние, проблемы и решения / В. И. Таракановский // Золотодобыча. – 2021. – 21 июля. – URL: <https://zolotodb.ru/article/12605/?page=all> (дата обращения: 15.05.2025).

27. Луняшин, П. Д. Нужна ли России россыпная золотодобыча? / П. Д. Луняшин // Золото и технологии. – 2023. – № 2 (60). – URL: https://zolteh.ru/opinions/nuzhna_li_rossii_rossypnaya_zolotodobycha/ (дата обращения: 20.03.2025).
28. Заернюк, В. М. Тенденции, проблемы и перспективы развития золотодобывающей отрасли России / В. М. Заернюк, Л. И. Черникова, Ю. В. Забайкин // Финансовая аналитика : проблемы и решения. – 2017. – Т. 10, № 9 (339). – С. 972–986. – DOI 10.24891/fa.10.9.972.
29. Руйга, И. Р. Золотодобывающая промышленность России : тенденции, проблемы и перспективы развития / И. Р. Руйга, Ю. А. Тетерин // Инновационная наука. – 2015. – № 12-1. – С. 247–252.
30. Добыча золота в России : итоги 2023 года и перспективы на 2030 // MiningWorld Russia. – 2024. – 6 августа. – URL: <https://miningworld.ru/ru/media/news/2024/august/06/zolotodobyvayushchaya-promyshlennost-rossii/> (дата обращения: 10.03.2025).
31. Литвинцев, В. С. О ресурсном потенциале техногенных золотороссыпных месторождений / В. С. Литвинцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 1. – С. 118–126.
32. Рассказов, И. Ю. Ресурсная база техногенных россыпных месторождений и основные направления их освоения / И. Ю. Рассказов, В. С. Литвинцев, Ю. А. Мамаев // Золотодобывающая промышленность. – 2011. – № 1. – С. 14–20.
33. Проблемы рационального освоения золотороссыпных месторождений Дальнего Востока (геология, добыча, переработка) : монография / Ю. А. Мамаев, А. П. Ван-Ван-Е, А. П. Сорокин [и др.] ; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Институт горного дела. – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 199 с.
34. Мирзеханов, Г. С. Ресурсный потенциал техногенных образований россыпных месторождений золота : монография / Г. С. Мирзеханов, З. Г. Мирзеханова ; Министерство образования и науки Российской Федерации,

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга. – Москва : МАКС Пресс, 2013. – 285 с.

35. Мирзеханов, Г. С. Ресурсный потенциал техногенных образований отработанных золотоносных россыпей / Г. С. Мирзеханов, З. Г. Мирзеханова // Горный журнал. – 2005. – № 1. – С. 37–43.

36. Мамаев, Ю. А. Рациональное освоение техногенных россыпей золота в Дальневосточном регионе / Ю. А. Мамаев // Открытые горные работы. – 1999. – № 1. – С. 38–43.

37. Тальгамер, Б. Л. Техногенные россыпи (образование, оценка и эксплуатация) : монография / Б. Л. Тальгамер, В. В. Чемезов. – Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2013. – 239 с.

38. Мирзеханов, Г. С. Перспективы масштабного освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов / Г. С. Мирзеханов, В. С. Литвинцев, В. С. Алексеев // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – № 6 (104). – С. 22–30.

39. Мирзеханов, Г. С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе / Г. С. Мирзеханов, В. С. Литвинцев // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 25–30. – DOI 10.17580/gzh.2018.10.04.

40. Добыча золота в России : основные регионы и компании-лидеры // Добывающая промышленность. – 2024. – 30 сентября. – URL: <https://dprom.online/popular/dobicha-zolota-v-rosseeee-ryegeeeoni-kompaneee/> (дата обращения: 10.03.2025).

41. Геологические особенности россыпных месторождений Забайкалья и технологические схемы их переработки / В. П. Мязин, Ю. Я. Кошелев, О. В. Литвинцева, Н. И. Закиева. – Чита : ЧитГУ, 2000. – 45 с.

42. Обогащение золотоносных песков и конгломератов / О. В. Замятин, А. Г. Лопатин, Н. П. Санникова, А. Д. Чугунов. – Москва : Недра, 1975. – 264 с.

