



**Савельев Алексей Олегович**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ ПО ПЛАНИРОВАНИЮ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ НА НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЕ**

Специальность

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (в отрасли: промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание учёной степени**  
**кандидата технических наук**

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Силич Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Массель Людмила Васильевна,  
главный научный сотрудник отдела  
энергетической безопасности систем энергетики  
Института систем энергетики им. Л.А.  
Мелентьева СО РАН

кандидат технических наук, доцент  
кафедры моделирования и системного анализа  
Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники  
Ганджа Тарас Викторович

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»

Защита состоится «16» июня 2016 г. в 16 часов 00 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.268.02 при Томском государственном  
университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 654050,  
г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201 .

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по  
адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа по адресу:

<http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/education/dissertations/2016-004-01.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Т.Н. Зайченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** К числу важнейших и вместе с тем сложных задач разработки нефтяных месторождений относятся задачи стабилизации добычи нефти и повышения коэффициента извлечения нефти, решение которых достигается за счёт оптимизации выбора мер геологического, технологического и технического характера – геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Выбор ГТМ осложняется субъективностью интерпретации и неопределённостью данных о текущем состоянии разработки месторождения, а также наличием нескольких возможных технологий проведения мероприятий.

Для решения ключевых задач планирования ГТМ разрабатываются новые алгоритмы и подходы выбора мероприятий, проектируются системы управления разработкой месторождений, в том числе автоматизированные системы поддержки принятия решений.

Проектирование систем управления разработкой нефтяных месторождений, предназначенных для поддержки принятия решений, является сложной и актуальной проблемой. Сложность разработки месторождения в первую очередь обусловлена неопределённостью и неполнотой знаний о самом объекте разработки.

Вопросы разработки методов и алгоритмов эффективного планирования ГТМ и оценки их эффективности, а также разработки соответствующих автоматизированных систем поддержки принятия решений рассматривались такими авторами как: Бачин С.И., Ахметзянов А.В., Мирзаджанзаде А.Х., Жданов С.А., Овнатанов С.Т., Пасынков А. Г., Тимонов А.В., Колтун А.А., Фахретдинов Р.Н., Муслимов Р.Х., Еремин Н.А., Кульчинский В.В., Carvalho, M. Bendezu, M. De Oliveira, Roehl D., Chan D.H., Hatzenbuehler H., Centner T.J.

В работах Тимонова А.В. рассматривается проблема низкой эффективности комплексного подхода к анализу продуктивности эксплуатации нефтяного месторождения с помощью ГТМ, описываются методы эффективного анализа и ранжирования перспективных зон месторождения, алгоритмы достижения максимальной технологической и экономической эффективности ГТМ.

Колтун А.А. в качестве основной проблемы планирования ГТМ выделяет отсутствие методики оценки эффективности мероприятий и в качестве средства решения предлагает разработку информационного, математического и программного обеспечения оценки фактической и прогнозной эффективности ГТМ.

Carvalho, Bendezu, M. De Oliveira, Roehl D., Chan D.H. и др. предлагают использовать методы математического моделирования в качестве основного инструмента прогнозирования состояния месторождения после проведения ГТМ.

С позиции формирования систем мониторинга данных о текущем состоянии разработки месторождения планирование ГТМ рассматривается такими авторами как: Hatzenbuehler H., Centner T.J., Булыгин Д.В., Энгельс А.А., Досмухамбетов М.Д.

Существенным этапом развития методов и алгоритмов выбора ГТМ является применение технологии экспертных информационных систем, рассмотренной в работах: Фахретдинова Р.Н., Муслимова Р.Х., Еремина Н.А., Кульчинского В.В. и других авторов.

Несмотря на прогресс в области создания новых моделей и информационных систем планирования ГТМ и прогнозирования их эффективности, нерешенной остаётся проблема комплексного информационного и алгоритмического обеспечения процесса планирования. Существующие подходы, методы и программные средства направлены на решение задач неполного ряда этапов жизненного цикла планирования ГТМ.

В данных условиях, с учётом многокритериальности решаемой задачи, неточности и неполноты исходных данных, актуальной является разработка автоматизированной системы поддержки принятия решений по планированию геолого-технических мероприятий (АСППР планирования ГТМ), основанной на методах системного анализа и объектно-ориентированного подхода к разработке.

**Целью** диссертационной работы является разработка моделей, алгоритмов и программного обеспечения автоматизированной системы поддержки принятия решений для повышения эффективности процесса планирования геолого-технических мероприятий на нефтедобывающей скважине.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведён анализ процессов планирования ГТМ, выявлены процессы, требующие повышения качества полученных результатов. Оценена возможность повышения эффективности указанных процессов за счёт внедрения и использования существующих программных решений.
2. Проведён анализ требований субъектов процесса управления разработкой месторождения, выявлены ключевые требования к АСППР планирования ГТМ.
3. Разработан методический подход к проектированию АСППР планирования ГТМ.
4. Разработана функциональная схема АСППР планирования ГТМ.
5. Спроектирована подсистема мониторинга, обеспечивающая непрерывный контроль работоспособности компонент АСППР планирования ГТМ.
6. Разработаны комплекс алгоритмов и программное обеспечение АСППР планирования ГТМ, обеспечивающие решение задач каждого из этапов системной последовательности планирования мероприятий, в том числе выявления скважин с недоиспользованным потенциалом, формирования альтернатив ГТМ и прогнозирования эффекта от мероприятия.
7. Разработаны структуры данных АСППР планирования ГТМ.
8. Выполнено имитационное моделирование процессов принятия решений при планировании ГТМ, с целью оценки эффекта от внедрения АСППР планирования ГТМ.
9. Выполнено численное моделирование работы алгоритмов формирования альтернатив и прогнозирования эффекта от проведения ГТМ, для оценки эффективности их работы.

10. Проведено внедрение результатов исследований в проекты, выполненные в рамках договорных работ с ОАО «Томскнефть» ВНК(4-303/2012), ООО «РН-Информ»(08/0189/Д), государственного контракта №14.515.11.0047 и Соглашения о предоставлении субсидии №14.575.21.0023.

