



**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОИСКОВ, РАЗВЕДКИ И ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Ключевые слова: технология моделирования, разведка месторождений, нефть и газ.

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2019-6-11-17>

*Information about the nomination of work for prizes
Government of the Russian Federation in the field of science and technology for 2020*

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MODELING TECHNOLOGIES
FOR HYDROCARBON DEPOSITS AND MATHEMATICAL METHODS TO SOLVE
THE PROBLEMS OF SEARCHING, EXPLORATION AND PRODUCTION
OF OIL AND GAS BASED ON INTEGRATED GEOLOGICAL, GEOPHYSICAL
AND GEOCHEMICAL STUDIES**

Keywords: modelling technology; exploration of deposits; oil and gas.

Учёный совет Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) выдвинул научно-исследовательские разработки «Разработка и применение технологий моделирования месторождений углеводородов и математических методов для решения задач поисков, разведки и добычи нефти и газа на основе комплексных геолого-геофизических и геохимических исследований» на соискание премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2020. Авторами разработки являются Косьянов В.А. (Руководитель работы), Бахтизин Р.Н., Болотов С.Н., Гутман И.С., Керимов В.Ю., Котенёв Ю.А., Куликов В.В., Мустаев Р.Н., Петров А.В., Шахвердиев А.Х.

Выдвинутая на соискание премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники научно-исследовательская разработка применяется в области разведки, добычи и переработки полезных ископаемых. В рамках работы разработаны технологии моделирования и математические методы для решения задач, стоящих перед каждым этапом и стадией жизненного цикла месторождения углеводородов — поисков, разведки и добычи. Жизненный цикл месторождения может быть представлен как серия проектов направленных на реализацию отдельных стадий и этапов на основе применения разработанных технологий моделирования и математических методов. Разработанные авторами технологии моделирования углеводородных систем и методические приёмы численного моделирования поисков и разведки

являются результатом проведённых комплексных исследований геолого-геофизических, геохимических, геофлюидодинамических и др. условий формирования и закономерностей распространения месторождений углеводородов в различных регионах и акваториях. Таким образом, для каждого этапа геологоразведочных работ и эксплуатации месторождений нефти и газа были разработаны технологии моделирования и математические методы, которые описаны ниже.

1. Технология моделирования углеводородных систем и методика численного моделирования прогноза, поисков и разведки месторождений нефти и газа

Технология моделирования углеводородных систем (УС) и исследование их элементов позволяют: проводить моделирование сложных флюидодинамических процессов, протекающих в осадочном чехле в геологическом масштабе времени; прогнозировать современные свойства геофлюидальных систем; создавать различные сценарии эволюции углеводородных систем во времени и пространстве; эффективно организовать геологическую информацию, что обеспечивает эффективность исследований в направлении прогноза и поисков УС; проводить быструю переоценку объекта при изменении любого параметра. Особенностью разработанной технологии является создание методики и методических приемов, в основу которых



положены геологические модели и программные модули численного моделирования, отражающие особенности регионов со сложным геологическим строением, где имеют место проявления магматизма, соляной тектоники, эрозии, аномально высоких пластовых давлений, грязевого вулканизма, неравно-весной лавинной седиментации, стрессовых палеотектонических и неотектонических механизмов, покровно-шарьяжной тектоники, ступенчато-блоково-глыбового строения и др.

Цифровая бассейновая модель — это рабочая гипотеза, в рамках которой вся накопленная геологическая информация систематизирована с единых методологических позиций, что позволяет осуществлять оценку нефтегазоносности на каждом этапе исследований. По мере получения новых данных уточняется модель и вместе с ней прогноз. В этом смысле современный эффективный геологоразведочный процесс представляет собой технологический цикл, включающий несколько вложенных циклов (рис. 1).