43. Левченко, Е. Н. Типоморфные и технологические особенности попутного золота в комплексных россыпных месторождениях / Е. Н. Левченко, А.

В. Григорьева // Обогащение руд. – 2021. – № 3. – С. 24–32. – DOI 10.17580/or.2021.03.05.

44. Ковалёв, А. А. Интенсификация процессов гравитационного обогащения золотосодержащих россыпей / А. А. Ковалёв. – Владивосток : ДВО АН СССР, 1991. – 200 с.

45. Чебан, А. Ю. Повышение эффективности разработки россыпей, содержащих большое количество мелкого золота / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 3. – С. 388–397.

46. Оценка влияния особенностей строения россыпных месторождений золота на эффективность их освоения на Севере / Н. С. Батугина, В. Л. Гаврилов, С. М. Ткач, Е. А. Хоютанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 3. – С. 67–76. – DOI 10.15372/FTPRPI20220307.

47. Ermakov, S. A. Complex-structure gold placer mining in Yakutia / S. A. Ermakov, A. M. Burakov // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49, no. 2. – P. 273–278. – DOI 10.1134/S1062739149020093.

48. Семенов, А. Н. Оценка экономической эффективности дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков с помощью гидродинамического дезинтегратора / А. Н. Семенов, А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // Актуальные проблемы освоения георесурсов : материалы I Всероссийской научной конференции молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 18–19 мая 2022 г. – Хабаровск : Институт горного дела ДВО РАН, 2022. – С. 102–106.

49. Банщикова, Т. С. Физико-химические способы извлечения тонкодисперсного золота из техногенных россыпей Приамурья / Т. С. Банщикова, Н. А. Леоненко, В. С. Алексеев // Обогащение руд. – 2017. – № 6. – С. 32–37. – DOI 10.17580/or.2017.06.06.

50. Алексеев, В. С. Применение нетрадиционных технологий для извлечения золота из техногенных образований россыпей Приамурья / В. С. Алексеев, Т. С. Банщикова // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 52–57. – DOI 10.17580/gzh.2018.10.10.

51. Бурдин, Н. В. Технология промывки золотосодержащих песков с отработкой водно-шламовой схемы / Н. В. Бурдин, В. И. Лебедев // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 3. – С. 24–36.
52. Серый, Р. С. Снижение потерь драгоценных металлов на промывочных приборах за счет оптимизации работы шлюзов мелкого наполнения / Р. С. Серый, В. В. Таганов, К. В. Гевало // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 49–52. – DOI 10.17580/gzh.2018.10.09.
53. Журавлев, К. А. Анализ работы шлюзовых промывочных приборов при отработке россыпных месторождений золота / К. А. Журавлев // Актуальные проблемы освоения георесурсов : материалы I Всероссийской научной конференции молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 18–19 мая 2022 г. – Хабаровск : Институт горного дела ДВО РАН, 2022. – С. 69–73.
54. Соломин, К. В. Обогащение песков россыпных месторождений полезных ископаемых / К. В. Соломин. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1961. – 399 с.
55. Ковлеков, И. И. Техногенное золото Якутии / И. И. Ковлеков. – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 302 с.
56. Бураков, А. М. Комплексное решение проблемы минимизации объемов промываемых золотоносных песков / А. М. Бураков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 127–138. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_2_0_127.
57. Шорохов, С. М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений : учебник / С. М. Шорохов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Недра, 1973. – 765 с.
58. Alluvial Gold Mining Technologies from Ancient Times to the Present / S. Mathioudakis, G. Xiroudakis, E. Petrakis, E. Manoutsoglou // Mining. – 2023. – Vol. 3, no. 4. – P. 618–644. – DOI 10.3390/mining3040034.
59. Шашурин, С. Л. Разработка россыпей открытым способом : пособие для повышения квалификации рабочих / С. Л. Шашурин. – Москва : Госгортехиздат, 1959. – 208 с.