**Объектом исследований** является процесс планирования геолого-технических мероприятий.

**Предметом исследований** являются структуры и состав автоматизированной системы поддержки принятия решений по планированию ГТМ.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан методический подход к проектированию АСППР планирования ГТМ, включающий:
  - принципы проектирования, позволяющие повысить эффективность разработки АСППР планирования ГТМ на нефтедобывающей скважине;
  - системную последовательность планирования ГТМ, определяющую задачи основных этапов и функции управления при планировании мероприятий;
  - разработанный на основе объектно-ориентированной методологии проектирования комплекс взаимосвязанных моделей АСППР планирования ГТМ, позволяющий сократить общее время разработки АСППР планирования ГТМ и повысить экономическую эффективность процесса планирования за счет повышения оперативности принятия решений.
2. В соответствии с разработанным методическим подходом предложена функциональная схема АСППР планирования ГТМ, отражающая системную последовательность планирования ГТМ и включающая новый элемент – подсистему мониторинга сетевой инфраструктуры, обеспечивающую целостность АСППР.
3. Предложены оригинальные алгоритмы выявления скважин с недоиспользованным потенциалом и формирования альтернатив ГТМ, автоматизирующие процессы подбора скважин-кандидатов и выбора варианта проведения ГТМ, обеспечивающие повышение экономической эффективности разработки месторождения за счёт роста оперативности принятия решений и сокращения времени простоя рабочих бригад.
4. Предложен оригинальный алгоритм прогнозирования эффекта от ГТМ, формирующий предварительную оценку показателей добычи после проведения выбранного вида мероприятия на основе множественной регрессионной модели, обеспечивающий повышение экономической эффективности разработки месторождения за счёт роста оперативности принятия решений.

**Практическая значимость работы.** Реализованы программные средства формирования альтернатив и оценки их эффективности при планировании

проведения ГТМ на нефтедобывающей скважине, включая соответствующую базу данных.

Полученные результаты могут быть использованы отделами планирования ГТМ, геологической и технологической службами нефтедобывающих предприятий, образовательными учреждениями в процессах обучения и переподготовки специалистов для нефтегазодобывающей отрасли, а также при выполнении научно-исследовательских и поисковых работ в области поддержки принятия решений при управлении разработкой нефтегазовых месторождений.

**Методология и методы исследования.** Для решения задач применялись модели и методы системного анализа, объектно-ориентированная методология проектирования сложных систем (Object Model for System Design – OMSD), имитационное моделирование, методы регрессионного анализа, метод взвешенных ближайших соседей, методология ARIS (Architecture of Integrated Information Systems).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методический подход к проектированию АСППР планирования ГТМ включает:

- принципы (единого информационного пространства, комплексного контроля информационно-вычислительных процессов АСППР и прозрачности процессов проектирования), повышающие эффективность АСППР планирования ГТМ на этапе её разработки;
- системную последовательность планирования ГТМ, определяющую задачи основных этапов и функции управления при планировании мероприятий;
- разработанный в соответствии с методологией OMSD комплекс взаимосвязанных моделей АСППР планирования ГТМ (классов, объектов, зависимостей атрибутов, компонент и координации выработки решения), сокращающий общее время разработки системы за счёт объединения этапов проектирования общей структуры системы и проектирования её программной реализации.

*Соответствует п. 3 паспорта специальности: Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.*

2. Предложенная функциональная схема АСППР планирования ГТМ, основанная на системной последовательности планирования ГТМ, позволяет обеспечить информационные потребности субъектов планирования ГТМ, а также целостность АСППР, за счет включения нового компонента – подсистемы мониторинга сетевой инфраструктуры.

*Соответствует п. 13 паспорта специальности: Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации.*

3. Предложенные алгоритмы выявления скважин с недоиспользованным потенциалом и формирования альтернатив ГТМ автоматизируют процессы подбора скважин-кандидатов и выбора варианта проведения ГТМ и повышают эффективность процесса планирования ГТМ за счёт сокращения времени принятия решений на 38%.

*Соответствует п. 15 паспорта специальности: Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).*

4. Предложенный алгоритм прогнозирования эффекта от ГТМ обеспечивает повышение экономической эффективности разработки месторождения за счёт повышения оперативности принятия решений и позволяет уменьшить ошибку прогнозирования в 1,87 раз.

*Соответствует п. 15 паспорта специальности: Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).*

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации были доложены и получили одобрение на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Молодёжь и современные информационные технологии» (Томск 2011, 2014, 2015); «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Томск 2011, 2012); «Информационные системы и технологии» (Орёл 2011); «Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполненных вузами и научными организациями Сибирского федерального округа в рамках участия в реализации Федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий в 2014 году» (Кемерово 2014); «Высокие технологии в современной науке и технике» (Томск 2015); научной конференции с представителями сектора исследований и разработок, коммерческого сектора, высшего профессионального образования Сибирского федерального округа в рамках участия в 2015 году в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий, заказчиком которых является Минобрнауки России (Кемерово 2015); научно-практической конференции по итогам реализации в 2015 году прикладных научных исследований и экспериментальных разработок в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы" (Москва 2015).

Результаты диссертационных исследований внедрены на предприятиях ОАО «Томскнефть» ВНК (договор №4-303/2012), ООО «РН-Информ» (договор 08/0189/Д), а также использованы при выполнении работ по государственному контракту №14.515.11.0047, заключённому в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», и при выполнении соглашения № 14.575.21.0023, заключённому в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

**Личный вклад:**

1. Постановка задач исследования и разработка методического подхода к проектированию АСППР планирования ГТМ осуществлялась совместно с В.А. Силичем.
2. Функциональная схема АСППР планирования ГТМ на нефтедобывающей скважине разработана автором.
3. Технология управления данными подсистемы мониторинга сетевой инфраструктуры АСППР планирования ГТМ разработана автором.
4. Алгоритмическое и программное обеспечение АСППР планирования ГТМ разработано автором.
5. Структура базы данных подсистемы мониторинга сетевой инфраструктуры разработана совместно с А.А. Алексеевым.
6. Программное обеспечение для мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального месторождения» реализовано совместно с А.А. Алексеевым, А.В. Замятиным, В.П. Комагоровым, Е.М. Володиным, А.Ю. Черкашиным, А.В. Марчуковым, М.А. Ивановым.
7. Программное обеспечение WITSML агента для станции управления бурением реализовано совместно с А.Ю. Черкашиным, А.В. Марчуковым, А.С. Гончаровым.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список использованных источников, состоящий из 149 наименований, 13 приложений. Общий объем диссертации составляет 173 страницы машинописного текста. Работа содержит 72 рисунка и 35 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, приводится личный вклад автора, апробация результатов исследований, а также краткое содержание работы.

В **первой главе** приведены результаты анализа предметной области – процесса планирования ГТМ. Задача эффективного планирования ГТМ сформулирована как выбор мероприятий и последовательности их проведения для наиболее полного извлечения нефтяных запасов, при условии заданного уровня экономической окупаемости и отсутствия воздействия на окружающую среду.

На основе анализа нормативной и регламентной документации выделены основные группы субъектов планирования ГТМ в нефтедобывающих компаниях: геологическая служба, технологическая служба, междисциплинарная группа, отдел планирования ГТМ, производственный департамент, руководители инвестиционных проектов, рабочая группа по контролю за выполнением ГТМ, исполнитель. Сформированы основные требования субъектов планирования ГТМ, предъявляемые к соответствующей АСППР.



