



В. Я. Шкловер
ООО «Системы для микроскопии
и анализа»¹
директор



Н. А. Артемов
ООО «Системы для микроскопии
и анализа»¹
ведущий геолог



И. Г. Марясев
ООО «Системы для
микроскопии и анализа»¹
руководитель группы
геологических исследований



Т. Г. Дмитриева
канд. физ.-мат. наук
ООО «Системы для микроскопии
и анализа»¹
руководитель сектора
3D-микроскопии



А. Ю. Рашковский
канд. физ.-мат. наук
ООО «Системы для микроскопии
и анализа»¹
ведущий эксперт
rashkovskiy@microscop.ru



В. А. Карпов
канд. геол.-мин. наук
заслуженный геолог РФ
эксперт ГКЗ
журнал «Недропользование
XXI век»²
член редакционной коллегии
valkarp@yandex.ru

Технология анализа и цифрового моделирования керна как составляющая часть инфраструктуры «цифрового месторождения». От геологоразведки до промышленной эксплуатации

¹Россия, 121353, Москва, Сколковское ш., 45, офис 20.

²Россия, 115054, Москва, Большой Строченовский пер., 7, офис 509.

В статье рассматриваются аспекты применения и место технологии «Цифровой керн» в решении задач современного цикла ГРП, добычи углеводородов и твердых полезных ископаемых. Рассматриваются составные части аппаратно-методического комплекса и программные средства, приводятся ключевые результаты, которые возможно применять для принятия информированных решений в ходе разработки методов увеличения нефтеотдачи и повышения извлекаемости из пород с рассеянным ОБ и ТПИ

Ключевые слова: цифровой керн; ТПИ; ТриЗ; цифровое месторождение; технологическая карта

Развитие современной экономики сопровождается продолжением роста спроса на энергоносители и сырье для его дальнейшей высокотехнологичной переработки. В условиях современного перехода на новый технологический уклад Индустрия 4.0 особую роль приобретает цифровизация всех технологических процессов, в том числе и тех, что опираются на традиционные физические активы.

Ключевые задачи «Цифровой энергетики» направлены на оптимизацию производственной цепочки от разведки и добычи полезных ископаемых до поставки энергии потребителю. При этом необходимо не только сохранять уровень добычи, но и постоянно повышать маржинальность и снижать затраты при переработке нефти и газа, а также добыче и переработке твердых полезных ископаемых. В связи с этим особую роль приобретает развитие мер государственной поддержки центров компетенций, формирование программ по подготовке и переподготовке кадров для создания полноценной инфраструктуры, таких как «Цифровое месторождение», «Цифровая шахта» и «Цифровой карьер». В рамках данной инфраструктуры ведущие системообразующие компании России [5], представители научно-исследовательских организаций и передовых бизнес-структур создают платформы для сбора, обработки и использования «больших данных», которые должны представлять единое для участников решение с открытым API, обеспечивающим защищенность обмена данными [1, 2]. Выделение блока ГРП в программе цифрового месторождения в отдельное направление обусловлено как необходимостью повышения коэффициента извлечения нефти и уровня добычи ТПИ при снижении операционных затрат, так и повышением скорости и качества обмена данными для принятия управленческих решений в цифровой форме. В связи с этим требуется создание единого рабочего процесса «Цифровой керн», так называемого *Workflow*, которое бы привело к повышению эффективности исследовательского цикла ГРП и сокращению сроков возврата инвестиций. На сегодняшний день получение исчерпывающих массивов данных о вмещающей породе непредставимо без привлечения новейших методик анализа и уточнения данных по запасам и извлекаемости полезных ископаемых. В современной добывающей промышленности возникают вопросы о целесообразности применения и прогнозирования прибыли при использовании тех или иных методов извлечения сырья, при добыче УВ и ТПИ [2, 3].

В установившейся на сегодняшний день тенденции увеличения спроса на нефть и драгоцен-

ные металлы наиважнейшим является своевременное получение информации для планирования мероприятий по повышению коэффициента нефтеотдачи и извлекаемости твердых полезных ископаемых.

Жесткое экологическое законодательство диктует сокращение применения токсичных химических веществ, которыми могут выступать ПАВ, неразлагаемые полимерные материалы, кислоты, участвующие как в процессе бурения скважины, так и в процессе третичных методов воздействия на пласт для повышения КИН. В связи с этим важную роль играет возможность проведения виртуальных экспериментов по воздействию на породу.

Проведение работ в тяжелых климатических условиях требует максимального сокращения простоев буровых установок и неэффективного пребывания персонала «в поле», что также достигается ускорением ГРП и сокращением сроков запуска в эксплуатацию скважин и рудников.

Активное инвестирование крупными добывающими компаниями в цифровые технологии на всех стадиях от разведки до доставки полезных ископаемых приводит лидеров рынка к переходу к «Цифровой компании». «Цифровая компания» подразумевает наличие физических активов, в том числе аппаратных и программных решений.

По нашему мнению, «Цифровой керн» – это совокупность данных об объемной структуре породы, элементном, химическом и минеральном составе ее компонентов: пустотном пространстве, органическом веществе, рудных и драгоценных металлов, совмещенная на различных масштабах от метров – до нанометров, а также результатов компьютерной обработки трехмерных моделей внутреннего строения образцов и моделирования физических свойств с привязкой получаемых данных к ГИС и ГТИ.

Технология цифрового моделирования керна отвечает на три основных вопроса:

- о наличии запасов УВ и ТПИ и их локализации в породе;
- о количестве запасов, потенциальном объеме и эффективности добычи УВ и ТПИ;
- об экономической рентабельности и методах, которые возможно применить для повышения уровня добычи на существующих или разрабатываемых месторождениях.

Сегодня непрерывно происходит разведка и поиск принципиально новых источников УВ, месторождений драгоценных и редкоземельных металлов. Так перспективными считаются месторождения, где полезные ископаемые локализованы в областях с характерными размерами менее одного микрона (баженовская свита [6,

7], Бодайбинский рудный район [9]). Традиционные эксперименты по анализу и лабораторному извлечению полезных ископаемых зачастую не отвечают на вопрос о месторасположении ценного сырья в породе, ассоциированности его к каким-либо структурным компонентам либо пустотам [13].

Так, например, тенденция развития методов геологоразведки и переработки руд благородных металлов предъявляет все более высокие требования к качеству, точности и скорости получения информации о породе для принятия информированного решения о наличии запасов коренных и россыпных месторождений, форме нахождения золота, платины, РЗМ и других драгоценных металлов в породе (свободного и рассеянного), а также характере распределения примесей.

Важным параметром, требующим постоянного уточнения, является степень извлекаемости металлосодержащих компонентов при различных методах обогащения, возможность получения полезного компонента из хвостов месторождений, контроль и корректировка технологического процесса переработки руды. Внедрение в технологический процесс методов инструментального анализа, позволяющих решить эти задачи, ведет к сокращению сроков возврата инвестиций в сложные, дорогостоящие проекты по разведке и апробации добычи на новых и существующих месторождениях.

Внедрение в практику новых физических методов анализа по технологии «Цифрой керн» ведет к повышению точности оценки запасов твердых полезных ископаемых, предъявляя более высокие требования к инженерной инфраструктуре и квалификации персонала.

Сокращение временных издержек на исследовательский цикл работ в процессе планирования ГТР требует получения точных результатов по оценке наличия и потенциальных затратах на извлечение ПИ в кратчайшие сроки. Кроме того, требуется применение комплексного подхода к исследованию не только одного пласта, интервала, но и одного образца породы.

Представляется, что переход к активному освоению ТриЗ УВ сопряжен с необходимостью смены традиционных представлений на генезис природных резервуаров УВ. К примеру, до сих пор нет однозначной модели строения ловушек УВ в баженовской свите. Как известно, традиционный тип природного резервуара УВ обладает свойством сплошности развития как породы, так и флюида в коллекторе и может быть представлен в виде привычной для всех системы «флюид в породе». Природный резервуар в баженигах отличается прерывистостью породы и сплошно-

стью флюида в коллекторской его части, образует здесь систему «порода во флюиде» и поэтому обладает инвертным характером [20]. Другая проблема, до сих пор ждущая своего решения, относится к доюрским образованиям Западной Сибири, где геометризация ловушек остается проблемной, хотя этот комплекс пород признан регионально нефтегазоперспективным [21].

