

УДК 550.8.023; 519.223.4

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ШЛИФОВ НА ПРИМЕРЕ УСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ

Попов Никита Андреевич¹,
Nikita.Popov@pnn.lukoil.com

Путилов Иван Сергеевич¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Гуляева Анастасия Андреевна¹,
Anastasija.Guljaeva@pnn.lukoil.com

Винокурова Екатерина Евгеньевна¹,
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

¹ Управление комплексных исследований ядра Центра исследования ядра и пластовых флюидов
Филиал ООО «ЛУКОЙ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614066, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

Статья посвящена разработке методических приемов к применению технологий машинного обучения для решения задач по углубленному анализу геолого-физических параметров на основе результатов лабораторных исследований шлифов ядра. Для достижения поставленной цели был разработан специализированный табличный формат описания шлифов ядра карбо-натных отложений. На основе разработанного формата сформирована база данных для последующего анализа и применения технологий глубокого и поверхностного обучения. В качестве объекта исследования выбрана пермокарбоновая залежь Усинского месторождения, расположенного в Республики Коми.

Технология глубокого обучения была применена с целью получения математической модели прогноза ряда геологических параметров по фотографиям шлифов. В качестве основного примера был рассмотрен прогноз восьми классов по Данему, выделяемых по шлифам.

Разработанный формат позволяет все текстовые описания геологических характеристик шлифа представить в табличном виде с дискретной кодировкой. Табличное представление даёт ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет выполнять математико-статистический анализ описания шлифов; во-вторых, можно формировать базу для анализа, используя результаты работы разных авторов, включая фотографии шлифов; в-третьих, даёт возможность сопоставлять и анализировать параметры, полученные по шлифам с другими результатами исследований кернов. На примере пермокарбоновой залежи Усинского месторождения по разработанному формату была сформирована уникальная база по данным более 1000 шлифов из 6 скважин. Дополнительно к описаниям шлифов в базу данных была загружена информация по результатам лабораторных исследований различных геолого-физических параметров, полученная на образцах ядра из тех же интервалов, что и шлифы. На основании сформированной базы данных было получено соотношение газопроницаемости и пористости с категоризацией точек по классификации Данема на пермокарбоновой залежи Усинского месторождения. Сформированная база данных описаний шлифов связана с фотографиями шлифов, что, в свою очередь, позволяет применять современные технологии компьютерного зрения, основанные на глубоком обучении, для анализа и прогноза параметров шлифов.

В результате проведенных экспериментов была получена модель, которая позволяет по фотографии шлифа выделять геологические параметры. На сегодняшний день работы по пополнению базы и совершенствованию модели продолжаются, но полученная модель уже используется как инструмент, ускоряющий процесс анализа шлифов.

Ключевые слова:

Технология машинного обучения, лабораторные исследования ядра, описание шлифов, математико-статистический анализ, классификация по Данему.

Введение

Сегодня мы наблюдаем новый виток революционного развития информационных технологий. За последние пять лет удалось решить целый ряд задач, которые казались неразрешимыми последние десятилетия. Технологический прорыв цифровых технологий открыл новые возможности в разных отраслях. Лидерами по разработке и внедрению прорывных технологий являются интернет корпорации. Основными факторами, обусловившими технологический прорыв, стали развитие вычислительных мощностей и накопление значительного объема информации [1]. Это сочетание позволило более эффективно применить технологии, разработанные еще в середине два-

дцатого века, такие как нейронные сети и др. На сегодняшний день в нефтяной промышленности используется вычислительная техника последнего поколения, а также накоплены большие объемы информации. Таким образом, имеются все предпосылки для внедрения прорывных информационных разработок в широком спектре задач нефтяной отрасли.

В данной работе мы рассмотрим примеры использования технологии машинного обучения для изучения шлифов. Цель исследования – разработка методических приемов к применению технологии машинного обучения, включая глубокое обучение, к задачам углубленного анализа геолого-физических параметров на основе результатов лабораторных исследова-

ний шлифов кернов. Достоверность оценки фильтрационно-емкостных свойств разрабатываемых пластов-коллекторов в значительной степени зависит от обеспеченности петрофизической информацией [2–4].