На основе причинно-следственного анализа выявлены факторы, в большей степени влияющие на эффективность планирования ГТМ: уровень автоматизации расчетов (отбора скважин-кандидатов, прогнозирования эффекта от ГТМ, формирования вариантов ГТМ), качество средств мониторинга текущего состояния разработки месторождения и уровень интеграции используемых при планировании мероприятий программных средств в единую информационную среду.

Обоснована необходимость разработки методического подхода к проектированию АСППР планирования ГТМ, в рамках которого необходимо:

- обосновать последовательность этапов проектирования АСППР;
- определить принципы проектирования АСППР;
- сформировать структуру системы для последующей программной реализации.

В качестве составной части методического подхода разработана системная последовательность планирования ГТМ, определяющая задачи основных этапов и функции управления при планировании мероприятий.

Во **второй главе** описаны следующие составляющие методического подхода к проектированию АСППР планирования ГТМ:

- принципы (единого информационного пространства, комплексного контроля информационно-вычислительных процессов и прозрачности процессов проектирования);
- комплекс взаимосвязанных моделей проектирования АСППР.

Разработка АСППР в соответствии с принципом *единого информационного пространства* обеспечивает единство хранения и представления данных, а также унификацию процессов обмена данными между отдельными компонентами информационной инфраструктуры нефтяного месторождения.

Принцип *комплексного контроля информационно-вычислительных процессов АСППР* обосновывает необходимость реализации подсистемы мониторинга сетевой инфраструктуры для обеспечения целостности системы.

Принцип *прозрачности процессов проектирования* предполагает использование модульного подхода при проектировании АСППР и применение объектно-ориентированной методологии проектирования для разработки комплекса моделей АСППР, необходимых для последующей программной реализации.

Сформированные принципы позволяют повысить эффективность АСППР планирования ГТМ на этапе ее разработки.

На основе указанных принципов разработана функциональная схема АСППР планирования ГТМ, представленная на рисунке 1.

Разработка системы в рамках приведённой схемы позволяет:

- организовать планирование ГТМ в рамках действующих регламентов;
- сократить время согласования управленческих решений за счёт объединения информационных компонентов различных структурных подразделений в единое информационное пространство;
- автоматизировать процесс формирования первичных альтернатив;

- автоматизировать процессы оценки технологической и экономической эффективности планируемых ГТМ.

Разработанная схема также основана на функциях управления при планировании ГТМ, что позволяет реализовать систему в рамках нефтедобывающей компании вне зависимости от существующей степени автоматизации планирования мероприятий и организационной структуры компании.

Реализация АСППР планирования ГТМ в рамках приведённой функциональной схемы не предполагает отказ от имеющихся программных средств, используемых субъектами планирования ГТМ. Функционально каждая из таких программ является отдельной компонентой АСППР, соответственно, потребуется разработка интерфейсов и методов обмена информацией с другими компонентами для формирования единого информационного пространства.

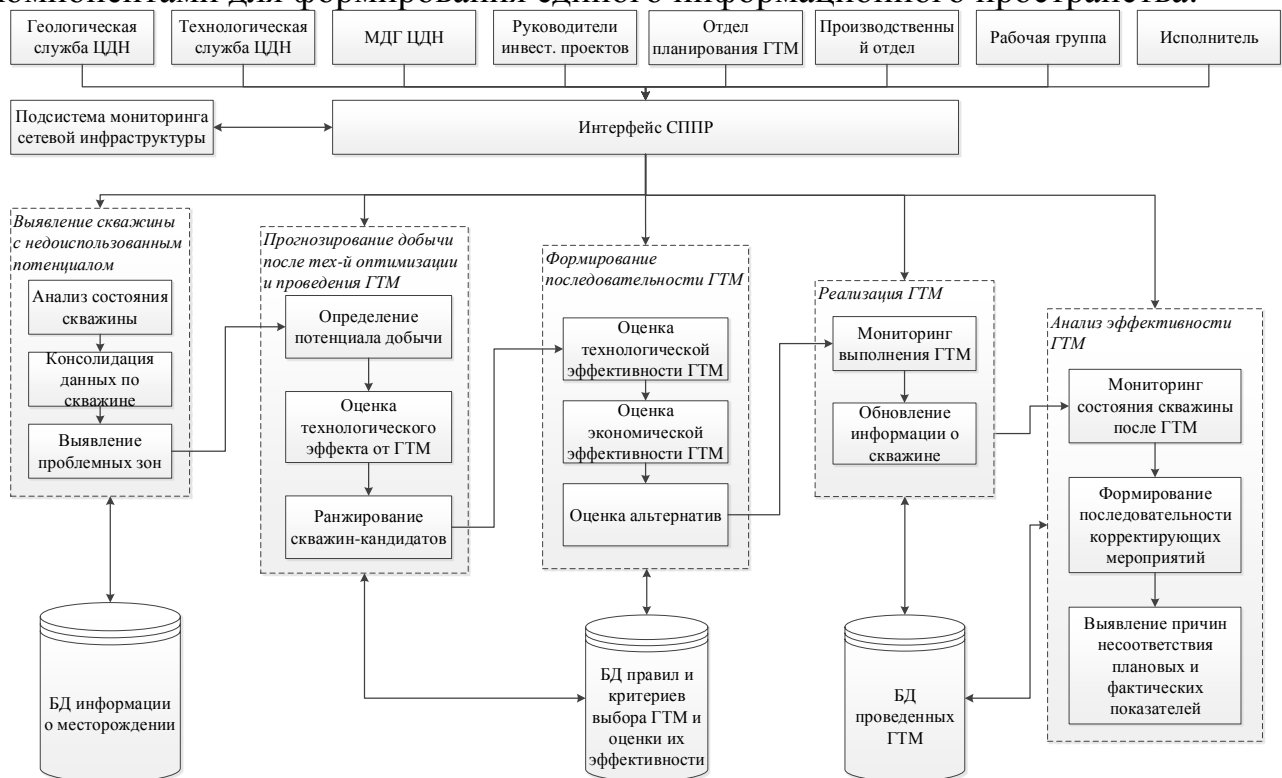


Рисунок 1 – Функциональная схема АСППР планирования ГТМ

В соответствии с методологией OMSD и принципом прозрачности процессов проектирования сформирован комплекс моделей АСППР планирования ГТМ, являющийся составной частью разработанного методического подхода и представляющий собой совокупность моделей 5 видов:

$$M = \langle M^C, \{M^O\}, \{M^A\}, M^S, \{M^K\} \rangle,$$

где:

$M^C$  – модель классов, описывающая множество классов АСППР планирования ГТМ и отношения между ними;

$M^O$  – модель объектов, используемая при решении задач выявления закономерностей на этапах выявления скважин с недоиспользованным

потенциалом и анализа эффективности проведённых ГТМ, а также при отборе скважин-кандидатов для проведения ГТМ;

$M^A$  – модель зависимостей атрибутов, используемая для явного отражения сложных зависимостей атрибутов с альтернативными путями вывода;

$M^S$  – модель компонент системы, определяющая иерархию подсистем АСППР планирования ГТМ;

$M^K$  – модель координации, используемая для решения задач интеграции и координации.