В нефтепромысловой практике можно найти немало фактов, не укладывающихся в обычные представления о геологическом строении и нефтегазоносности конкретного региона. Например:

- получение притоков пластовой воды при испытании явно нефтеносного пласта по керну и данным ГИС (при доказанном отсутствии заколонных и межпластовых перетоков флюидов);
- получение притоков безводной нефти из низкоомных пластов, не связанных с вторичной минерализацией;

- получение притоков высоковязкой нефти (в виде нетекучей массы, выпадающей из труб при испытании скважины), которая после обработки бензином прямо на скважине распадается на подвижную нефть и пластовую воду;

- отсутствие притоков при испытании явно нефтенасыщенных пород-коллекторов (по керну и ГИС), не связанное с низким качеством первичного вскрытия пласта, при отсутствии скин-эффекта.

Все перечисленное каждый исследователь в отдельности толкует по-своему и вне общей увязки. Необходимость последней заставляет предположить следующее: все они обязаны развитию в недрах в немалых масштабах скопления нефти в виде эмульсий различного состава и различной продолжительности существования, наличие (палео)эмульсионных залежей [23].

Есть у этих трех самостоятельных направлений одно объединяющее свойство – приуроченность к активным разломам. Эти приразломные скопления УВ контролируются тектонитами – горными массами обломочного сложения, образованными в результате дробления исходных пород при их механических перемещениях в связи с образованием разрывных нарушений земной коры. Эти скопления приурочены к особому типу ловушек УВ, – к тектонозависимым, главным признаком которых является одновременное их образование и заполнение в последнюю фазу активизации разлома.

Для природных резервуаров УВ, формирующихся в условиях активного разлома, характерны существенные генетические отличия:

- традиционные представления о коллекторах и покрышках могут быть неприемлемыми, т.к. под влиянием тектонической переработки (и сопутствующих вторичных процессов)

бывшие покрышки (глины, плотные разности терригенных и карбонатных пород) становятся коллекторами, а песчаники, карбонаты и прочие коллекторосодержащие комплексы по этой же причине в сочетании с процессами вторичного минералообразования превращаются в покрышки;

- размеры и геометрия скопления УВ определяются, главным образом, масштабами емкости пространства;

- при значительной высоте и малой ширине залежи последняя имеет в общем случае большую протяженность, т.е. ей присущ линейный вид, коррелируемый с контролирующим разломом, либо изометрическую форму, подчиненную узлу пересечения разломов [24].

Понятно, что для обнаружения таких скоплений УВ необходимо применение соответствующей методики нефтегазопроисловых работ, обязательным элементом которой должна быть технология «Цифровой керн».

По данным консалтинговой фирмы *McKinsey & Company*, возможности автоматизации с максимальной эффективностью для разведки и добычи могут быть применены в производственных операциях; в частности, для оптимизации производства в реальном времени, оптимизации потока, автоматизации непрерывных про-

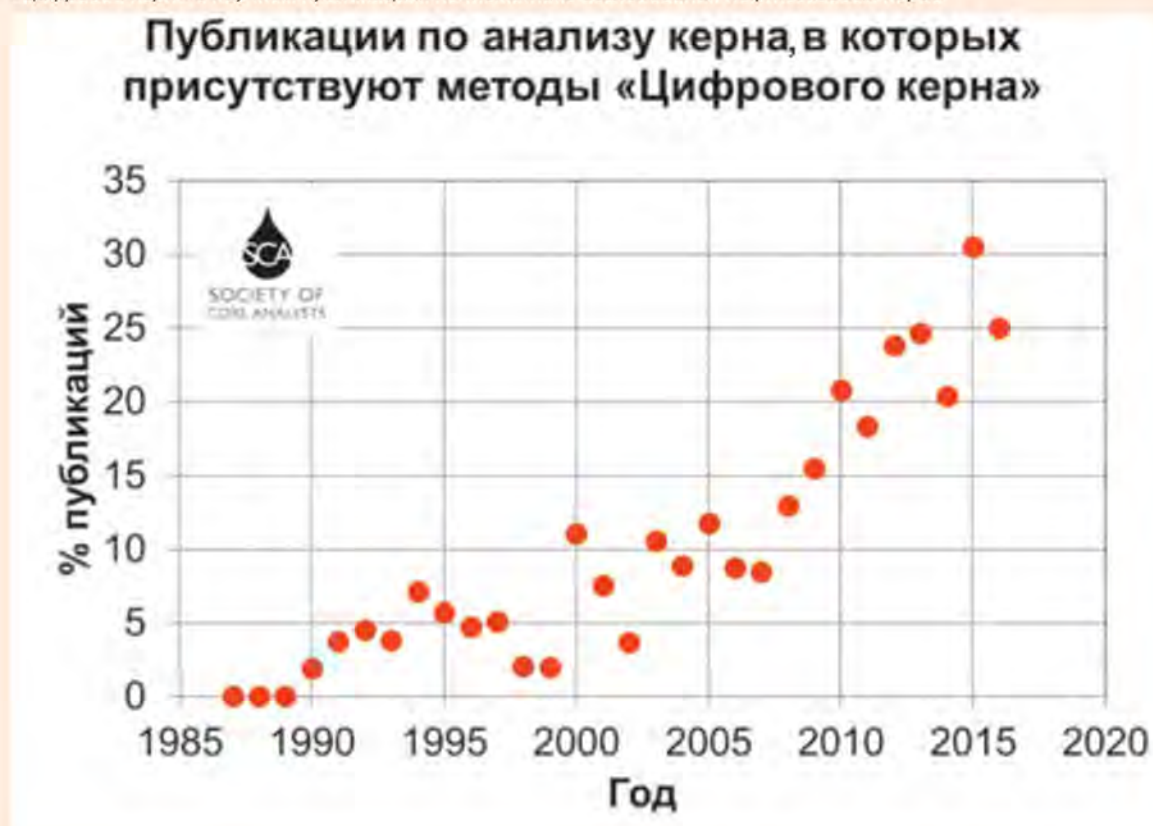
цессов и профилактического обслуживания. Поэтому оцифровка нефтяного месторождения сейчас является важнейшим аспектом развития отрасли. [8]

Технология «Цифровой керн» открывает возможность работать не с физическим образцом, который может разрушаться или оказаться поврежденным, а с цифровым образом (3D-моделью) реального физического объекта для проведения количественного анализа содержания ПИ, оценки связанности пор, проницаемости и проводить эксперименты по воздействию без разрушения физического образца.

В мире пилотные работы по «Цифровому керну» проводятся с конца 90-х годов прошлого века [10, 11]. Это относительно новый метод, получивший активное развитие и в России. По данным *Society of Core Analysts* [12], с каждым годом происходит увеличение количества научных публикаций и исследовательских работ по тематике исследования нефтегазовых образцов, которые включают в себя частично, или полностью, элементы и составные части решения, которое принято называть «Цифровым моделированием керна». Наряду с этим отмечается лавинообразное поглощение мелких компаний более крупными игроками на рынке, например, покупка *Ingrain* компанией *Haliburton*

Рис. 1.