Для достижения поставленной цели решаются задачи разработки специализированного табличного формата описания шлифов керна карбонатных отложений. Формируется база данных на основе разработанного формата для последующего анализа и применения технологий глубокого и поверхностного обучения.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования выбрана пермско-карбонная залежь Усинского месторождения, расположенного в Республике Коми. Залежь является уникальной по размерам и свойствам нефти ($\mu=723,2$ мПа*с). Этаж нефтеносности более 300 м, количество геологических запасов категории АВ1 составляет 747 млн т, извлекаемых 247 млн т. На месторождении пробурено более 2000 скважин, в 30 скважинах отобрано более 2000 м керна, из которого изготовлено и в дальнейшем исследовано в лабораториях около 9000 стандартных и более 1000 полноразмерных образцов. В результате литолого-петрографических и петрофизических исследований установлено, что породы изученного разреза обладают неоднородными, но в основном достаточно хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС), что в свою очередь связано с литолого-генетическими закономерностями распределения пор, каверн и трещин, а также с их морфологическими особенностями. Изучение емкостного пространства пород данного разреза позволило выявить его структуру, строение и с помощью результатов петрофизических анализов определить типы коллекторов. Емкостное пространство известняков различных литотипов неоднородно. Развиваются пустоты неравномерно. Поры и каверны развиваются в основном по цементу, реже – во внутрискелетных полостях органических остатков. Поры и каверны размером до 3,00 мм (по описанию шлифов) открытые, сообщающиеся. Форма пустот самая разнообразная: удлинённая и изометричная, с «изорванными» краями, щелевидная, лапчатая, рукавообразная. Отдельные пустоты частично или полностью залечены кальцитом. Некоторые поры и каверны имеют форму органических остатков (слепковая пористость). Межзерновые и внутрiformенные поры нередко развиваются вблизи стилолитовых швов, а также в разделительных пленках стилолитов и по ходу минеральных и открытых трещин. Пустоты образованы преимущественно в результате процессов выщелачивания, в подчиненном количестве встречаются субкапиллярные седиментационные поры и поры диагенетической и катагенетической перекристаллизации, развивающиеся на участках перекристаллизации и вблизи стилолитов.

Стилолиты развиваются во всех породах, но их плотность в разрезе неодинакова. Стилолиты и их фрагменты зубчатого, бугорчато-зубчатого, зубчато-бугорчатого, бугорчато-столбчатого типов выполне-

ны глинистым веществом, пигментированным. В разделительных пленках отмечается примесь терригенного кварца псаммоалевритовой размерности и выделения аутигенного пирита. Отмечаются участки линзовидной формы с извилистыми очертаниями, выполненные глинистым веществом, которые, вероятно, являются «раздувами» разделительных пленок стилолитов. Стилолиты переплетаются между собой, группируются в серии, образуя ослабленные зоны. Стилолиты растворяют близлежащие органические остатки (членики криноидей и раковинки фораминифер). Участками стилолиты выщелочены. Максимальная амплитуда стилолитов по шлифам в изученном разрезе достигает 14 мм, ширина разделительных пленок составляет не более 0,75 мм.

От стилолитов в разные стороны отходят разнообразные открытые и минеральные трещины. Некоторые трещины выполнены оранжевым, коричневым и желтым битуминозным органическим веществом. Трещины короткие, реже протяженные извилистой и слабоизвилистой конфигурации, конусовидные, прямолинейные и разветвленные, секущие органические компоненты пород. Ширина открытых трещин колеблется от 0,005 до 0,600 мм. Минеральные трещины выполнены яснокристаллическим мелкозернистым и мелко-среднезернистым кальцитом. Ширина их не превышает 0,12 мм.