В третьей главе приведено описание оригинальных алгоритмов выявления скважин с недоиспользованным потенциалом, формирования альтернатив ГТМ и прогнозирования эффекта от проведения ГТМ, а также вспомогательных алгоритмов оценки экономической и технологической эффективности ГТМ, образующих алгоритмический комплекс АСППР планирования ГТМ.

Для автоматизации процесса выявления скважин с недоиспользованным потенциалом разработан алгоритм, основанный на использовании настраиваемой системы критериев (рисунок 2).

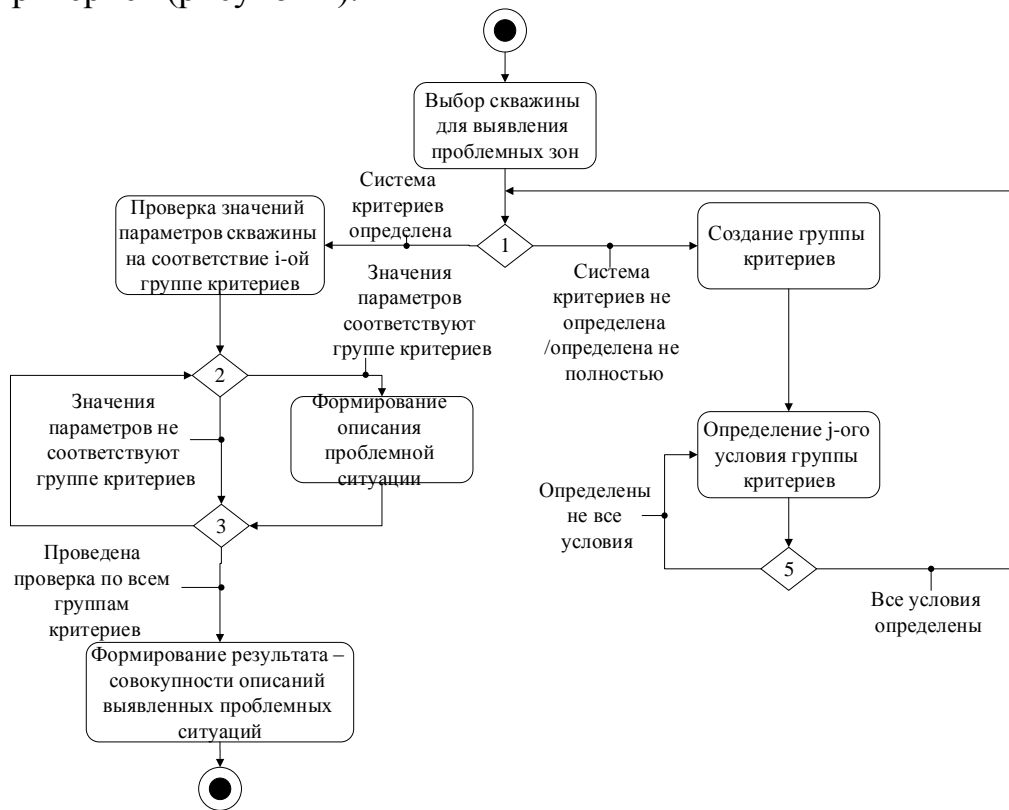


Рисунок 2 – Диаграмма деятельности алгоритма выявления скважин с недоиспользованным потенциалом

В обобщенном виде алгоритм выявления скважин с недоиспользованным потенциалом включает следующие шаги:

1. Определение перечня скважин для последующего анализа.
2. Формирование системы критериев для оценки скважин (либо выбор уже сформированной системы).
3. Циклическая проверка скважин по заданной системе критериев.

4. По завершению цикла проверки – формирование результирующего перечня скважин, текущее состояние которых соответствует выбранной системе критериев.

С учётом ограниченного числа возможных вариантов ГТМ для определённой добывающей скважины, решение задачи планирования или формирования альтернатив ГТМ сводится к решению задачи классификации.

В качестве средства решения предложен алгоритм, основанный на использовании метода *k*-взвешенных ближайших соседей. При этом задача формирования альтернативы проведения ГТМ выглядит следующим образом.

Имеется  $X \in R$  – множество скважин-кандидатов и  $Y$  – множество допустимых видов ГТМ. Задана обучающая выборка  $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^l$ , содержащая информацию о ранее проведенных ГТМ для определенных скважин. Задано множество скважин-кандидатов  $X^m = \{x_i\}_{i=1}^m$ , для которых нужно подобрать вариант ГТМ, т.е. множество  $\{y_i\}_{i=1}^m$  для объектов  $\{x_i\}_{i=1}^m$ .

На множестве объектов задаётся функция расстояния  $\rho(x, x')$ , которая является моделью сходства объектов. В рамках настоящей работы используется евклидова функция расстояния:

$$\rho(x, x') = \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2$$

Таким образом, для скважины-кандидата  $x \in \{x_i\}^m$  объекты обучающей выборки  $x_i$  будут расположены следующим образом:

$$\rho(x, x_{1;x}) \leq \rho(x, x_{2;x}) \leq \dots \leq \rho(x, x_{m;x}),$$

где  $x_{i;x}$  – объект обучающей выборки, являющийся *i*-м соседом объекта  $x$ .

В общем виде, алгоритм поиска *k*-взвешенных ближайших соседей представлен следующим выражением:

$$a(x) = \operatorname{argmax}_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [x_{i;x} = y] \times \omega(i, x),$$

где  $\omega(i, x)$  – заданная весовая функция, оценивающая важность *i*-го соседа.

Предлагаемый метод формирования альтернатив ГТМ заключается в:

- формировании обучающей выборки на основе истории разработки месторождения и проведённых ГТМ;
- задании параметров анализа – множества параметров скважин, по которым будет осуществляться сравнение скважины-кандидата с обучающей выборкой, и весовых коэффициентов для каждого из параметров;
- автоматизированном формировании альтернатив посредством алгоритма поиска *k*-взвешенных ближайших соседей;
- формировании результата в виде перечня нескольких видов ГТМ для каждой из исследуемых скважин.

Расчёт эффекта от проведения планируемого ГТМ представлен в виде задачи прогнозирования. В качестве основного способа решения задачи прогнозирования эффекта от ГТМ предложена множественная (многомерная) регрессионная модель.