«Цифровой керн» в научных публикациях по тематике исследования нефтегазовых пород



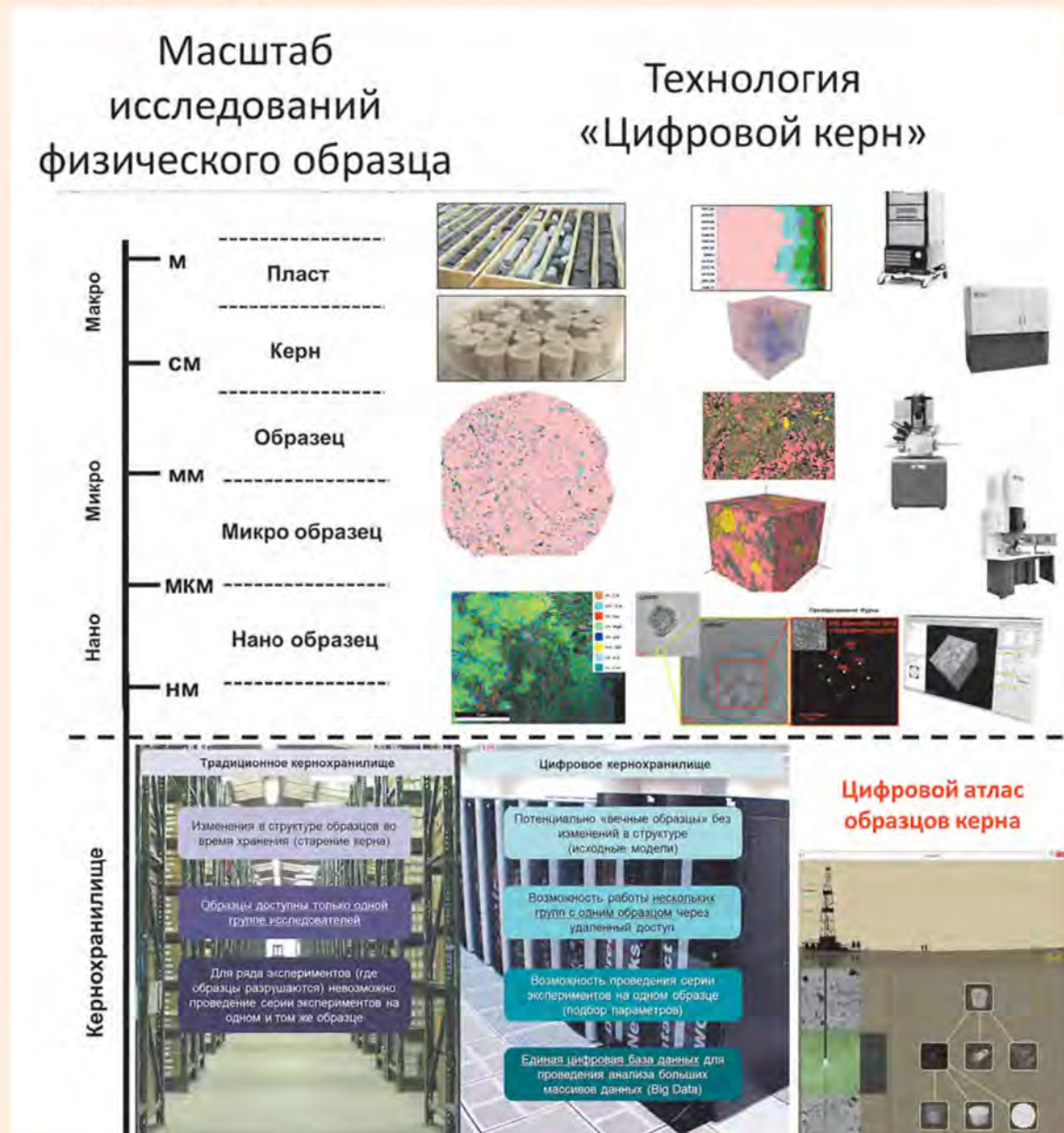
в 2017 г. и Lithicon компанией FEI (ныне часть ThermoFisher Scientific) в 2014 г.

Технология «Цифровой керн» во многих случаях оказывается точнее традиционных методов исследований (изучение шлифов и получение физических свойств породы в лабораторных условиях), а иногда становится единственным способом оценки внутреннего строения и свойств породы, позволяя получать достоверную информацию при уменьшении влияния человеческого фактора (субъективность, уровень подготовки и т.п.) и упрощая процедуры подготовки проб, например, вы-

буривания образцов из слабосцементированных пород, измельчения проб, спекания и т.д. В случае, например, пористости неконсолидированных образцов (глинистых опок) применение технологии «Цифровой керн» является единственно возможным методом для оценки нанопористости, что позволяет уточнить количество газа в породах данного типа. При этом, как видно из **рис. 2**, именно совмещение данных об объемном распределении микрокомпонент структуры, минеральном составе и тонких структурных исследований нанопористости позволяет существенно уточнить кар-

Рис. 2.

Составные части и мультимасштабный подход к накоплению информации о породе, используемый в технологии «Цифровой керн». Место цифрового кернохранилища и цифрового атласа образцов в анализе данных «Цифрового керна»



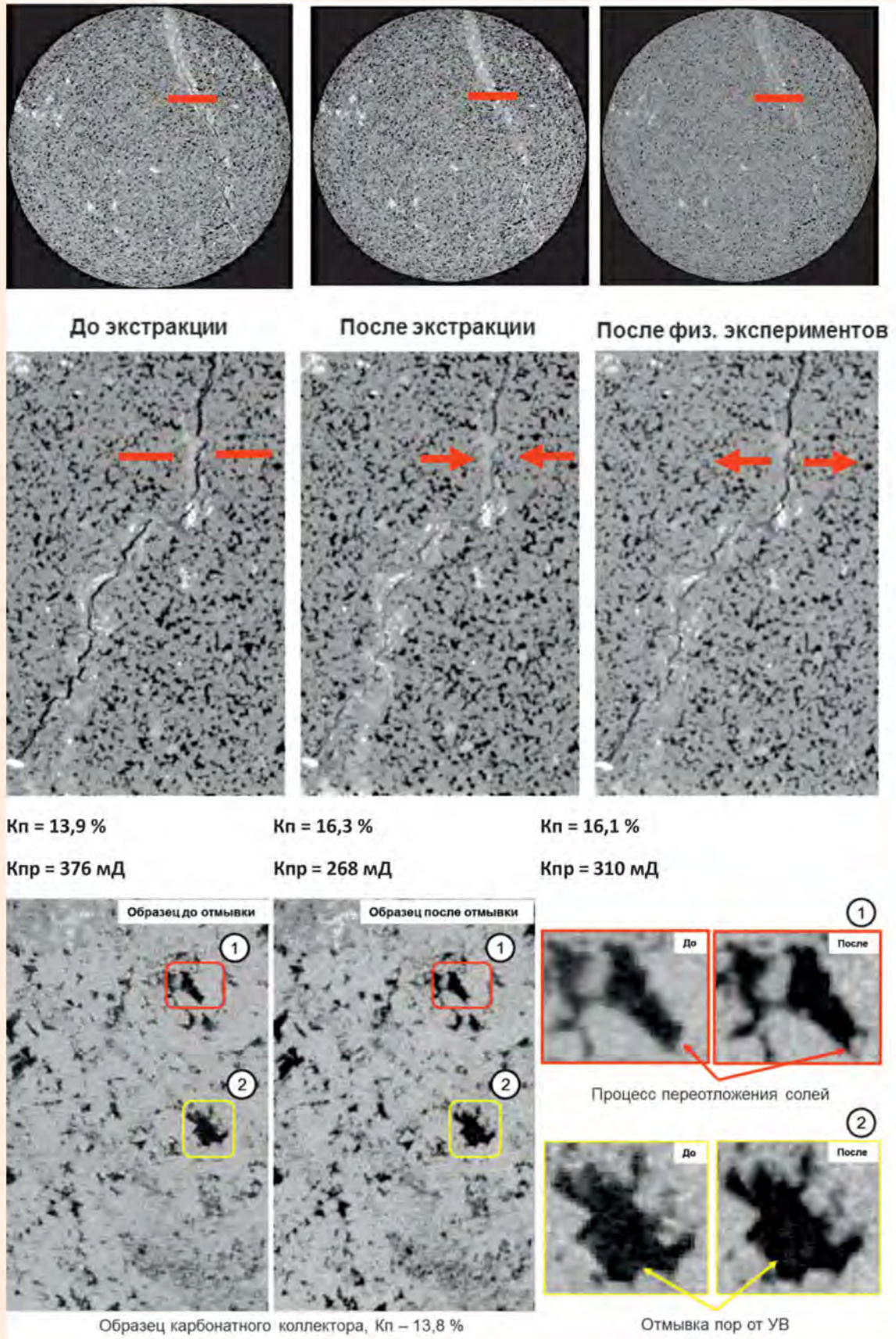


Рис. 3. Преобразования в микроструктуре петрофизических 30 мм образцов пород-коллекторов после проведения экстракции УВ и физического эксперимента по анализу пористости и проницаемости

тину строения целого месторождения на большом масштабе.