Битуминозно-органическое вещество (БОВ) коричневого, желтого и красно-коричневого цвета пигментирует глинистые слои и разделительные пленки стилолитов, выполняет мелкие субкапиллярные поры, сорбируется остатками водорослей и мшанок, окрашивает породы неравномерно (пятнами). БОВ отмечается в виде примазок по стенкам трещин и пор, участками выполняет тонкие трещины, пигментирует кремнистый материал в зонах окремнения, иногда подчеркивает контуры ромбоздров диагенетического доломита, выполняющего роль цемента.

Как правило, породы изученного разреза в разной степени нефтенасыщены (равномерно, реже пятнисто) либо пигментированы БОВ. И даже в весьма плотных разностях наблюдается точечное и пятнистое нефтенасыщение, что позволяет рассматривать изученную толщу как единый резервуар. БОВ коричневого, светло-коричневого и оранжево-коричневого цвета неравномерно пигментирует форменные элементы, заполняет пустоты и отмечается в виде тонких пленок, примазок и капель на стенках пор и трещин, отмечается в виде выпотов по трещинам и пустотам.

Коллекторские характеристики рассматриваемой толщи, как видно из вышесказанного, весьма неоднородны: наряду с высокопористыми и кавернозными породами в разрезе имеются низкопористые и трещиноватые разности, причем, это относится к породам разного литологического состава. Встречаются интервалы, где отложения характеризуются низкой матричной пористостью, в то время как проницаемость достигает высоких значений. Это позволяет предположить присутствие в разрезе пластов-коллекторов порово-трещинного типа.

При бурении скважины неоднократно отмечается неполный вынос керна, что может свидетельствовать о наличии кавернозных прослоев, расположенных в разрезе на разных уровнях и на участках с различными структурами.

В целом отложения изученного разреза могут быть отнесены к разноёмкому коллектору сложного типа, где в разрезе определяются кавернозно-поровые, трещинно-поровые, порово-трещинные и трещинно-порово-кавернозные типы коллекторов.

Дополнительно изготовлено около 3000 шлифов и проведено их описание. Изготовление самих шлифов является сложным процессом, требующим наличия высокоточного оборудования и высокой, практически ювелирной, квалификации персонала. Не менее специфичным является на сегодняшний день анализ шлифов керна. Специалисты по анализу шлифов, как правило, специализируются на описании шлифов определенных отложений. Это обусловлено различным набором информативных признаков, отражающих их генезис и вторичные преобразования. Само описание шлифов чаще всего представлено в виде последовательного текстового изложения, надо отметить, что описания различных авторов могут отличаться по стилю и терминологии, что усложняет дальнейшее их использование. Отметим, что часто описание шлифов происходит на разных языках и это также усложняет использование таких описаний в дальнейшей работе. Очевидно, что выполнять оперативно какую-либо аналитику по сотням, а иногда и тысячам различных описаний проблематично и занимает много времени, и чаще всего принимает форму отдельной научно исследовательской работы. При описании шлифа используются микроскопы, которые позволяют детально исследовать всю поверхность шлифа, составляющую примерно 2 кв. см. Наиболее представительная часть фотографируется и приобщается к текстовому отчету. Фотография фрагмента шлифа при увеличении в 25 раз в среднем составляет 5–7 % от всей площади шлифа. В некоторых работах проводят полное сканирование шлифа. Естественно, что фотографии не могут заменить по информативности работу с микроскопом, однако для специалистов, работающих только с описанием и не имеющих возможности изучать сам шлиф, эти фотографии являются важнейшей частью отчета, не менее ценной, чем само описание. Для преодоления описанных выше осложняющих факторов дальнейшего использования полученной при описании шлифа информации, а также для систематизации представления описания шлифов карбонатных отложений в Филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИ-ПИНЕФТЬ» группой экспертов по описанию шлифов был разработан специализированный формат таблицы с кодировкой наиболее востребованных параметров, определяемых в шлифах. Основными параметрами, включаемыми в таблицу, являются: название породы, наличие органического вещества, БОВ, форменные элементы, текстура, структура по Данему, преобладающие аутигенные компоненты, влияющие на ФЕС, измеренная пористость по шлифу, преобла-