60. Yukon Placer Mining Industry 2007–2009 / comp. W. P. LeBarge, M. G. Nordling. – Whitehorse : Yukon Geological Survey, 2011. – 151 p.
61. Мацуев, Л. П. Некоторые итоги исследований обогащения золотосодержащих песков на шлюзовых обогатительных установках / Л. П. Мацуев // Труды ВНИИ-1. – Магадан, 1967. – Т. 26. – С. 365–409.
62. Чугунов, А. Д. Повышение эффективности шлюзового процесса и механизации съёмки концентрата / А. Д. Чугунов. – 1961. – 23 с. – (Бюллетень технической информации ; № 21).
63. Кислицына, А. АЛРОСА : диспетчеризация горных работ – ключ к повышению эффективности горнотранспортного комплекса / А. Кислицына // Глобус. – 2024. – 17 мая. – URL: <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/alrosa-dispetcherizacziya-klyuch-k-povysheniyu-effektivnosti-gornotransportnogo-kompleksa-24713/> (дата обращения: 28.03.2025).
64. Inginer_ASU. Часть 2. Немного про ПЛК // Хабр. – 2022. – 10 ноября. – URL: <https://habr.com/ru/articles/698654/> (дата обращения: 25.04.2025).
65. Алексеев, В. С. Исследование миграции частиц золота в техногенных песках россыпных месторождений / В. С. Алексеев, В. В. Таганов, А. Д. Васюта // Обогащение руд. – 2022. – № 5. – С. 34–39. – DOI 10.17580/or.2022.05.06.
66. Алексеев В. С., Секисов А. Г., Таганов В. В., Конарева Т. Г., Журавлев К. А. Обоснование способа получения концентрата тяжелых минералов из песков россыпных месторождений золота / В. С. Алексеев, А. Г. Секисов, В. В. Таганов, Т. Г. Конарева, К. А. Журавлев // Горная промышленность. – 2025. – № 4S. – С. 4–7. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-4S-04-07.
67. Юрочкин, Е. Автоматизированное извлечение золота : АСУ ТП на объектах Олимпиадинского ГОКа / Е. Юрочкин // Control Engineering Россия. – 2020. – Октябрь. – URL: <https://controleng.ru/asu-tp/olimpiadinskij-gok/> (дата обращения: 25.04.2025).
68. Гущенко, В. В. Цифровые технологии в золотодобыче : перспективы применения в России / В. В. Гущенко // ЗОЛОТОМАШ. – 2023. – 7 сентября. – URL:

<https://золотомаш.пф/info/articles/dobycha-zolota/tsifrovye-tekhnologii-v-zolotodobyche-perspektivy-primeneniya-v-rossii/> (дата обращения: 20.04.2025).

69. U.S. Department of Energy. Determining Electric Motor Load and Efficiency. – Washington, DC : U.S. Department of Energy, 1997. – 16 p.

70. Горнодобывающая отрасль региона : уровень развития и новые задачи // Деловой курс. – 2025. – № 1 (07). – С. 4–9.

71. Гальцева, Н. В. Золотодобывающая промышленность России : санкционные шоки / Н. В. Гальцева, О. А. Шарыпова // Пространственная экономика. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 70–93. – DOI 10.14530/se.2023.2.070-093.

72. Рассказов, И. Ю. Горнодобывающая промышленность Хабаровского края : векторы перспективного развития / И. Ю. Рассказов, А. Г. Леонтьев, Ю. А. Архипова // Горный журнал. – 2025. – № 7. – С. 43–50. – DOI 10.17580/gzh.2025.07.06.

73. Монгуш, С. П. Золотодобывающая отрасль России и регионов / С. П. Монгуш, Т. М. Ойдул // Региональная экономика : теория и практика. – 2019. – Т. 17, вып. 10. – С. 1822–1833. – DOI 10.24891/re.17.10.1822.

74. Зуева, Е. В. Золотодобывающая отрасль Российской Федерации : состояние и перспективы / Е. В. Зуева // Молодежный вектор таможни. – 2022. – № 3 (3). – С. 49–52.

75. Истратова, К. Российские золотые запасы : мифы и реальность / К. Истратова // Добывающая промышленность. – 2019. – 7 октября. – URL: <https://dprom.online/popular/rossijskie-zolotyie-zapasy-mify-i-realnost/> (дата обращения: 26.04.2025).