Существуют также «проблемные» типы коллекторов, для исследования которых оптимально подходит цифровое моделирование ядра. К такому типу пород относятся слабосцементированные породы и породы с хрупкой структурой, в случае с которыми невозможно проведение лабораторных исследований и затруднено хранение образцов. «Цифровой ядро» позволяет проводить исследования на обломках образцов, шлама и прочих нестандартных образцах. Это существенно облегчает задачу оценки свойств пород-коллекторов там, где количество и качество образцов ограничено (горизонтальное бурение, образцы из боковых грунтоносов и т.д.) [14, 15, 16, 17, 18, 19].

Составные части технологии «Цифровой ядро»

Технология «Цифровой ядро» подразумевает сочетание структурных методов анализа: рентгеновской микротомографии, гранулометрии, автоматической минералогии, растровой электронной и ионной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и анализа элементного и химического состава: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской флуоресцентной спектроскопии, а также микрорентгеноспектрального анализа при изучении кусковых или порошковых образцов, отобранных через необходимые интервалы по скважине, шурфу, забой и даже на пробах бурового шлама. Несмотря на то, что основная часть аппаратного комплекса требует специального оснащения лабораторных помещений, некоторое оборудование может размещаться непосредственно на буровой площадке. Так, для проведения анализа гранулометрического, минералогического и элементного состава существует оборудование, не требующее специального оснащения и квалификации персонала. Получение данных для последующего анализа проводится в режиме 24/7 с накоплением информации в специальном программном обеспечении, позволяющем в дальнейшем проводить привязку лабораторных данных и данных ГИС к разрезу, а также осуществлять дистанционный контроль над проведением анализов и корректировку технологического процесса *on-line*. Кроме того, при наличии данных со скважины в период доставки образцов ядрового материала в НТЦ возможно принятие решений о выборе конкретных образцов на основе данных предварительных полевых анализов, что существенным образом сокращает временные затраты на подготовку к R&D-циклу.

Получение и обработка «больших данных» требует создания «Цифрового ядрохранилища» – единой виртуальной базы, способной выступать, как источник постоянно пополняемой информации для *Big Data* процессинга. Такое ядрохранилище имеет ряд преимуществ перед традиционным. Во-первых, цифровые модели образцов имеют бессрочное время хранения, в них, в отличие от физических образцов ядра, не происходит изменений с течением времени. Во-вторых, для каждого образца накапливается массив данных, так называемый «Цифровой паспорт», где записана не только привязка к ГИС, но и все результаты анализов и моделирования ФЕС по технологии «Цифровой ядро». В-третьих, доступ к такому ядрохранилищу открыт 24/7 из любой точки мира одновременно несколькими группами исследователей. В-четвертых, при анализе трехмерных моделей «Цифрового ядра» отсутствует риск повреждения образцов, а в некоторых случаях, например, утраченных образцов, это вообще единственный способ сохранить информацию о породе.

Обязательным инструментом при работе с технологией «Цифровой ядро» становится цифровой атлас – единая программно-аппаратная среда для визуализации, корреляции и анализа данных, получаемых в ходе выполнения исследований образцов пород по технологии «Цифровой ядро», позволяющая любому специалисту (литологу, петрофизику, геологу, разработчику, промысловому, технологу, сопровождающему процесс), находящемуся как в исследовательской лаборатории, так и в полевых условиях, работать с терабайтами данных без использования суперкомпьютеров.

Объединение данных исследований образцов пород по технологии «Цифровой ядро» с данными геолого-геофизических исследований в рамках одной программной среды позволяет проводить визуальную корреляцию свойств и структуры различных образцов в масштабах месторождения (залежи). Единая аналитическая среда «Цифровой атлас» данных различных исследований позволяет:

- визуализировать неоднородность строения и свойств образцов на различных масштабах;
- обеспечить выбор представительных образцов для проведения комплекса стандартных петрофизических и специальных исследований ядра;
- повысить информативность и статистическую достоверность геолого-геофизических данных для выбора оптимальных сценариев разработки месторождения (залежи);

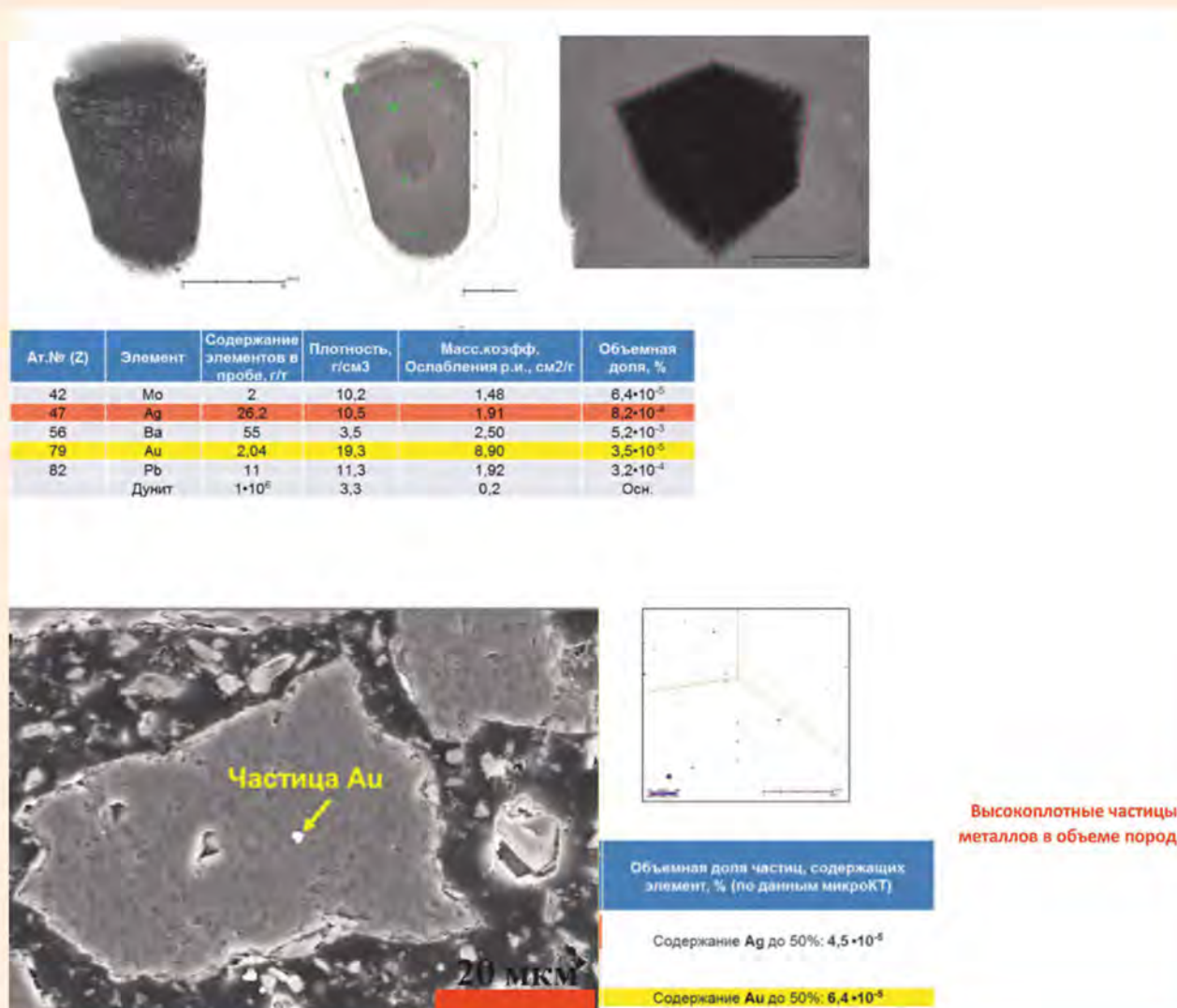


Рис. 4. Мультимасштабный подход к анализу рассеянного золота и серебра в неконсолидированных пробах по технологии «Цифровой керн»

- оптимизировать и уточнить геолого-гидродинамическую модель месторождения (залежи);
- получить исходные данные для моделирования вторичных и третичных методов нефтегазодобычи;

- в дальнейшем проводить типизацию новых объектов (залежей) на основе корреляции с данными атласа.

Цифровой атлас образцов керна позволяет визуализировать и проводить анализ на различных масштабах всевозможных свойств образцов керна, таких как:

- структура пустотного пространства;
- минеральный и элементный состав;
- структура и текстура матрицы;
- результаты моделирования фильтрационно-емкостных свойств, теплопроводности, удельного электрического сопротивления, параметра пористости.