Таким образом, основу современного технологического цикла составляют два базовых элемента (цифровая модель бассейна и углеводородных систем) и два ключевых элемента, к которым, относится оценка рисков, которая позволяет обоснованно оптимизировать затраты и увеличивать эффективность ГРП. Экономический аспект особенно актуален, когда отчетливо обозначился переход к изучению и освоению морских месторождений, выход во всё более глубоководные провинции, а так же — на месторождения, залегающие на больших глубинах и во всё более слож-

ных горно-геологических условиях, что приводит к существенному удорожанию всех стадий геологоразведочного процесса. Результаты моделирования позволяют проводить оценку геологических рисков, направленную на повышение эффективности ГРП.

Для оценки «**риск-моделей**» на разных трехмерных моделях использовалось разное число вариаций. Так, к примеру для региональной модели строения и эволюции кайнозойского чехла северо-восточной части Присахалинского шельфа были созданы и проанализированы 80 региональных трехмерных моделей, а для Киринского, Аяшского и Восточно-Одоптинского участков — по 50 «риск-моделей». Большое число региональных моделей обусловлено желанием привнести большее понимание в региональные процессы и элементы углеводородных систем.

Для этого были использованы как уже существующие скважины, так и проектные, которые были добавлены в модели по результатам базового моделирования и планов бурения в акватории Присахалинского шельфа. Наиболее информативным способом анализа результатов риск-моделирования являются «диаграммы торнадо». Эти диаграммы были построены для скважин и иллюстрируют степень корреляции калибруемого параметра с каждой неопределенностью. Итоговая карта геологических рисков составлена путем перемножения «гридов» всех трех факторов между собой. Результирующая карта часто в зарубежной литературе называемая «Светофор» показана на рис. 2. В соответствии с выбранной методикой по-