дающий тип пористости, трещиноватость и наличие стилолитов. Разработанный формат позволяет все текстовые описания петрографических характеристик породы представить в табличном виде с дискретной кодировкой. Табличное представление даёт ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет выполнять математико-статистический анализ описания шлифов. Во-вторых, можно формировать базу данных для анализа, используя результаты работы разных авторов, включая фотографии шлифов, и, в-третьих, дает возможность сопоставлять и анализировать параметры, полученные по шлифам, с другими результатами исследований кернов. На примере пермокарбонатной залежи Усинского месторождения по разработанному формату была сформирована уникальная база на основании данных более 1000 описанным шлифов из 6 скважин. На месторождении по Данему выделяются восемь типов структур: мадстоун, вакстоун, пакстоун, грейнстоун, баундстоун, флаутстоун, рудстоун и кристаллический карбонат (доломит). Примеры фотографий и краткое описание типов структур приведены в табл. 2.

Дополнительно к описаниям шлифов в базу данных была загружена информация результатов лабораторных исследований различных геолого-физических параметров, полученная на стандартных и полноразмерных образцах керна из тех же интервалов, что и шлифы. Лабораторные исследования керна являются единственным прямым способом получения такой информации [5–10]. Породы-коллекторы Усинского месторождения трещинно-каверно-порового типа. В связи с этим исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств проводились как на стандартных, так и на полноразмерных образцах керна, которые учитывают масштабный фактор и включают в себя микротрещины, каверны большого размера и матрицу породы, соизмеримые с размерами образцов [11–17]. Коэффициент открытой пористости на стандартных образцах керна был определен методом жидкостенасыщения (метод Преображенского) и гидростатического взвешивания с учетом внешних каверн согласно ГОСТ 26450.1-85 [18], коэффициент открытой пористости полноразмерных образцов – методом (МР-ИСМ-03-ОЛФИ-046-2013) [19]. Частота отбора образцов керна для комплексных лабораторных исследований определяется литологическим составом, изменчивостью физических свойств и характером насыщения изучаемых пород. Согласно методическим рекомендациям [20], при изучении неоднородных пород-коллекторов, обладающих сложной структурой пустотного пространства, количество образцов должно быть не менее 5 на метр.

В табл. 3 приведено сопоставление типов структуры по Данему с геолого-физическими параметрами. Анализ средних значений дисперсий и интервалов параметров показывает, что однозначно разделить на типы структур по геолого-геофизическим параметрам нельзя. Для изучаемой выборки образцов был дополнительно проведен анализ t-статистики [21–28].

Используя сформированную базу данных, построено соотношение газопроницаемости и открытой по-

ристости с категоризацией точек по классификации Данема на пермокарбоневой залежи Усинского месторождения (рис. 1). На графиках видно, что диапазоны изменения проницаемости рудстоунов, мадстоунов и флаустоунов ограничены и частично перекрываются, а диапазоны значений проницаемости пакстоунов и баундстоунов значительно шире других типов по Данему. Максимальные значения проницаемости, превышающие $1000 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$, характерны только для баундстоунов и частично кристаллических карбонатов (доломитов). Соотношение на рис. 1 наглядно демонстрирует, что структура порового пространства и ФЕС контролируется минералами и условиями их формирования на пермокарбоневой залежи Усинского месторождения. По результатам литолого-петрографических исследований пород установлено, что породы Усинского месторождения скважин 9ОЦ, 3501 и 3506 представлены в большей степени баундстоунами, а скважины 5ОЦ – грейнстоунами (табл. 1). Нужно отметить, что, к примеру, кристаллический карбонат (доломит) имеет поровую структуру пустотного пространства (рис. 3), а баунд-

стоуны характеризуются более сложной структурой пустотного пространства каверно-порового и порово-кавернового типа (рис. 2).