Примеры применения технологии «Цифрового керна» в анализе вмещающих пород

Наглядным примером применения технологии цифровой керн для решения задач анализа пород-коллекторов в нефтегазовой отрасли является сопровождение и контроль эксперимента по проведению экстракции и последующему измерению петрофизических характеристик. На **рис. 3** приведен пример совмещения данных микротомографии одного и того же 30-мм образца, который подвергся последовательной отмывке от ОВ и измерению петрофизических характеристик.

Проведение анализа трехмерных изображений внутреннего строения образца, реконструированных по данным микроКТ показало, что после проведения экстракции пористость растет ввиду отмывки ОВ. Моделирование проникае-

мости по жидкости через связанное пустотное пространство образца показывает существенное снижение проницаемости.

При более детальном рассмотрении строения отдельных пор и трещин на виртуальных сечениях трехмерных моделей образца было установлено, что после отмывки от ОВ (см. зону 2 на *рис. 3* снизу) происходит перекристаллизация солей (см. зону 1 на *рис. 3* снизу) и закупорка тонких фильтрационных каналов, в том числе частичное залечивание трещин (см. виртуальные сечения на *рис. 3* в середине), участвующих в фильтрации. После проведения физических экспериментов пористость образца практически не изменяется, а проницаемость возвращается к значениям исходного неотмытого образца за вычетом органического вещества.

В обычных условиях проведение петрофизического эксперимента по анализу параметров пустотного пространства на слабосцементированной либо высокотрещиноватой породе привело бы к разрушению образца и потере всей информации о ФЕС интервала.

Примеры применения технологии «Цифрового ядра» при анализе вмещающих пород

Если в геологии нефти и газа методы «Цифрового ядра» развиваются с начала нулевых годов (Шлюмберге, Статойл), то применительно к ТПИ это принципиально новый подход, дающий возможность оценить рассеянность рудного вещества, размеры отдельных кристаллитов, ассоциированность к минералам породы.

В связи с этим необходимо при анализе проб, содержащих драгоценные металлы, опираться на стандарты, где измерение концентрации металлов проводится методами аналитической химии. Внедрение новых подходов, в том числе «цифрового ядра» требует постоянного сравнения с традиционными стандартными методами. Так в наших работах мы опирались на стандартные образцы и стандартного образца ООО НТЦ «МинСтандарт» на основе дунита с содержанием золота 2,04 г/т, серебра 26,2 г/т и другие металлы (в том числе Mo, Ba, Pb) в количестве до 100 г/т. В стандартном образце драгоценный металл рассеян по породе, при этом частицы, содержащие Au и Ag, занимают лишь десятитысячные проценты от объема образца.

Как показано в примере анализа такого порошкового стандарта методом микроКТ и РЭМ, частицы золота с характерным размером до 1–2 мкм расположены внутри 100–200 мкм зерен дунита, которые однозначно локализируются в объеме образца при помощи компьютерной томографии за счет резкого различия в массовом коэффициенте ослабления рентгеновского излучения у тяжелых металлов и окружающей матрицы. Кроме того, возможен численный анализ данных объемного распределения рассеянного металла в породе с измерением характерных размеров частиц (в данном случае нескольких тысяч), и их принадлежности к частицам матрицы определенного минерального и химического состава.

Таким образом, с помощью технологии «цифрового ядра» можно анализировать как неконсолидированную породу, так и ядерный

Рис. 5.

Пример сопоставления данных определения оксидных эквивалентов по данным трех различных методов определения состава породы с номинальным составом, измеренным в лабораторных условиях для пробы титан и цирконий-содержащего кварцевого песка

Эквивалентный Оксид	QEMSCAN	mXRF	SEM + EDS	Номинальный состав
	Концентрация, масс. %			
Al ₂ O ₃	6,97	6,8	5,2	7,01
CaO	0,17	0,5	0,2	0,36
Cr ₂ O ₃	0,02	0,1	–	–
Fe ₂ O ₃	0,36	0,4	0,5	0,26
K ₂ O	4,34	4,9	2,4	2,49
MgO	0,05	0,1	–	0,03
Na ₂ O	1,06	–	1,6	2,55
SiO ₂	84,97	86,9	87,3	86,7
TiO ₂	0,50	0,4	1,6	0,52
ZrO ₂	следы	0,1	1,2	–

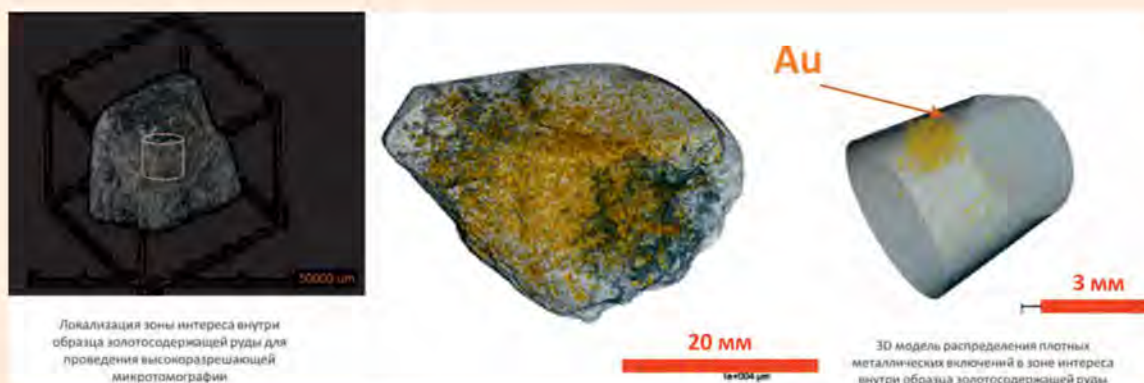


Рис. 6.
Неразрушающий анализ внутреннего строения кускового материала золотосодержащей руды. Рентгеновская микротомография

материал, получая исчерпывающую информацию о концентрации рудных и драгоценных металлов в ней.

При этом технологическая карта накопления информации о строении породы не претерпевает существенных изменений в случае плотного ядерного материала. После отбора проб из интересующих интервалов проводится микротомографирование проб для качественной и количественной оценки содержания ТПИ в интервале. С помощью неразрушающего метода рентгеновской микротомографии проводится определение наличия и количества высокоплотных включений, содержащих рудные минералы и металлы, оценивается их дисперсность и равномерность распределения внутри всего объема образца породы, а также проводится расчет ряда физических показателей на основе построенной цифровой модели, таких как, общая пористость, связанная пористость, размер зерен и др. Далее выбираются виртуальные представительные микрообразцы, отражающие макрохарактеристики породы: концентрация рудного минерала, поры, включения, зерна с характерным для данной породы размером и составом.

После микротомографирования локальных объемов пробы, благодаря накоплению и массивов статистических данных, однозначно идентифицируются минеральные ассоциации и определяется приуроченность рудных минералов, а также гранулометрические параметры (размер зерен, окатанность, распределение по размерам, минералогическая плотность, и т.д.), как отдельных минералов, групп, так и породы в целом.

На основе полученных цифровых данных с помощью программно-аппаратного комплекса «Цифровой керн» строятся разрезы и карты распространения рудных тел, их формы, строения и свойств, расчет различных показателей. Полученные материалы дополняются данными других физических и химических методов анализа.

Одновременно с этим к результатам микротомографии добавляется лог-файл автоматизированного определения минерального состава (QEMSCAN) и элементного экспресс-анализа методом энергодисперсионной рентгено-флуоресцентной спектроскопии (mXRF), которые возможно провести, как в стационарных лабораторных условиях, так и непосредственно на месте добычи или бурения.

Эти данные сопоставляются через программное обеспечение и делаются выводы о наличии и распределении рудного тела в интервале либо участке разведки/добычи.

Для более детального анализа рассеянных рудных минералов отбираются микропробы и выполняется исследование методом растровой электронной микроскопии (рис. 4) с энергодисперсионным микроанализом (SEM + EDS, как показано на примере рис. 5).

Такой подход позволяет определить микроструктурные, текстурные и минералогические особенности образцов, их анизотропию, неомогенность, трещиноватость, рудоносность и т.д.