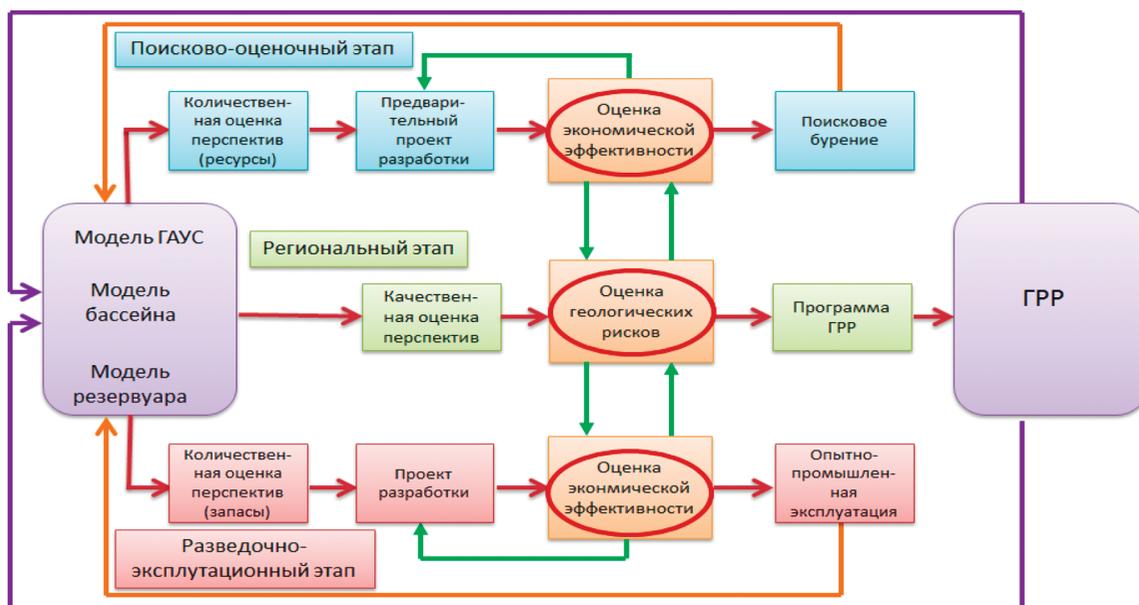


Рис. 1. Технологический цикл современного геологоразведочного процесса

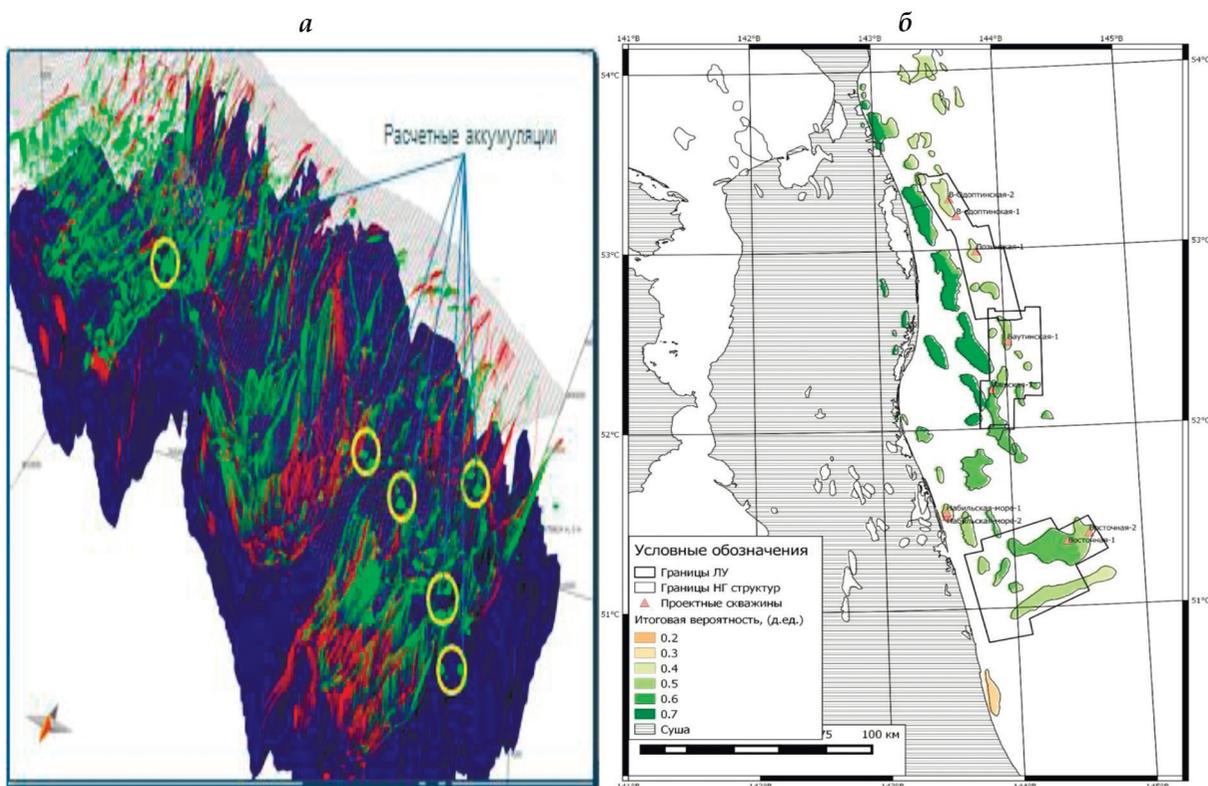


Рис. 2. а — Модель миграции и аккумуляции; б — карта вероятности открытия залежей УВ

строения карты рисков, перспективным объектам были присвоены итоговые коэффициенты. С положительной стороны выделяются проектные скважины Аяшская-1 и Восточная-1.

Таким образом, применение цифровых технологий и численного моделирования позволяет осуществить реконструировать геологические процессы, протекающих в осадочных бассейнах с использованием физико-математического аппарата и провести комплексные исследования закономерностей формирования месторождений углеводородов. В результате моделирования углеводородных систем, наряду с графическим представлением, создаются численные модели, в которых взаимосвязанные термодинамические и геологические процессы и их результаты могут быть воспроизведены с целью более полного понимания строения бассейна, количественного анализа и прогноза зон вероятного нефтегазоаккумуляции.