Таблица 1. Литологическая характеристика скважин Усинского месторождения

Table 1. Lithologic description of wells of the Usinsk field

Скважина Well	Литологическая характеристика скважины Lithological characteristics of a well					
	Мадстоун Mudstone	Пакстоун Packstone	Грейнстоун Grainstone	Баундстоун Boundstone	Флаустоун Floatstone	Кристаллический карбонат (доломит) Crystalline carbonate
	%					
5ОЦ	1	23	71	4	0	0
9ОЦ	0	34	2	51	6	8
3501	1	14	17	52	7	9
3506	0	6	2	62	2	27

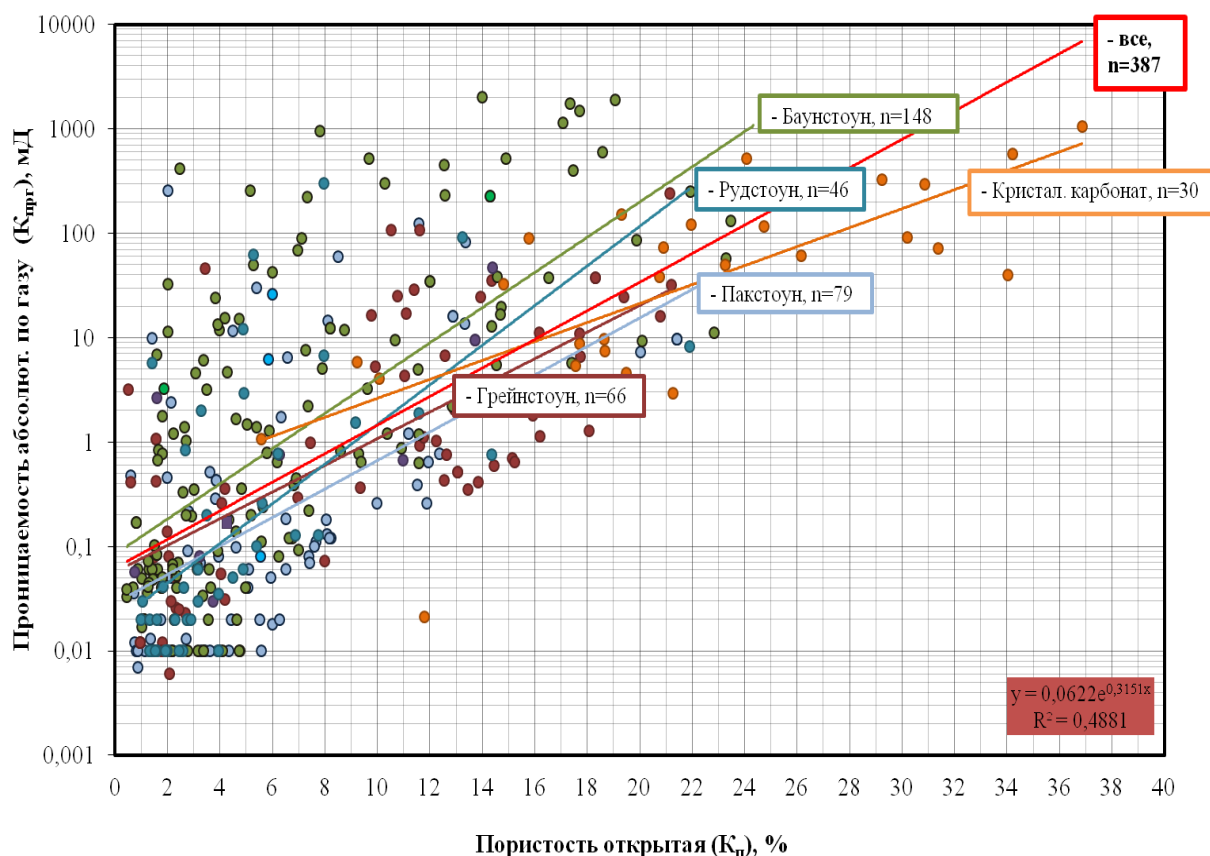


Рис. 1. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости с категоризацией точек по классификации Данема

Fig. 1. Ratio of gas permeability and open porosity with the categorization of points according to the classification of Danhem