76. Туровский, Р. Бюллетень EastRussia : отраслевой аналитический обзор горнодобычи ДФО – весна 2025 / Р. Туровский, Е. Шамсутдинова // EastRussia. – 2025. – 28 марта. – URL: <https://www.eastrussia.ru/material/byulleten-eastrussia-otraslevoy-analiticheskiy-obzor-gornodobychi-dfo-vesna-2025/> (дата обращения: 16.04.2026).

77. Добыча золота в Республике Бурятия // Золотодобыча. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11231> (дата обращения: 28.01.2025).

78. Добыча золота в 2024 году превысила прежний результат в Хабаровском крае // EastRussia. – 2025. – 22 января. – URL: <https://www.eastrussia.ru/news/dobycha-zolota-v-2024-godu-prevysila-prezhniy-rezultat-v-khabarovskom-krae/> (дата обращения: 28.01.2025).
79. Добыча золота в Амурской области // Золотодобыча. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11230> (дата обращения: 28.01.2025).
80. Добыча золота в Забайкальском крае // Золотодобыча. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11232> (дата обращения: 28.01.2025).
81. Добыча золота в Приамурье в 2024 году снизилась на 8,3 % // Интерфакс. – 2025. – 13 января. – URL: <https://www.interfax.ru/business/1002580> (дата обращения: 28.01.2025).
82. Добыча золота в Камчатском крае // Золотодобыча. – 2015. – 2 июня. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11235> (дата обращения: 28.01.2025).
83. Добыча золота в Приамурье в 2023 году снизилась на 6,2 % // Золотодобыча. – URL: <https://zolotodb.ru/link/5172> (дата обращения: 28.01.2025).
84. Якубчук, А. Российской золотодобыче 30 лет / А. Якубчук // ПРАЙМ ЗОЛОТО. – 2021. – 24 апреля. – URL: <https://gold.1prime.ru/20210424/406870.html> (дата обращения: 08.04.2026).
85. Добыча золота в мире выросла в 2024 году до 3,3 тыс. т // Золотодобыча.рус. – 2025. – 18 февраля. – URL: <https://золотодобыча.рус/index.php/news/882-global-gold-production-in-2024-increased-to-3-3-thousand-tons> (дата обращения: 10.03.2025).
86. Добыча золота в мире : марафон или спринт? // Добывающая промышленность. – 2025. – 14 марта. – URL: <https://dprom.online/mining/dobycha-zolota-v-mire-marafon-ili-sprint/> (дата обращения: 17.03.2025).
87. Verbrugge, B. The gold commodity frontier : A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy / B. Verbrugge, S. Geenen // The Extractive Industries and Society. – 2019. – Vol. 6, no. 2. – P. 413–423. – DOI 10.1016/j.exis.2018.10.014.

88. Литвинцев, В. С. Научно-технологические проблемы освоения россыпных месторождений в Дальневосточном регионе России / В. С. Литвинцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 12. – С. 266–273.
89. Анализ состояния золотодобычи из россыпей юга Дальнего Востока по результатам экспертизы нормативов потерь полезных ископаемых / И. Ю. Рассказов, Г. П. Пономарчук, В. С. Литвинцев, В. А. Кравцов // Недропользование XXI век. – 2009. – № 3 (16). – С. 66–70.
90. Алексеев, В. С. Новый стратегический подход к освоению техногенных и малых россыпных месторождений золота / В. С. Алексеев, Р. С. Серый, В. В. Таганов // Актуальные проблемы освоения георесурсов : материалы I Всероссийской научной конференции молодых учёных и аспирантов, Хабаровск, 18–19 мая 2022 г. – Хабаровск : Институт горного дела ДВО РАН, 2022. – С. 4–10.
91. Проблемы добычи золота из россыпей Дальнего Востока на современном этапе / Ю. А. Мамаев, А. П. Ван-Ван-Е, В. С. Литвинцев [и др.] // Добыча золота : проблемы и перспективы : доклады научно-практического семинара, Хабаровск, 25–27 ноября 1997 г. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 1997. – С. 13–23.
92. Литвинцев, В. С. Особенности технологического развития золотодобычи на Дальнем Востоке России / В. С. Литвинцев, Т. Н. Александрова, С. И. Корнеева. – Москва : Горная книга, 2012. – 12 с.
93. Litvintsev, V. S. Current state and main directions of innovative development of placer gold mining in Far East Federal District / V. S. Litvintsev, P. P. Sas // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 56. – Article 04004. – DOI 10.1051/e3sconf/20185604004.
94. Алексеев, В. С. Исследование эффективности работы промывочных приборов при отработке россыпных месторождений благородных металлов / В. С. Алексеев, Р. С. Серый, Т. С. Банщикова // Горный журнал. – 2024. – № 6. – С. 82–87. – DOI 10.17580/gzh.2024.06.13.
95. Алексеев, В. С. Обоснование рациональной технологии формирования продуктивной зоны при открытой разработке техногенных россыпей Приамурья :

автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 25.00.22 / В. С. Алексеев. – Хабаровск, 2012. – 22 с.

96. Беневольский, Б. И. Золото России : проблемы использования и воспроизводства минерально-сырьевой базы / Б. И. Беневольский. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Геоинформмарк, 2002. – 464 с.

97. Ван-Ван-Е, А. П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений : монография / А. П. Ван-Ван-Е. – Москва : Горная книга : Издательство Московского государственного горного университета, 2010. – 268 с.

98. Мирзеханова, З. Г. Техногенные образования россыпных месторождений золота : ресурсно-экологические аспекты отработки : монография / З. Г. Мирзеханова, Г. С. Мирзеханов, И. Д. Дебелая ; Дальневосточное отделение Российской академии наук. – Хабаровск : ДВО РАН, 2014. – 297 с.

99. Белов, С. В. Техногенные месторождения золота : состояние и перспективы освоения / С. В. Белов // Золотодобывающая промышленность. – 2006. – № 3. – С. 29–37.

100. Пономарчук, Г. П. Повторная разработка крупномасштабных россыпей на основе реструктуризации отвального комплекса 250-литровых драг / Г. П. Пономарчук, Р. С. Серый, П. П. Сас // Горный информационно-аналитический бюллетень. Дальний Восток – 3. – Москва : Мир горной науки, 2007. – № ОВ16. – С. 196–203.

101. Егупов, П. Е. Классификация золотоносных месторождений по обогатимости / П. Е. Егупов // Колыма. – 1962. – № 6. – С. 38–41.

102. Мельников, Н. В. Краткий справочник по открытым горным работам / Н. В. Мельников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1982. – 414 с.

103. Секисов А. Г., Панов Ю. П., Брюховецкий О. С., Рассказова А. В. Перспективные геотехнологии освоения золотоносных россыпей Восточного Забайкалья / А. Г. Секисов, Ю. П. Панов, О. С. Брюховецкий, А. В. Рассказова // Eurasian Mining. – 2022. – № 2. – С. 34–37. – DOI 10.17580/em.2022.02.08.

104. Литвинцев, В. С. Обоснование инновационных технологий комплексного освоения природных и техногенных россыпных месторождений благородных металлов, отвечающих экономическим и экологическим требованиям : отчёт о научно-исследовательской работе / В. С. Литвинцев ; Институт горного дела ДВО РАН. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2015. – 186 с.

105. Луняшин, П. Д. Финансовая отдача от россыпной золотодобычи в России : налоговая эффективность в цифрах / П. Д. Луняшин // Золотодобыча. – 2025. – 27 мая. – URL: <https://zolotodb.ru/article/13365/> (дата обращения: 24.04.2025).

106. Союз старателей России. Об упрощённой оценке техногенных россыпей на 2026 год : письмо руководителю Роснедр О. В. Казанову от 21.09.2025 / подписал В. И. Таракановский // Золотодобыча. – 2025. – 23 сентября. – URL: <https://zolotodb.ru/article/13413> (дата обращения: 13.04.2026).

107. К природо- и ресурсосберегающим технологиям подземной разработки месторождений сложной структуры / В. И. Голик, Н. М. Качурин, Г. В. Стась, М. Ю. Лискова // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 9. – С. 22–27. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-9-22-27.

108. Чебан, А. Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 340–348. – DOI 10.46689/2218-5194-2020-1-1-340-348.