В данном случае целью является построение модели с большим числом факторов при определении влияния каждого из них в отдельности, а также их совокупного влияния на показатель эффективности ГТМ. Для этого необходимо:

- выбрать форму связи (уравнение регрессии);
- определить параметры выбранного уравнения;
- проанализировать качество уравнения и проверить его адекватность опытным путём.

Обобщённое уравнение регрессионной модели при этом выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m,$$

где  $x_i$  – значение фактора, влияющего на показатель эффективности ГТМ.

Таким образом, задача прогнозирования эффекта от ГТМ сводится к нахождению значений коэффициентов  $b_i$ . В рамках диссертационной работы разработан соответствующий *алгоритм прогнозирования эффекта от ГТМ*, позволяющий пользователю реализовать следующие действия:

- 1) выбор варианта планируемого ГТМ (на основе результатов работы алгоритма по формированию альтернатив);
- 2) определение обучающей выборки для нахождения коэффициентов  $b_i$  (выбор уже существующей, либо создание новой);
- 3) автоматизированное решение уравнения регрессии и вычисление значений коэффициентов  $b_i$  на основе заданной обучающей выборки;
- 4) вычисление значения показателей эффекта от ГТМ.

*Оценка технологической и экономической эффективности ГТМ, реализованная в рамках соответствующих алгоритмов*, заключается в циклическом сравнении различных вариантов ГТМ по заданной системе критериев.

Для оценки технологической эффективности ГТМ используется настраиваемая система критериев. В качестве исходной информации используются данные о прогнозном технологическом эффекте от проведения определённого варианта ГТМ.

Для оценки экономической эффективности варианта ГТМ используются следующие показатели: дисконтированный поток денежной наличности, рентабельный срок разработки, срок окупаемости капитальных вложений, внутренняя норма возврата капитальных вложений, индекс доходности дисконтированных инвестиций, доход государства.

При наличии соответствующих данных в обучающих выборках, разработанный алгоритмический комплекс позволяет также автоматизировать ряд этапов *управления рисками проекта планируемого ГТМ*.

Качественный анализ рисков (выявление неопределённостей, присущих проекту), осуществляется алгоритмом формирования альтернатив ГТМ. Алгоритм классификации относит проект ГТМ к одному из классов мероприятий, на основе чего формируется перечень рисков, характерных для данного класса.

Оценка количественного эффекта от потенциального возникновения риска осуществляется комплексно: при помощи алгоритмов прогнозирования эффекта

от ГТМ, оценки технологической эффективности и оценки экономической эффективности.

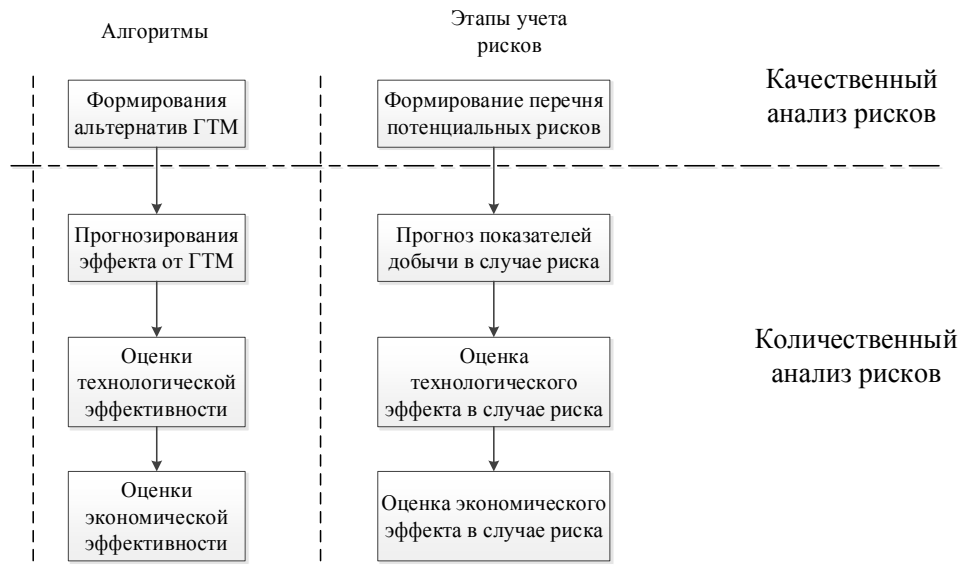


Рисунок 3 – Схема учета рисков при планировании ГТМ

На примере событийных цепочек процессов и имитационных моделей принятия решений при планировании ГТМ выполнена оценка временного эффекта, получаемого при использовании разработанного алгоритмического комплекса.

На рисунках 4 и 5 представлены имитационная модель планирования ГТМ, сформированная при помощи программного обеспечения Rockwell Arena, и событийная цепочка процессов планирования ГТМ, разработанная в соответствии с методологией ARIS. Имитационная модель и событийная цепочка процессов отражают изменения процесса планирования ГТМ при использовании АСППР планирования ГТМ, реализованной в соответствии с разработанным методическим подходом.

Приведем краткую характеристику основных изменений процесса планирования ГТМ на примере событийной цепочки процессов:

1. Разрозненные источники информации (данные о состоянии скважин, данные ГИС и т.д.) объединены в рамках единого информационного пространства и представлены набором витрин данных (в соответствии с принципами единого информационного пространства и контроля информационно вычислительных процессов).
2. В качестве ресурсов в соответствующих функциях используется алгоритмическое обеспечение АСППР планирования ГТМ.
3. Цепочка согласований плана работ с междисциплинарной группой и цехом добычи нефти и газа исключена – при использовании настраиваемых систем критериев, являющихся основами разработанных алгоритмов, необходимость дополнительных согласований отсутствует.