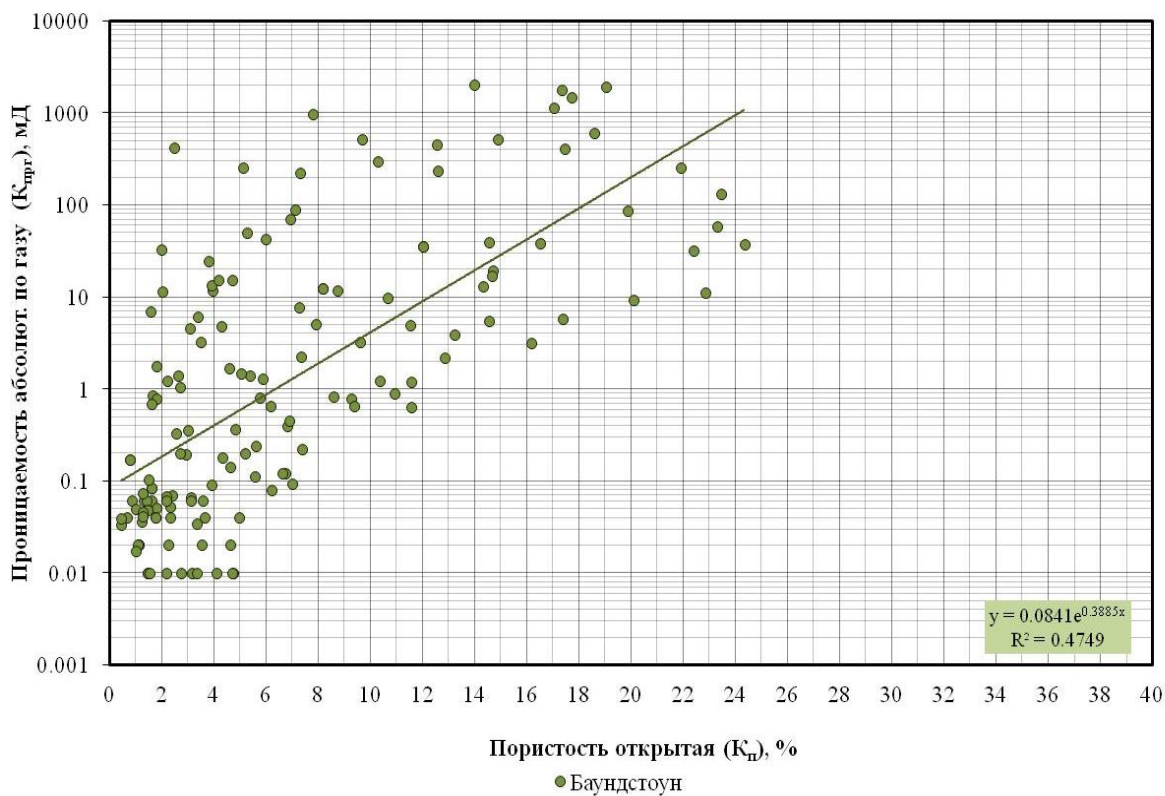


Рис. 2. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости для баундстоунов
Fig. 2. Ratio of gas permeability and open porosity for boundstone