2. Технология региональной и детальной корреляция разрезов скважин в автоматическом и интерактивном режимах с целью распознавания условий залегания и формирования пород сложно построенных геологических объектов

Созданная технология и отечественный программный комплекс корреляции разрезов сква-

жин и геолого-промыслового моделирования «AutoCorr», при разработке которого отрабатывались основные принципы и методики автоматической и интерактивной корреляции разрезов скважин, внедрение которых позволяет по-новому взглянуть на особенности залегания и формирования сложно построенных нефтегазоносных объектов. Технология автоматической и автоматизированной корреляции представляет собой единый процесс изучения исследуемых нефтегазоносных объектов, который обеспечивает, одновременно с получением первичных результатов корреляции, возможность оценки ее качества с помощью запатентованного метода возврата в известную скважину по триангуляции. «AutoCorr» реализует построение детальной корреляции геофизических разрезов пар скважин в автоматическом и полуавтоматическом режиме со скоростью на порядки превосходящие любые интерактивные методы.

Полученная корреляция отражает строение всего разреза с детализацией до нескольких шагов оцифровки каротажа. Автоматическая проверка согласованности полученных детальных корреляций и выделение тех, в которых содержатся ошибки рассогласования, дают возможность сконцентрировать внимание специалиста на проблемных частях месторождения, освобождая от рутинной работы в простых ситуациях. Таким образом,

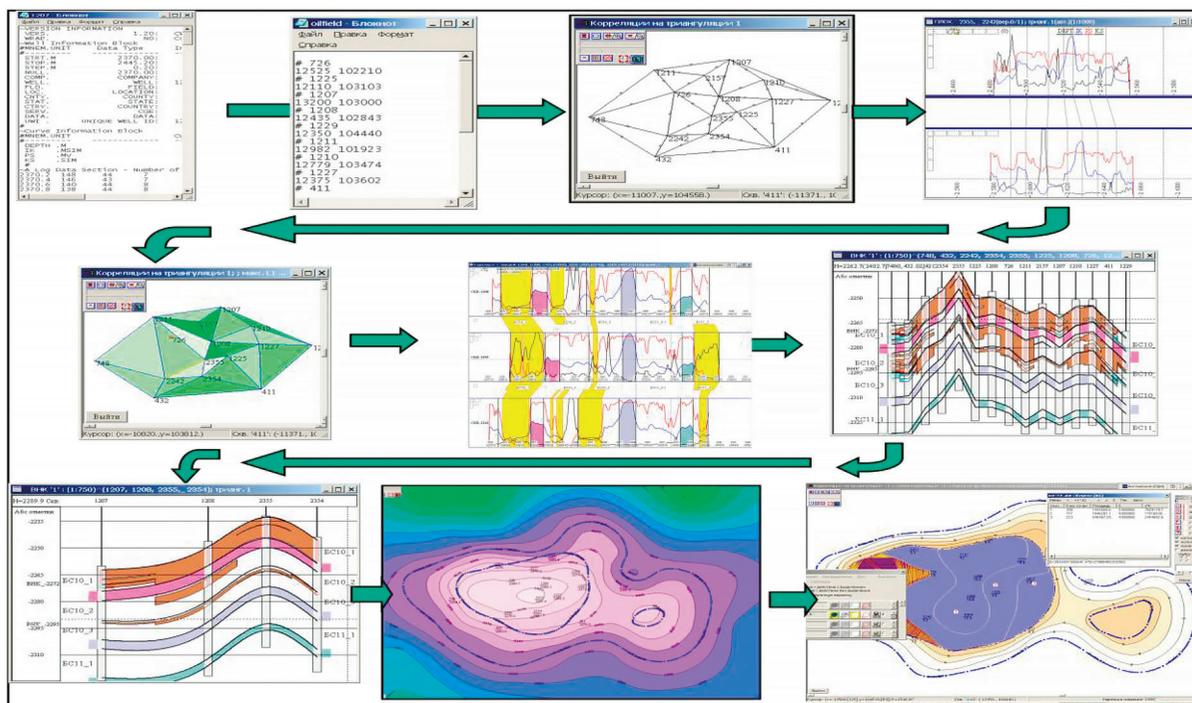


Рис. 3. Последовательность непрерывного процесса моделирования залежей УВ

в «AutoCorr» предусмотрена определенная последовательность (рис. 3), в которой на основе подготовки и выполнения корреляции исходной пары скважин по созданной программой триангуляционной сети осуществляется парная корреляция, а затем построение схем корреляции, охватывающих все без исключения скважины изучаемого объекта. При этом операции в интерактивном режиме отличаются от ручного варианта быстродействием и большим набором высокоэффективных процедур по принципу «одной кнопки». Благодаря всему этому использование модуля «AutoCorr» существенно повышает скорость выполнения проектов и качество полученных моделей по сравнению с любыми импортными программными продуктами.