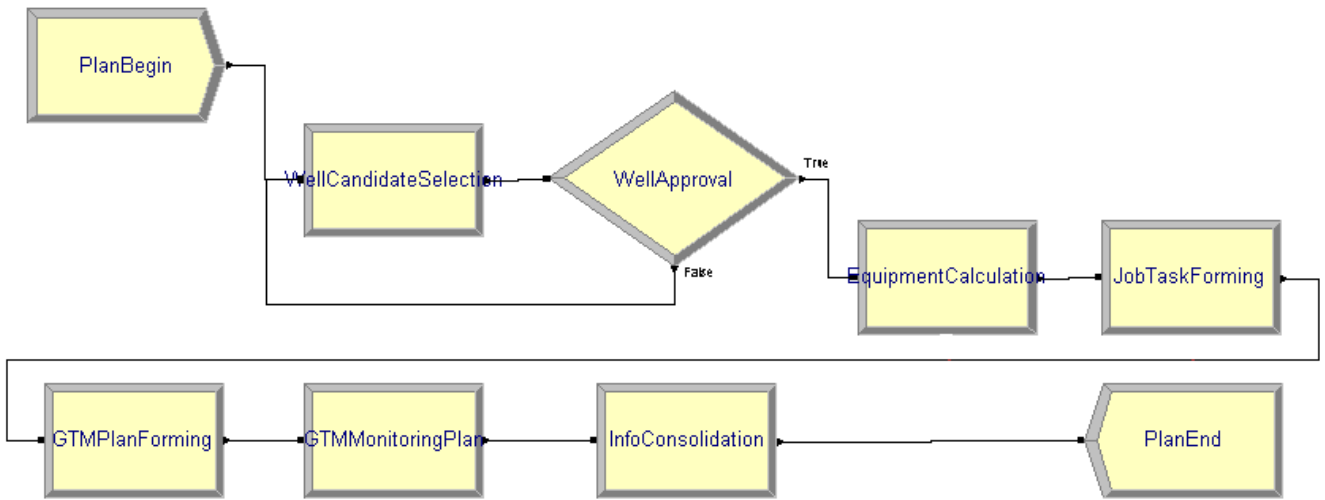


Рисунок 4 – Имитационная модель планирования ГТМ с использованием АСППР

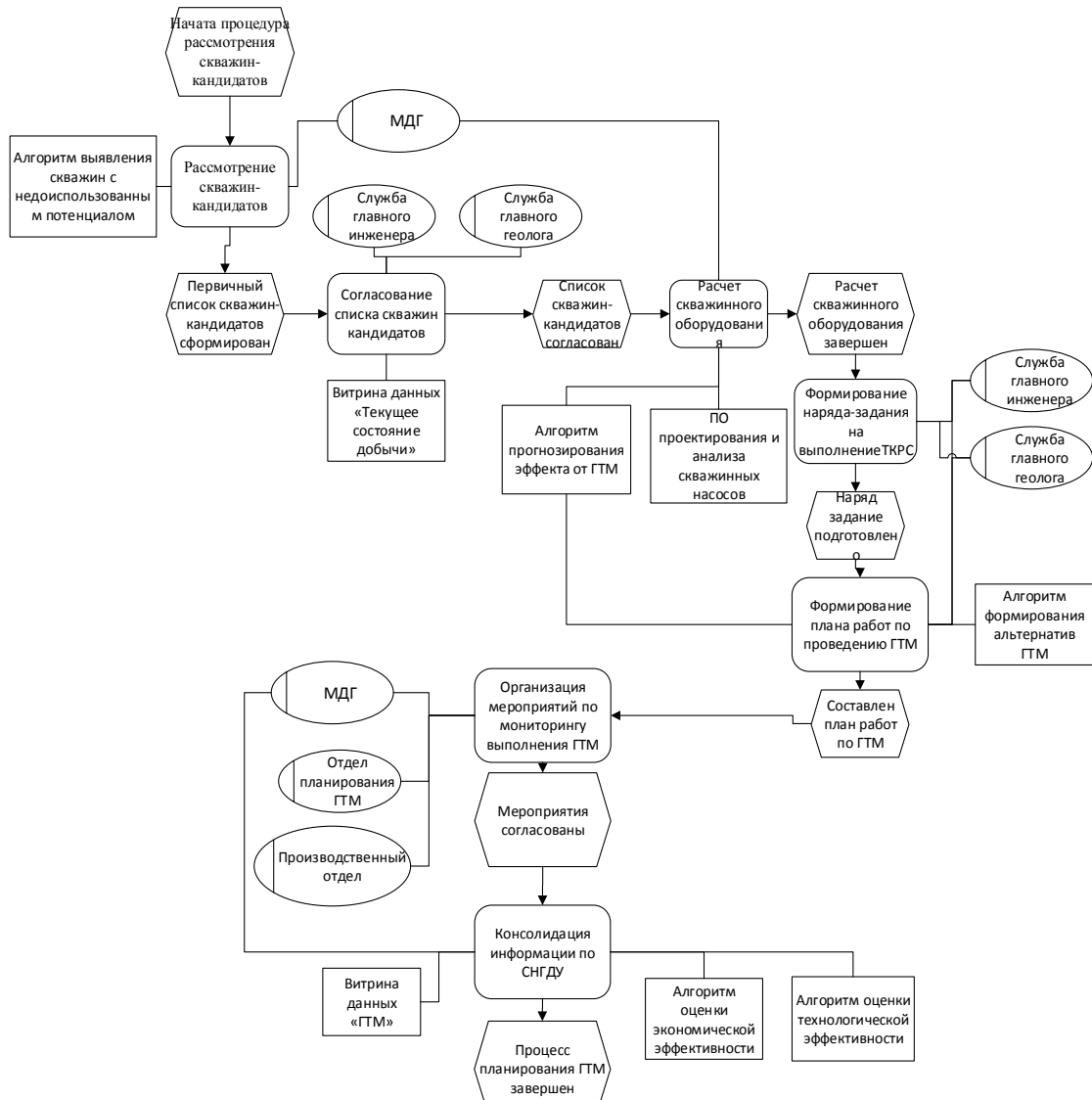


Рисунок 5 – Событийная цепочка процессов планирования ГТМ с использованием АСППР

Общее время «прохождения» имитационной модели планирования ГТМ с использованием АСППР планирования ГТМ сократилось на 38% (с 13 до 8

рабочих дней), по сравнению с базовой моделью, сформированной без учёта влияния системы.

На примере тестовых данных было выполнено численное моделирование работы алгоритмов формирования альтернатив ГТМ и прогнозирование эффекта от мероприятия.

Работа алгоритма формирования альтернатив показана на примере выбора типа проппанта для проведения гидравлического разрыва пласта.

Рассматриваемому мероприятию  $x$  присваивается класс, характерный для большинства  $k$  ближайших по метрике объектов  $f(x) = \operatorname{argmax} (\sum (f(c_i = uw(i))),$  где  $\{c1, c2... ck\}$  – ближайшие к  $x$  объекты,  $w(i)$  – весовая функция от ранга объекта.

В качестве признаков для определения мер сходства рассматриваемых объектов с обучающей выборкой использованы следующие параметры: полудлина трещины (с весом 0,15); высота трещины (с весом 0,15); дебит жидкости до проведения ГРП (с весом 0,7).

На рисунке 6 представлена графическая визуализация положения классифицируемого объекта относительно классов обучающей выборки по типу проппанта (выделено красным), полученная с помощью программного обеспечения NovoSpark Visualizer. Положение кривой, отображающей данные классифицируемого объекта «Скважина №8», визуально соответствует положению кривых, относящихся к классу 16/30, что подтверждает результат численного моделирования работы алгоритма формирования альтернатив ГТМ.