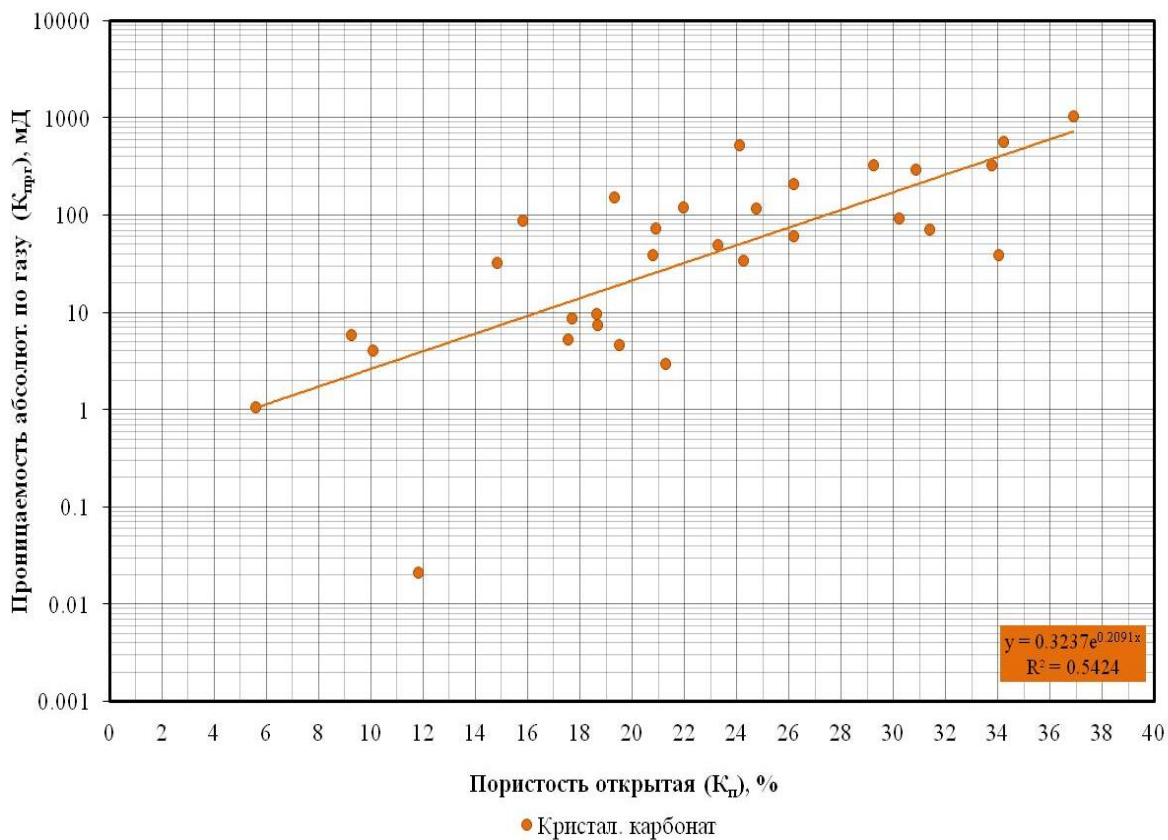

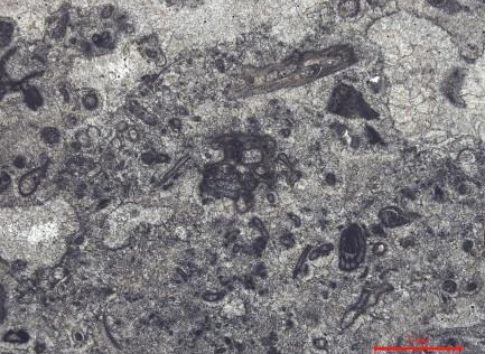


Рис. 3. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости для кристаллического карбоната (доломита)
Fig. 3. Ratio of gas permeability and open porosity for crystalline carbonate