Процесс корреляции разрезов скважин сопровождается следующими стадиями: распознавание образов геофизических кривых, геологических моделей сложнопостроенных объектов, а также распознавание условий их залегания и формирования. Такая методическая последовательность опробована на примерах корреляции сложнопостроенных нефтегазоносных объектов в пределах основных нефтегазоносных провинций страны. Программа содержит полный комплекс средств для процесса 2D моделирования и подсчета запасов, включает блоки построения схем детальной корреляции, обоснования контактов, оформления планшетов, профилей с различными видами выклинивания и литологического замещения, карт и подсчетных

планов в полном соответствии с требованиями ФБУ «ГКЗ», что также выгодно отличает её от импортных решений.

3. Концептуальные основы и технология системной оптимизации процесса разработки нефтяных месторождений

Созданы концептуальные основы системной оптимизации процесса разработки нефтяных месторождений на основе теоретических, экспериментальных и промысловых исследований с применением альтернативных детерминированных и стохастических методов анализа, диагноза, прогноза и управления системой нефтегазовых объектов. В основу математических методов положена теория фильтрации однородной и газированной жидкостей в коллекторах, представленных упругими, упругопластическими и пластическими деформируемыми пористыми и трещиновато-пористыми средами, что позволило создать модельные основы эволюции пластовой системы и последствий нарушения принципа системности при разработке нефтяной залежи; исследованы изменения соотношений параметров подвижности под влиянием изменений динамических условий при фильтрации флюидов в упругих, упругопластических и пластических средах и оценка воздействия этих изменений на продуктивность скважин; разработана теория фильтрации однородной и газиро-



ванной жидкостей в коллекторах, представленных упругими, упругопластическими и пластическими деформируемыми пористыми и трещиновато-пористыми средами; разработан способ определения местонахождения застойных и слабодренлируемых зон нефтяной залежи и вовлечения в активную разработку; решена задача системной оптимизации режима работы фонда скважин на основе изучения влияния структуры потока на их производительность, регулирование и унификацию технологических режимов системы скважин с использованием возможности теории катастроф.

Впервые разработана модельная основа унифицированной методики расчета технологической эффективности геолого-технических мероприятий (ГТМ), в том числе методов повышения нефтеотдачи пластов и методов интенсификации добычи нефти. На основании решения важных научно-технологических проблем нефтегазовой отрасли разработаны и внедрены: новая альтернативная технология нестационарного заводнения месторождений нефти предотвращающая негативные последствия неустойчивости водо-нефтяного контакта; теоретические и практические основы разработки глубоких и сверхглубоких месторождений углеводородного сырья (УВС) с упругими (обратимыми), упругопластическими (частично необратимыми) и пластическими (необратимыми) режимами пласта; новая методика выбора оптимального варианта проекта разработки нефтяных месторождений в условиях риска неопределенности и неточности геологических и извлекаемых запасов; энерго-ресурсосберегающие реогазохимические технологии повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти на основе генерации углекислого газа (CO_2) в пластовых условиях; унифицированная методика оценки технологической и экономической эффективности геолого-технических мероприятий, в том числе методов повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти.

Разработанные авторами технологии служат основой для импортозамещения зарубежных аналогов. Широкое внедрение в нефтегазовой отрасли получили созданные «Унифицированная методика определения технологической эффективности геолого-технологических мероприятий» и программные комплексы «ШАХМЕТ» свидетельство о регистрации 2002611922, 2002 г., «ШАХМЕТЭК» свидетельство о регистрации 200561102, 2005 г. Заложены основы малопараметрического стохастического моделирования процесса разработки месторождений нефти и газа. Разработана новая методика, обеспечивающая выбор оптимального варианта проекта разработки месторождений угле-

водородов в условиях неопределенности и недостаточности информации. Разработанная на этой основе экономико-математическая модель выбора оптимального варианта проекта разработки при существенном отклонении запасов составляет основу программного пакета «Оптима» (свидетельство о регистрации 2008610892, 2008 г.).