109. Орлов, Е. И. Справочник по разработке россыпей. Вып. 3 : Гидравлический способ разработки россыпей / Е. И. Орлов ; под ред. В. П. Березина. – Магадан, 1959. – 172 с.

110. Хныкин, В. Ф. Гидравлическая разработка россыпных месторождений : учебное пособие / В. Ф. Хныкин. – Москва : МГРИ, 1988. – 90 с.

111. Research and application of a Knelson concentrator : A review / Q. Chen, H.-Y. Yang, L.-L. Tong, H.-Q. Niu, F.-S. Zhang, G.-M. Chen // Minerals Engineering. – 2020. – Vol. 152. – Article 106339. – DOI 10.1016/j.mineng.2020.106339.

112. Styles, M. T. Good practice in the design and use of large sluice boxes / M. T. Styles, J. Simpson, E. J. Steadman. – British Geological Survey, 2002. – 25 p.

113. Замятин, О. В. К вопросу применения отсадочных машин на драгах / О. В. Замятин, К. В. Соломин // Колыма. – 1965. – С. 23–25.
114. Варзин, В. С. Новый высокопроизводительный аппарат для гравитационного обогащения минерального сырья / В. С. Варзин // Труды ВНИИ-1. – Магадан, 1969. – Т. 20.
115. Разработка новых, усовершенствование существующих обогатительных процессов и аппаратов / О. В. Замятин, Н. П. Санникова [и др.] // Труды Иргиредмета. – Москва : Недра, 1971. – Вып. 23. – С. 184–202.
116. Состояние технологии обогащения золотосодержащих песков на драгах и основные пути ее совершенствования / О. В. Замятин, А. Д. Чугунов [и др.] // Обогащение руд и песков благородных металлов : сборник статей. – Москва : Наука, 1971. – С. 125–129.
117. Аникин, М. Ф. Винтовые сепараторы для обогащения руд / М. Ф. Аникин, В. Д. Иванов, М. Л. Певзнер. – Москва : Недра, 1970. – 184 с.
118. Johnson, K. Gold dredging in the Klondike and Number 4 / K. Johnson, A. Mackenzie // Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2012 : Leadership in Sustainable Infrastructure, Edmonton, Alberta, Canada, 6–9 June 2012. – 2012. – Vol. 1. – P. 211–220.
119. Серго, Е. Е. Промывка руд черных металлов / Е. Е. Серго. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1963. – 143 с.
120. Бочкарев, Ю. С. Надежность карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений в криолитозоне / Ю. С. Бочкарев, И. В. Зырянов // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 102–105. – DOI 10.17580/gzh.2022.04.15.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы (выдан 27.06.2026).



680031, г.Хабаровск, ул.Пазнерная, 69
Тел: (4212) 26-06-53, 26-06-59
Факс: (4212) 26-06-53
E-mail: gold@artelvostok.ru

ИНН 2708000587 КПП 270801001 Расчетный счёт 40702810300000001213 в филиале «Центральный» Банка ВТБ (ПАО)
г.г. Москве и/с 3010181014529000411 БИК 044525411 ОГРН 1022700858696 ОКПО 06897178 ОКВЭД 24.41

АКТ

**О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
ВАСЮТЫ АЛЕКСЕЯ ДМИТРИЕВИЧА
НА РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ руч. ХРЕБТОВЫЙ, руч. СУЛАКИ,
Артель старателей «Восток»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы, направленные на повышение эффективности работы промывочных приборов при разработке россыпных месторождений золота, реализованы и прошли производственную апробацию на промывочном приборе ПБШ-100, разработанном сотрудниками ИГД ДВО РАН и внедренном на предприятии Артели старателей «Восток».

В рамках практической исследовательской деятельности сотрудника ИГД ДВО РАН Васюты Алексея Дмитриевича на предприятии Артели старателей «Восток» были проведены экспериментальные исследования, направленные на повышение эффективности работы промывочного прибора ПБШ-100. Результаты исследований показали высокую эффективность предложенных диссертантом технических и технологических решений. В результате их внедрения достигнуто снижение удельного расхода топлива за счёт применения системы автоматического регулирования соотношения твёрдой и жидкой фаз в потоке пульпы.

Председатель артели А.С. «ВОСТОК»



Н.М. Юдаков