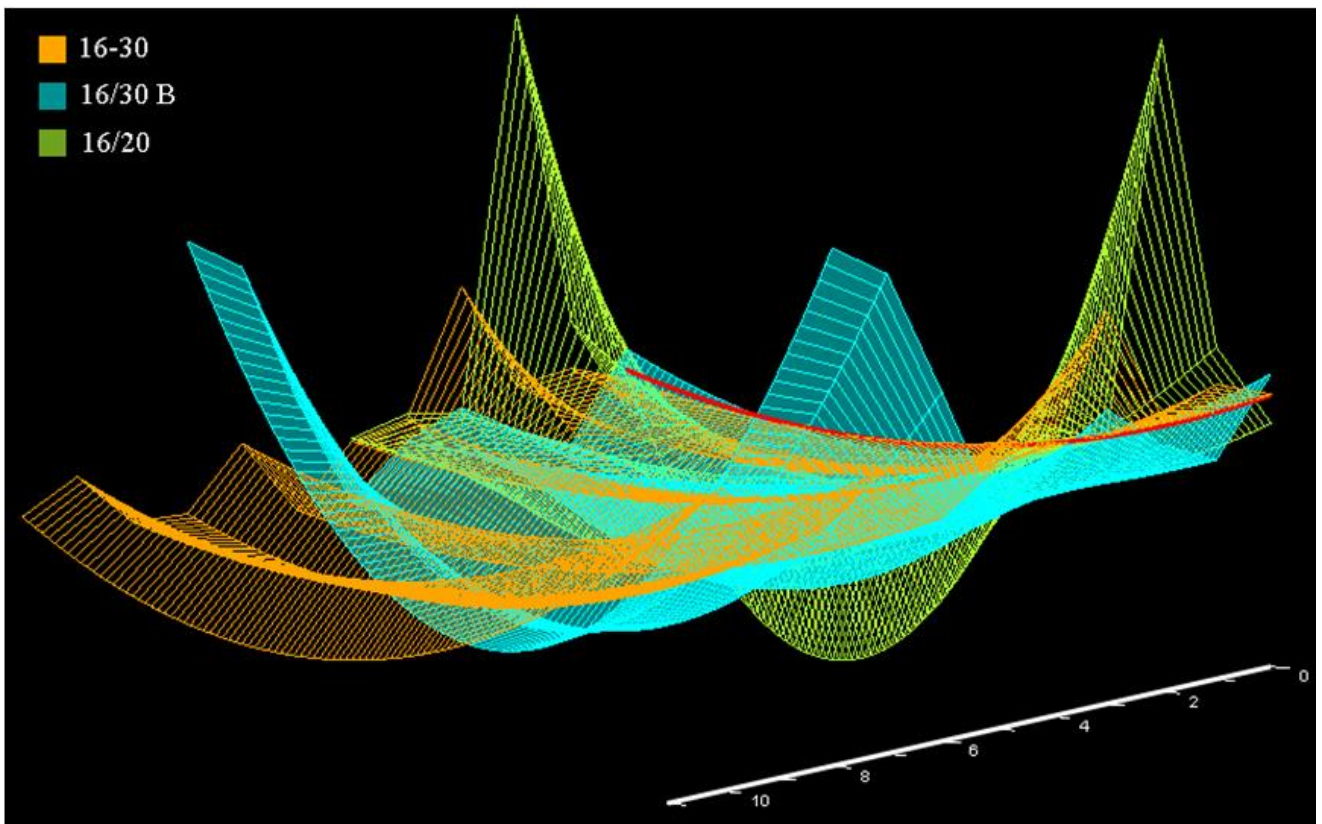


Рисунок 6 – Многомерная визуализация положения классифицируемого объекта относительно классов проппанта



Работа алгоритма *прогнозирования эффекта* от проведения ГТМ смоделирована на примере прогнозирования дебита жидкости после проведения гидравлического разрыва пласта.

В общем виде задача формирования прогноза эффекта от ГТМ сводится к следующему.

Имеется  $Y$  –  $n$ -мерный вектор столбец наблюдений зависимой переменной.

$X$  – матрица размерности  $n$  на  $m$ , в которой  $i$  строка  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  представляет собой  $i$  наблюдение вектора независимых переменных  $X = X_1, X_2, \dots, X_m$ .

$B$  – вектор-столбец размерности  $m$  параметров уравнения множественной регрессии.

Согласно методу наименьших квадратов, вектор-столбец коэффициентов  $B$  можно найти по следующей формуле:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y)$$

Согласно полученным результатам численного моделирования применение регрессии позволило уменьшить ошибку прогнозирования эффекта в 1,87 раз (с 23,34 до 12,5 т/сут.).

В **заключении** работы сформулированы основные научные и практические результаты:

1. Выполнен анализ процессов планирования ГТМ на нефтедобывающей скважине, существующих подходов и информационных систем планирования ГТМ, а также требований субъектов планирования ГТМ.
2. Разработан методический подход к проектированию АСППР планирования ГТМ, включающий:
  - принципы проектирования системы (единого информационного пространства, комплексного контроля информационно-вычислительных процессов АСППР и прозрачности процессов проектирования);
  - системную последовательность планирования ГТМ, определяющую задачи основных этапов и функции управления при планировании мероприятий;
  - разработанный на основе объектно-ориентированной методологии проектирования комплекс взаимосвязанных моделей АСППР планирования ГТМ (классов, объектов, зависимостей атрибутов, компонент и координации выработки решения).
3. Разработана функциональная схема АСППР планирования ГТМ, отражающая системную последовательность планирования ГТМ и обеспечивающая интегрируемость системы или отдельных ее компонентов в действующую инфраструктуру нефтедобывающего предприятия.
4. Спроектирован и реализован новый компонент АСППР планирования ГТМ – подсистема мониторинга сетевой инфраструктуры, обеспечивающая непрерывный контроль работоспособности и повышающая эффективность эксплуатации системы.

5. Разработаны алгоритмы выявления скважин с недоиспользованным потенциалом и формирования альтернатив ГТМ, сокращающие время принятия решения о проведении ГТМ на 38%, согласно результатам имитационного моделирования.
6. Разработан алгоритм прогнозирования эффекта от проведения ГТМ. Согласно полученным результатам численного моделирования, применение алгоритма позволило уменьшить ошибку прогнозирования эффекта от проведения ГРП в 1,87 раз.
7. Спроектировано и реализовано алгоритмическое и программное обеспечение АСППР планирования ГТМ, автоматизирующее решение задач: формирования первичного списка скважин-кандидатов, формирования альтернатив ГТМ, прогнозирования эффекта от проведения и оценки эффективности мероприятия.
8. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении следующих работ: «Создание прототипа системы мониторинга сетевой инфраструктуры и информационных систем ОАО «Томскнефть» ВНК» (договор №4-303/2012); «Внедрение информационной подсистемы по сбору и хранению исполнительной документации (ПСХИД) на объекты обустройства Ванкорского нефтяного месторождения» (ООО «РН-Информ», договор 08/0189/Д); «Исследование принципов построения системы мониторинга технологических процессов и адаптивного управления разработкой "интеллектуального" месторождения на основе постоянно действующей геолого-технологической модели месторождения» (государственный контракт № 14.515.11.0047, заключённый в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»); «Разработка российских технологии и стандартов передачи данных для «интеллектуальных» месторождений, совместимых с международными» (соглашение о предоставлении субсидии №14.575.21.0023, заключённое в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»).