Мультимасштабность в изучении анизотропии структуры и свойств образцов горных пород с ТПИ

При изучении твердых полезных ископаемых технология «Цифровой керн» также использует принцип мультимасштабности. Это означает, что образец может быть изучен одними и теми же методами макроскопически и микроскопически на разных характерных размерах без потери зоны интереса. Сначала проводится рентгеновская томография и автоматический анализ минерального состава на образце размером от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров, затем, на основе полученных данных в нем выбирается область интереса размерами от миллиметров до нескольких микрон и томографируется с более высоким разрешением (рис. 6).

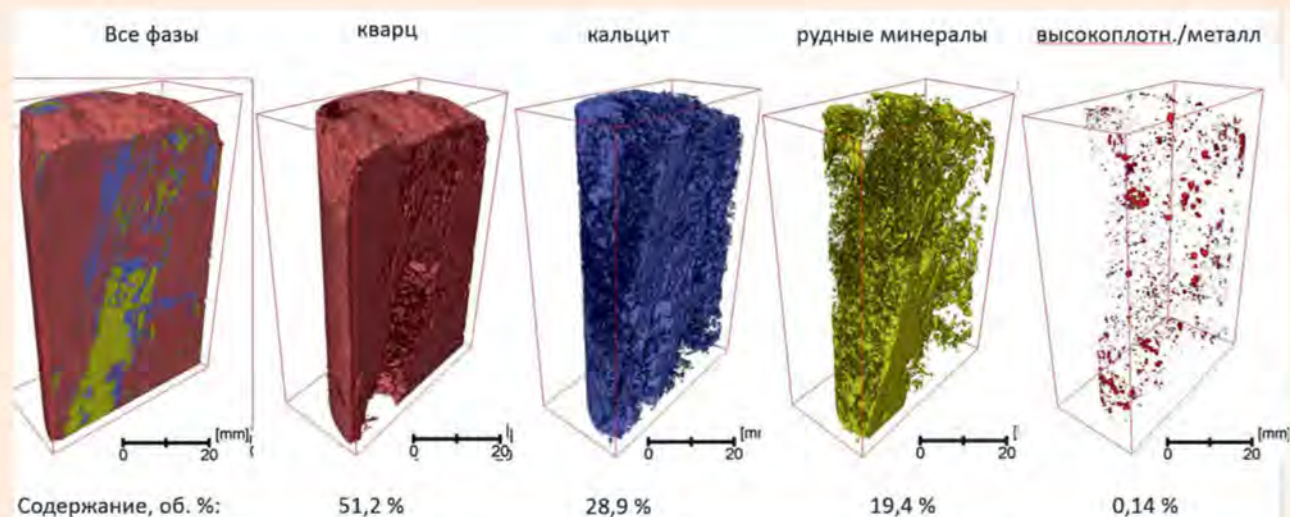


Рис. 7.

Не разрушающий анализ внутреннего строения ядерного материала золотосодержащей руды. Рентгеновская микротомография. Сегментация объемного строения образца по рентгеновской (минеральной) плотности.

Пример мультимасштабного исследования образца золотоносного кварцита

Полученные с помощью рентгеновской микротомографии высокоинформативные данные в дальнейшем численно обрабатываются с помощью компьютерного математического 3D-моделирования, которое позволяет получить целый ряд цифровых данных основанных на сегментации и разделении по уровню яркости (рентгеновской и минералогической плотности) признакам (рис. 7). Получаемые данные визуализируются в виде объемных картин и их виртуальных плоских сечений для различных расчетных параметров: объемная доля фазы, максимальный, минимальный, средний, преобладающий размеры фазы, фактор формы, общая пористость, размеры пор и т.д.

Наиболее важным параметром является объемная доля фазы, определив которую возможно вычислить количественно запасы полезного компонента (металлов, рудных минералов) на единицу объема вещества.

Например, для золотоносного образца кварца выполнена реконструкция и визуализация распределения, рассеянности металлосодержащих фаз в виртуальных сечениях и 3D-объеме образцов по данным микротомографии. Определено содержание металлосодержащих частиц во всем объеме образца (0,47 объемн. %) и в объеме локализованной области интереса (0,22 объемн. %).

Реконструированные данные рентгеновской микротомографии образцов магматических пород позволяют с определенной долей вероятности разделить основные минералы и определить их объемную долю, а также до-

стоверно точно определить наличие и количество рудных минералов и металлов. Для уточнения принадлежности минералов породы к отдельным классам, вычислению параметров их отдельных зерен и присвоения индекса хрупкости проводится минералогическое картирование с применением комплекса QEMSCAN методом автоматизированной минералогии. С помощью аппаратно-программного комплекса «Цифровой керн» производится привязка распределения рудных тел к объемному строению ядерного материала, полученному методом рентгеновской микротомографии (рис. 7, 8). Таким образом, не разрушая образцы, можно проводить объемное минералогическое исследование с разрешением до 1–2 мкм и получать данные о наличии высокоплотных металлосодержащих фаз, оценивать их дисперсность, неравномерность распределения внутри всего объема образцов. На основании построенных 3D моделей – проводить виртуальные испытания по воздействию на породу и подбирать параметры добычи полезных ископаемых.

Выводы

В статье показан подход к получению новых уточняющих данных для создания объемной «Цифровой модели месторождения» с возможностью совмещения различных данных в рамках проведения цикла мультимасштабных исследований от сантиметров до нанометров по технологии «Цифровой керн». Рассмотрены ключевые возможности по определению расположения полезных компонентов в породе, их распределения в объеме и формы нахождения. Описаны возможности определения характерных примесей в минералах и горных породах

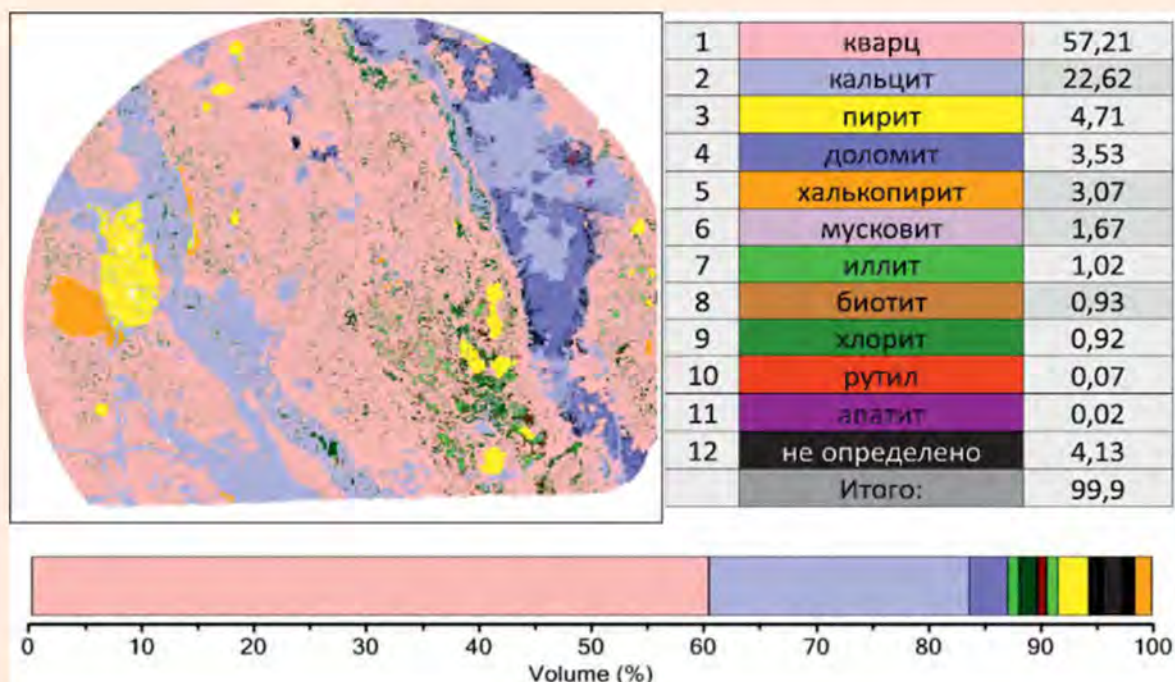


Рис. 8


Минералогическое картирование с привязкой к виртуальному сечению ядра из данных микроКТ. Автоматизированная минералогия. QEMSCAN

для извлечения полезных компонентов, в том числе из пород трудноизвлекаемых запасов, хвостов и техногенных месторождений.