4. Технология моделирования углеводородных систем и адресного воздействия для повышения эффективности выработки трудноизвлекаемых запасов нефти

Технология позволяет создавать адекватные реальным объектам модели с трудноизвлекаемыми запасами (ТриЗ) и на основании экспериментальных, теоретических исследований, геолого-математического и геолого-статистического моделирования создать наиболее приемлемую концепцию разработки объекта и внедрения адаптированных технологий увеличения нефтеотдачи. Она апробирована в двух нефтегазоносных провинциях РФ – Волго-Уральской и Западно-Сибирской. Научная новизна разработки связана: с созданием научно-методических основ геолого-технологического обоснования разработки месторождений с различными категориями трудноизвлекаемых и остаточных запасов нефти; разработкой методики выбора объектов, обоснования адресного воздействия и адаптации технологий увеличения нефтеотдачи на залежах нефти с трудноизвлекаемыми и остаточными запасами нефти; разработкой новых технологий физико-химического и микробиологического воздействия на трудноизвлекаемые запасы нефти. С привлечением аппарата математического моделирования экспериментально и теоретически обоснованы и оптимизированы технологии разработки трудноизвлекаемых запасов в карбонатных и терригенных коллекторах;

Совершенствование разработки продуктивных объектов предусматривается по трем наиболее важным направлениям: детальное геолого-технологическое обоснование эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи и технологических мероприятий по совершенствованию ряда технологий и разработке новых; оценка экономической эффективности и целесообразности технологических решений, дифференцированная оценка затрат и себестоимости добычи нефти по объектам внедрения с целью их снижения; оценка уровня экологической безопасности применения методов увеличения нефтеотдачи в геологических условиях объектов и предупреждение техногенного воздействия на окружающую среду. Для комплексного обоснования и прогноза эффективности гео-



лого-технологических мероприятий реализован следующий системный подход: с помощью геолого-промыслового или же математического моделирования производится дифференциация остаточных балансовых и извлекаемых запасов по продуктивным пластам, залежам и зонам; производится картирование остаточных запасов; на основе подготовленной базы геолого-физических и промысловых данных формируется «Информационно-поисковая система оперативного контроля, анализа и регулирования процесса разработки нефтяных месторождений (программный комплекс «Geomage»).

5. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D»

Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» предназначена для интерпретационной обработки площадной и пространственной геолого-геофизической информации. Функциональное наполнение компьютерной технологии включает программную реализацию методов теории вероятностей и математической статистики, спектрально-корреляционного и регрессионного анализа, дисперсионного и факторного анализа, линейной оптимальной фильтрации, статистической теории обнаружения слабых сигналов, алгоритмов кластер-анализа и распознавания образов. Типичные задачи интерпретационной обработки включают: *оценку статистических, спектрально-корреляционных и градиентных характеристик полей в адаптивных скользящих окнах; автоматическое трассирование осей аномалий. разложение потенциальных полей на составляющие путем двумерной адаптивной фильтрации, направленной на выделение аномальных эффектов в условиях непрерывной изменчивости спектрально-корреляционных свойств полезного сигнала и помехи; выделения слабоконтрастных геологических объектов путем реализации самонастраивающихся фильтров и межпрофильной корреляции аномальных эффектов; комплексный анализ потенциальных полей и их атрибутов оригинальными методами без эталонной классификации, распознавания образов и компонентного анализа; статистическое зондирование геополей; трансформации потенциальных полей в нижнее полупространство с оценкой объемного распределения избыточной плотности и магнитной восприимчивости и построением глубинных разрезов; построения магнитных и плотностных объемных моделей.*

Графические построения и визуализация результатов интерпретационной обработки осуществ-