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работы, опубликованные автором в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:*

1. Силич В.А., Савельев А.О., Комагоров В.П., Алексеев А.А. Построение информационной системы поддержки принятия решений при выборе вида геолого-технического мероприятия на нефтедобывающей скважине // Доклады Томского Государственного Университета систем управления и радиоэлектроники. - 2011 - №.2(24) - С. 295-299.

2. Силич В.А., Ямпольский В.З., Савельев А.О., Комагоров В.П., Алексеев А.А., Гребенщиков С.А. Применение методологии OMSD для моделирования системы планирования геолого-технических мероприятий // Известия Томского политехнического университета. – 2012 – №5 - С.42-47.
  3. Гребенщиков С. А., Силич В. А., Комагоров В. П., Фофанов О. Б., Савельев А. О. Технология разработки системы поддержки принятия решений для управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. - 2012 - Т. 321 - №. 5 - С. 47-51.
  4. Гребенщиков С. А., Силич В. А., Комагоров В. П., Фофанов О. Б., Савельев А. О. Технология разработки информационной системы поддержки принятия решений для управления проектными работами при обустройстве месторождений // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». - 2012. - Вып. 29 - №. 4. - С. 38-42.
  5. Силич В.А., Комагоров В.П., Савельев А.О. Принципы разработки системы мониторинга и адаптивного управления разработкой "интеллектуального" месторождения на основе постоянно действующей геолого-технологической модели // Известия Томского политехнического университета. - 2013. - Т. 323, № 5.- С. 94-100.
  6. Комагоров В. П., Фофанов О. Б., Савельев А. О., Мехтиев Э. М., Алексеев А. А. Система адаптивного управления разработкой "интеллектуального" месторождения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. - 2014 - №. 4(34). - С. 171-176.
- Работы, индексируемые в международной базе цитирований Scopus*
7. Silich V.A., Savelev A.O., Cherkashin A.Yu. Algorithm of the Alternatives Generation in the Design of the Geological and Engineering Operations // Key Engineering Materials. - 2016 - №685.- p. 902-906.
  8. Silich V.A., Savelev A.O. Development of the Decision-Making Algorithm on the Geological and Engineering Operations Based on the Infrastructure of the Digital Oil Field // Key Engineering Materials. - 2016 - №685.- p. 907-911.
- Другие работы, опубликованные автором по теме диссертации:*
9. Силич В.А., Савельев А.О. Разработка алгоритма принятия решений по выбору геолого-технического мероприятия для нефтедобывающей скважины // Проблемы информатики №2(14) 2012 – С. 31-36.
  10. Савельев А.О., Алексеев А.А. Реализация алгоритма принятия решений о проведении ГРП с использованием MS SQL Analysis Services // VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», Томск, 23-24 марта 2011. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 - С. 109-110. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2011/K01/039.pdf>.
  11. Савельев А.О. Подход к проектированию хранилища данных для анализа информации о состоянии нефтедобывающих скважин при планировании

- геолого - технических мероприятий // IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», Томск, 21-22 марта 2012. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 - С. 245-247. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2012/C28/088.pdf>.
12. Кобызь Г. В., Савельев А. О. Проблемы и современные подходы мониторинга корпоративных вычислительных сетей [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 13-16 Ноября 2012. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 - С. 21-22. - Режим доступа: [http://msit.tpu.ru/files/conf\\_2012.pdf](http://msit.tpu.ru/files/conf_2012.pdf).
  13. Савельев А. О. Алгоритм автоматизированного выявления скважин с недоиспользованным потенциалом при планировании геолого-технических мероприятий [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 148-149. - Режим доступа: [http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V2/C04\\_V2.pdf](http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V2/C04_V2.pdf).
  14. Савельев А. О. Модуль контроля целостности системы поддержки принятия решений по планированию геолого-технических мероприятий [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 150-151. - Режим доступа: [http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V2/C04\\_V2.pdf](http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C04/V2/C04_V2.pdf).
  15. Кочегуров А. И., Марчуков А. В., Савельев А. О., Черкашин А. Ю. Разработка технических и программных решений передачи данных в информационной инфраструктуре «интеллектуального» месторождения // Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполненных вузами и научными организациями Сибирского федерального округа в рамках участия в реализации Федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий в 2014 году: тезисы докладов научно-технической конференции, Кемерово, 1-5 Декабря 2014. - Кемерово: КемТИПП, 2014 - С. 16-19.
  16. Кочегуров А.И., Марчуков А.В., Савельев А.О, Черкашин А. Ю., Гончаров А.С., Дутов И.Ю. Программные решения на базе стандарта WITSML для передачи технических скважинных данных // Научная конференция с представителями сектора исследований и разработок, коммерческого сектора, высшего профессионального образования Сибирского федерального округа в рамках участия в 2015 году в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий,

- заказчиком которых является Минобрнауки России: материалы конференции. – Кемерово, 2015. - С. 150 - 154.
17. Савельев А. О. Алгоритм формирования альтернатив при планировании геолого-технических мероприятий [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 09-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 304-305. - Режим доступа: [http://portal.tpu.ru/f\\_ic/files/science/activities/msit/msit2015\\_tom1.pdf](http://portal.tpu.ru/f_ic/files/science/activities/msit/msit2015_tom1.pdf).
  18. Савельев А. О. Алгоритм прогнозирования эффекта от проведения геолого-технических мероприятий [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 09-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 306-307. - Режим доступа: [http://portal.tpu.ru/f\\_ic/files/science/activities/msit/msit2015\\_tom1.pdf](http://portal.tpu.ru/f_ic/files/science/activities/msit/msit2015_tom1.pdf).
  19. Гребенщиков С.А., Комагоров В.П., Фофанов О.Б., Савельев А.О., Алексеев А.А. Система адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения на основе постоянно действующей геолого-технологической модели // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». - 2015. - Вып. 39 - №. 2. - С. 60-64.

**Свидетельства об официальной регистрации программных систем, разработанных на основе результатов диссертации:**

1. Программное обеспечение для мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального месторождения» / А.О. Савельев [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660761 от 18.11.2013.
2. Агент WITSMML Адениум для станций управления бурением / А.О. Савельев [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660996 от 14.10.2015.