Применение «Цифрового ядра» увеличивает информативность и снижает неопределенность при планировании, разведке, добыче и переработке углеводородов и руд благородных металлов, в том числе снижает потери при извлечении и обогащении, увеличивает энергоэффективность процесса повышения КИН и обогащения и приводит к повышению доходности проекта. Полученные данные могут помочь пересмотреть количество, последовательность этапов формирования коллектора, рудо- и минералообразования, провести литотипизацию, а также отработать модели воздействия при добыче и разработке месторождений.

Технология «Цифровой ядро» полностью удовлетворяет требованиям к экологичности, скорости получения, адаптированности и доступности больших данных о строении и составе породы, позволяя сокращать исследователь-

ский цикл ГРП основываясь на простроенном мультимасштабном физическом эксперименте и многопараметрическом моделировании ядерных данных для уточнения петрофизических интегрированных моделей пласта и проведения детального анализа ядерных данных. Рассмотренный в статье подход применим для повышения точности традиционного моделирования пластовых параметров в 3D и уточнения данных по подсчету потенциально извлекаемых запасов, в том числе в рамках проектов «Цифрового месторождения».

Технология «Цифровой ядро» способна повысить эффективность работ при поиске и освоении сланцевых УВ, в фундаменте любого возраста, эмульсионных скоплений УВ, способно продлить продуктивный период «старых» месторождений [26], может содействовать объективной оценке потенциала земель и комплексов пород с неясными перспективами нефтегазоносности, существенно удешевить процесс освоения месторождений шельфа. 

Литература

1. «Цифровая энергетика»: новые возможности и вызовы для ТЭК. Доступно на: http://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/4/476/ (обращение 16.10.2018).
2. Эра умной разведки. Доступно на: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/lib/1767134/> (обращение 16.10.2018).
3. D. Koroteev, O. Dinariev, N. Evseev, D. Klemin, S. Safonov, O. Gурpinar, S. Berg, C. vanKruisdiijk, M. Myers, L. Hathon, H. de Jong, R. Armstrong, Application of Digital Rock Technology for Chemical EOR Screening, SPE-165258
4. Идрисова С.А., Тугарова М.А., Стремичев Е.В., Белозеров Б.В. Цифровой ядро. Комплексирование данных петрографических исследований карбонатных пород с результатами изучения ядра. Доступно на: <http://www.ntc.gazprom-neft.ru/research-and-development/proneft/2237/35949/> (обращение 16.10.2018).

5. Внедрение и использование цифровых технологий в энергетике исходя из принципов экономической целесообразности и повышения доступности энергетической инфраструктуры и распределенной энергетики. Доступно на: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/03/26/10877/9._Vnedrenie_i_ispolzovanie_cifrovyyh_tehnologiy_v_energetike_DGEP.pdf (обращение 16.10.2018).
6. Integration of X-Ray Micro-Computed Tomography and Focused-Ion-Beam Scanning Electron Microscopy Data for Pore-Scale Characterization of Bazhenov Formation, Western Siberia. Доступно на: https://www.researchgate.net/publication/285793674_Integration_of_X-Ray_Micro-Computed_Tomography_and_Focused-Ion-Beam_Scanning_Electron_Microscopy_Data_for_Pore-Scale_Characterization_of_Bazhenov_Formation_Western_Siberia (обращение 16.10.2018).
7. Shklover, V. Y., Artemov, N. A., Rashkovskiy, A. I., Dmitrieva, T. G., & Zagvozdin, V. P. (2016, October 24). Complex Research of Bazhenov Formation Samples Using Digital Rock Approach (Russian). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/182062-RU. Доступно на: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-182062-RU> (обращение 16.10.2018).
8. Stefano Martinotti, Jim Nolten, Jens Arne Steinsbø, Digitizing oil and gas production. Доступно на: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/digitizing-oil-and-gas-production> (обращение 16.10.2018)
9. Иванов А.И., Месторождение «Ожерелье» – новый тип коренных месторождений золота в Бодайбинском рудном районе. Доступно на: <https://cyberleninka.ru/article/n/mestorozhdenie-ozherelie-novyy-tip-korennykh-mestorozhdeniy-zolota-v-bodaybinskom-rudnom-rayone> (обращение 16.10.2018).
10. Per Henrik Valvatne, Predictive pore-scale modelling of multiphase flow, a dissertation for the degree of doctor of philosophy //imperial college london. 2004. Доступно на: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/11280.PDF> (обращение 16.10.2018).
11. Lock, P.A., X.D. Jing, R.W. Zimmerman, and E.M. Schlueter, Predicting the permeability of sandstone from image analysis of pore structure, Journal of Applied Physics, 92, 6311-6319, 2002. Доступно на: https://www.researchgate.net/publication/252420064_Relationship_between_Permeability_Elastic_Moduli_and_Pore_Structure_in_Porous_Geological_Media (обращение 16.10.2018).
12. Society of Core Analysts. Доступно на: <https://www.scaweb.org/> (обращение 16.10.2018).
13. Воробьев К.А., Воробьев А.Е., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн. Доступно на: <https://esj.today/78nzn318.html> (обращение 16.10.2018).
14. Schlumberger Launches Advanced Digital Integration of Rock and Fluid Analysis Services. Доступно на: https://www.slb.com/news/press_releases/2017/2017_1109_reservoir_laboratory_pr.aspx (обращение 16.10.2018).
15. Koroteev, D.A., Dinariev, O., Evseev, N., Klemm, D.V., Safonov, S., Gurpinar, O.M., Armstrong, R. (2013, July 2). Application of Digital Rock Technology for Chemical EOR Screening. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/165258-MS.
16. Neil Francis Hurley, Weishu Zhao, Tuanfeng Zhang Multiscale digital rock modeling for reservoir simulation. Patent USA. Schlumberger Technology Corp. Доступно на: <https://patents.google.com/patent/US20120221306> (обращение 16.10.2018).
17. Мунгалов Д. Цифровой керн: от образа к модели. Доступно на: <http://sk.ru/news/b/news/archive/2016/03/14/cifrovoy-kern-ot-obraza-k-modeli.aspx> (обращение 16.10.2018).
18. A. Kazak, and S. Chugunov, "Characterization of Berezhov Formation Rock Samples by Digital Core Analysis", Digital Rocks Portal, 2018. [Online]. Доступно на: <https://www.digitalrockportal.org/projects/126> (обращение 16.10.2018).
19. Мунгалов Д. Проект «цифровой керн»: разглядеть большое, наблюдая за малым. Доступно на: <http://sk.ru/news/b/articles/archive/2015/12/04/proekt-cifrovoy-kern-kak-uidet-bolshoe-nablyudaya-za-malym.aspx> (обращение 16.10.2018).
20. Карпов В.А. Об особом типе природного резервуара УВ в баженовской свите Западной Сибири //Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 8. С. 28–34.
21. Карпов В.А. Фундамент – региональный нефтегазоносный комплекс //Отечественная геология. 2012. № 6. С. 90–94.
22. Карпов В.А. О тектонозависимом нетрадиционном типе скоплений углеводородов //Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2016. № 7. С. 4–9.
23. Карпов В.А. К вопросу о дальнейшей роли Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции //Недропользование XXI век. 2018. № 4. С. 210–218.
24. Карпов В.А. Перспективы выявления новых залежей нефти в пределах и вблизи старых месторождений //Нефтяное хозяйство. 2012. № 3. С. 20–23.

UDC 004:553

V.Ya. Shklover, Director of OOO "Systems for Microscopy and Analysis"¹
N.A. Artemov, Leading Geologist of OOO "Systems for Microscopy and Analysis"¹
I.G. Maryasev, Geological Research Team Leader of OOO "Systems for Microscopy and Analysis"¹
T.G. Dmitrieva, PhD, Head of 3D Microscopy Sector of OOO "Systems for Microscopy and Analysis"¹
A.Yu. Rashkovskiy, PhD, Leading Expert of OOO "Systems for Microscopy and Analysis"¹, rashkovskiy@microscop.ru
V.A. Karpov, PhD, Expert State Commission on Mineral Reserves, Member of the Editorial Board of "Subsoil use XXI Century" magazine², valkarp@yandex.ru.