ляются в технологии на основе разработанных средств визуализации геолого-геофизической информации в виде растровых карт, карт графиков и отдельных графиков и объемного представления трехмерной информации. Отличительной особенностью алгоритмов компьютерной технологии «КОСКАД 3D» является возможность выделения аномальных эффектов в условиях нестационарности геофизических полей, когда наблюдается изменение спектрально-корреляционных свойств изучаемого поля как по профилям и площади, так и в пространстве. Это предопределяет преимущества системы «КОСКАД 3D» по сравнению со многими пакетами и системами интерпретационной обработки, в которых задачи интерпретационной обработки реализуются в предположении стационарного характера анализируемого геофизического поля, которое никогда не выполняется на практике.

Комплексные исследования и полученные результаты использованы для создания рационального недропользования и формирования программ долгосрочных и среднесрочных планов геологоразведочных работ, а технологии моделирования поисков, разведки, добычи и транспортировки углеводородного сырья — определить новые направления развития в части цифровизации ТЭК РФ. Разработанная технология корреляции разрезов скважин и геолого-промыслового моделирования «AutoCorr» одобрена и рекомендована для решения задач по подсчету геологических запасов в ФБУ «ГКЗ». Унифицированная методика определения технологической эффективности геолого-технологических мероприятий и программные комплексы (свидетельства о регистрации 2002611922, 2002 г., и 200561102, 2005 г.), обеспечивающие выбор оптимального варианта разработки месторождений углеводородов в условиях неопределенности и недостаточности информации и созданная на ее основе экономико-математическая модель составляет основу программного пакета «Оптима» (свидетельство о регистрации 2008610892, 2008 г). имеет большое значение для практики и широко внедряются в нефтегазовой отрасли.

Внедрение предложенных технологий обеспечили прирост ресурсной базы: по объектам ПАО «Газпром» (Черноморско-Каспийский регион, Оренбургское Предуралье и Прикаспийская синеклиза) нефти на 431,18 млн. т и газа на 2,478 трлн. м³; по объектам Министерства природных ресурсов и экологии РФ — по Восточной Сибири на 58,5 млрд. т н.э. и по Охотскому морю на 5,7 млрд. т н.э. Созданные технологии повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти широко



внедрены на нефтяных месторождениях ведущих нефтедобывающих компаний России — ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпромнефть», ОАО «ТНК-ВР», ОАО «Славнефть», ПАО РОСНЕФТЬ, ПАО АНК «Башнефть», ПАО «Татнефть», ООО ТНК-ВР «Оренбургнефть», ООО «Лукойл-Западная Сибирь» и ряда зарубежных стран — Китайская Народная Республика, Азербайджан, Казахстан (АО «Эмбаунайгаз», «ЮжКазМунайГаз»), США. Реогазохимическая технология внутрислоевого газогенерации для извлечения остаточных запасов нефти используется компаниями GSC Group Inc. (США), SINOPEC, CNOOC, COSL (КНР). Технология «КОСКАД 3D» широко используется АО «Росгеология» Иркутское геофизическое подразделение (ИГП), ЗАО КЦ «РОСГЕОФИЗИКА», АО «ГНПП «Аэрогеофизика», ФГУП «ЦНИГРИ»,

ФГУП «ВИМС», ООО «ТНГ-Казань-геофизика», ТОО «Каззарубежгеология», ОАО «Сибирский научно-аналитический центр», ТОО «Персиан Гадир Казахстан Ко» (Persian Ghadir Kazakhstan Co), Vietnam Petroleum Institute и многих других.

Экономический и социальный эффекты внедрения разработок выражаются в наращивании ресурсной базы минерального сырья в РФ, снижении затрат за счет оптимизации и повышения эффективности геологоразведочных работ, интенсификации добычи и транспортировки нефти и газа. Социальным эффектом является использование результатов исследований в создании университетами комплексов образовательных программ подготовки магистров, кандидатов и докторов наук, а также в создании учебников и учебных пособий.

Уважаемые коллеги!

Просим направить свои предложения и замечания по выдвигаемой работе в адрес редакции любым удобным способом.