¹Office 20, 45 Skolkovskoe shosse, Moscow, 121353, Russia.

²Office 509, 7 Bolshoy Strocvenovskiy side street, Moscow, 115054, Russia.

Technology Analysis and Digital Rock Modeling as Part of the Infrastructure of the "Digital Field". From Geological Exploration to Industrial Exploitation

Abstract. The article discusses aspects of the application and place of the digital rock technology in solving problems of the modern exploration cycle, the extraction of hydrocarbons and solid minerals. The components of the hardware–methodical complex and software are considered, key results are given that can be used for making informed decisions in the development of methods for enhanced oil recovery and improved recoverability from rocks with diffuse chemical agents and solid minerals.

Keywords: digital rock; solid minerals; Hard-to-recover reserves; digital field; routing.

References

1. «*Tsifrovaia energetika*»: *novye vozmozhnosti i vyzovy dlia TEK* [Digital Energy: New Opportunities and Challenges for the Fuel and Energy Complex]. Available at: http://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/4/476/ (accessed 16 October 2018).
2. *Era umnoi razvedki* [The era of clever intelligence]. Available at: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/lib/1767134/> (accessed 16 October 2018).
3. D. Koroteev, O. Dinariev, N. Evseev, D. Klemin, S. Safonov, O. Gurpinar, S. Berg, C. vanKruisjdijk, M. Myers, L. Hathon, H. de Jong, R. Armstrong, Application of Digital Rock Technology for Chemical EOR Screening, SPE-165258
4. Idrisova S.A., Tugarova M.A., Stremichev E.V., Belozherov B.V. *Tsifrovoy kern. Kompleksirovanie dannykh petrograficheskikh issledovaniy karbonatnykh porod s rezul'tatami izucheniia kerna* [Digital core. Integration of petrographic studies of carbonate rocks with the results of core studies]. Available at: <http://www.ntc.gazprom-neft.ru/research-and-development/proneft/2237/35949/> (accessed 16 October 2018).
5. *Vnedrenie i ispol'zovanie tsifrovyykh tekhnologii v energetike iskhodno iz printsipov ekonomicheskoi tselesoobraznosti i povysheniia dostupnosti energeticheskoi infrastruktury i raspredelennoi energetiki* [The introduction and use of digital technologies in the energy sector based on the principles of economic feasibility and increasing the availability of energy infrastructure and distributed energy]. Available at: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/03/26/10877/9_Vnedrenie_i_ispolzovanie_cifrovyykh_tekhnologii_v_energetike_DGEP.pdf (accessed 16 October 2018).
6. Integration of X-Ray Micro-Computed Tomography and Focused-Ion-Beam Scanning Electron Microscopy Data for Pore-Scale Characterization of Bazhenov Formation, Western Siberia. Available at: https://www.researchgate.net/publication/285793674_Integration_of_X-Ray_Micro-Computed_Tomography_and_Focused-Ion-Beam_Scanning_Electron_Microscopy_Data_for_Pore-Scale_Characterization_of_Bazhenov_Formation_Western_Siberia (accessed 16 October 2018).
7. Shklover, V. Y., Artemov, N. A., Rashkovskiy, A. I., Dmitrieva, T. G., & Zagvozdin, V. P. (2016, October 24). Complex Research of Bazhenov Formation Samples Using Digital Rock Approach (Russian). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/182062-RU. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-182062-RU> (accessed 16 October 2018).
8. Stefano Martinotti, Jim Nolten, Jens Arne Steinsbø, Digitizing oil and gas production. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/digitizing-oil-and-gas-production> (accessed 16 October 2018)
9. Ivanov A.I., *Mestorozhdenie «Ozherel'e» – novyi tip korennykh mestorozhdenii zolota v Bodaibinskom rudnom raione* [Deposit “Necklace” - a new type of primary gold deposits in the Bodaibo ore region]. Available at: <https://kyberleninka.ru/article/n/mestorozhdenie-ozherelie-novyiy-tip-korennykh-mestorozhdeniy-zolota-v-bodaybinskom-rudnom-rayone> (accessed 16 October 2018).
10. Per Henrik Valvatne, Predictive pore-scale modelling of multiphase flow, a dissertation for the degree of doctor of philosophy //imperial college london. 2004. Available at: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/11280.PDF> (accessed 16 October 2018).
11. Lock, P.A., X.D. Jing, R.W. Zimmerman, and E.M. Schlueter, Predicting the permeability of sandstone from image analysis of pore structure, Journal of Applied Physics, 92, 6311–6319, 2002. Available at: https://www.researchgate.net/publication/252420064_Relationship_between_Permeability_Elastic_Moduli_and_Pore_Structure_in_Porous_Geological_Media (accessed 16 October 2018).
12. Society of Core Analysts. Available at: <https://www.scaweb.org/> (accessed 16 October 2018).
13. Vorob'ev K.A., Vorob'ev A.E., Tchero Kh. *Tsifrovizatsiia nefteianoi promyshlennosti: tekhnologiya «tsifrovoy kern»* [Digitalization of the oil industry: the technology of “digital” core]. Available at: <https://esj.today/78nzvn318.html> (accessed 16 October 2018).
14. Schlumberger Launches Advanced Digital Integration of Rock and Fluid Analysis Services. Available at: https://www.slb.com/news/press_releases/2017/2017_1109_reservoir_laboratory_pr.aspx (accessed 16 October 2018).
15. Koroteev, D.A., Dinariev, O., Evseev, N., Klemin, D.V., Safonov, S., Gurpinar, O.M., Armstrong, R. (2013, July 2). Application of Digital Rock Technology for Chemical EOR Screening. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/165258-MS.
16. Neil Francis Hurley, Weishu Zhao, Tuanfeng Zhang Multiscale digital rock modeling for reservoir simulation. Patent USA. Schlumberger Technology Corp. Available at: <https://patents.google.com/patent/US20120221306> (accessed 16 October 2018).
17. Mungalov D. *Tsifrovoy kern: ot obraza k modeli* [Digital core: from image to model]. Available at: <http://sk.ru/news/b/news/archive/2016/03/14/cifrovoy-kern-ot-obraza-k-modeli.aspx> (accessed 16 October 2018).
18. A. Kazak, and S. Chugunov, “Characterization of Berezov Formation Rock Samples by Digital Core Analysis”, Digital Rocks Portal, 2018. Available at: <https://www.digitalrockportal.org/projects/126> (accessed 16 October 2018).
19. Mungalov D. *Proekt «tsifrovoy kern»: razgliadet' bol'shoe, nabliudaia za malym* [Digital Kern Project: See Big, Watching the Small]. Available at: <http://sk.ru/news/b/articles/archive/2015/12/04/proekt-cifrovoy-kern-kak-uidet-bolshe-nablyudaya-za-malym.aspx> (accessed 16 October 2018).
20. Karpov V.A. *Ob osobom tipe prirodnogo rezervuara UV v bazhenovskoi svite Zapadnoi Sibiri* [On a special type of natural hydrocarbon reservoir in the Bazhenov Formation of Western Siberia]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefteianyykh i gazovykh mestorozhdenii* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields], 2013, no. 8, pp. 28–34.
21. Karpov V.A. *Fundament – regional'nyi neftegazonosnyi kompleks* [Foundation - a regional oil and gas complex]. *Otechestvennaia geologiya* [Domestic geology], 2012, no. 6, pp. 90–94.
22. Karpov V.A. *O tektonozavisimom netraditsionnom tipe skoplenii uglevodorodov* [On tectonic-dependent unconventional type of hydrocarbon accumulations]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefteianyykh i gazovykh mestorozhdenii* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields], 2016, no. 7, pp. 4–9.
23. Karpov V.A. *K voprosu o dal'neishei roli Zapadno-Sibirskoi neftegazonosnoi provintsii* [On the question of the future role of the West Siberian oil and gas province]. *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use of the XXI century], 2018, no. 4, pp. 210–218.
24. Karpov V.A. *Perspektivy vyivleniia novykh zalezhei nefi v predelakh i vblizi starykh mestorozhdenii* [Prospects for identifying new oil deposits in and near old fields]. *Nefteanoe khoziaistvo* [Oil industry], 2012, no. 3, pp. 20–23.