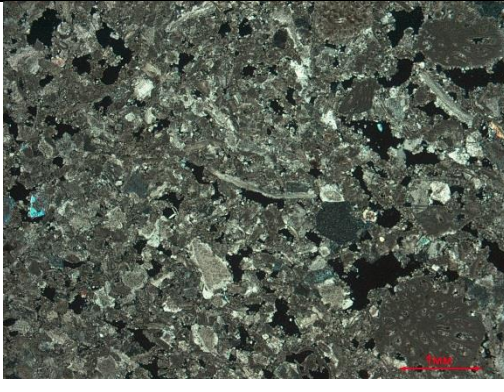
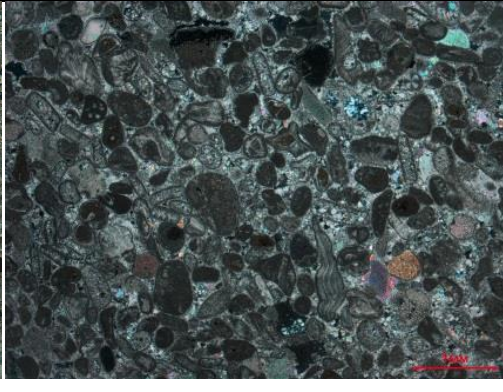
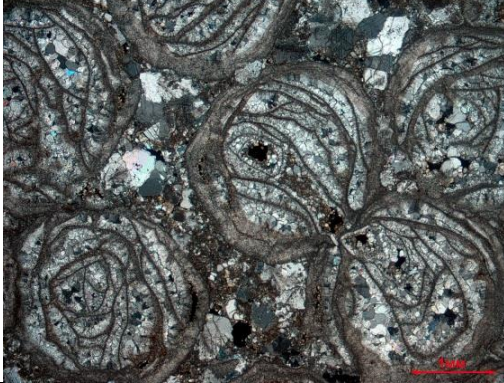
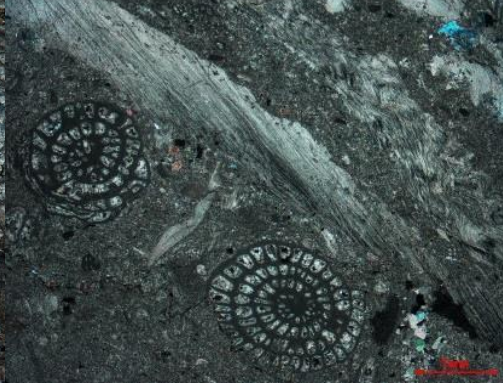
Таблица 2. Общая характеристика пород по классификации Данема с фотографиями шлифов Усинского месторождения, лучше всего характеризующими данный литотип

Table 2. General characteristics of rocks according to the classification of Danhem with the photos of thin sections of the Uinsk field most characteristic for this lithotype

<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p>Мадстоун/Mudstone Микро-тонкозернистый известняк с незначительным содержанием форменных элементов размером <2 мм. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Micro-fine-grained limestone with insignificant content of shaped elements <2 mm in size. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p>Вакстоун/Wackestone Микро-тонкозернистый известняк с достаточно обильным (до 40–50 %) форменными элементами размером <2 мм. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Micro-fine-grained limestone with sufficiently abundant (up to 40–50 %) shaped elements <2 mm in size. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк биокластовый с микритовым матриком, кремненый. Известняк сложен преимущественно пелитоморфным кальцитом. В подчиненном количестве редкие биокласты иглокожих и брахиопод (10 %). Большая часть детрита кремнена. Bioclast limestone with micrite matrix, silicified. Limestone is composed mainly of pelitomorphic calcite. In a subordinate amount, rare bioclasts of echinoderms and brachiopods (10 %). Most of the detritus is silicified.</p>	<p>Известняк мшанковый с инкрустационной текстурой. Порода образована фрагментами мшанок ячеистого строения размером до 2,10 мм. Каждый фрагмент мшанки подчеркнут инкрустационной корочкой различной по ширине, которая выполняет роль крустификационного цемента. В значительно подчиненном количестве встречаются обломки раковин остракод, многокамерные раковинки фораминифер и трудноопределимый детрит размером до 0,10 мм. Биокласты значительно перекристаллизованы. Limestone mossy with inlaid texture. The rock is formed by fragments of mosses of cellular structure up to 2,10 mm in size. Every piece of bryozoans fresco is underlined by incrustation crust of different width, which performs the role of crustifications cement. In a much smaller number there are fragments of ostracod shells, multi-chamber shells foraminifera and hard-to-determine detritus up to 0,10 mm in size. Bioclasts are significantly recrystallized.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа) Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p>Пакстоун/Packstone Известняк, состоящий из форменных элементов размером <2 мм, с тонко-микрозернистым цементом порового и базального типов, зерна опираются друг на друга. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Limestone, consisting of shaped elements <2 mm in size, with fine-grained cement of pore and basal types, the grains resting on each other. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p>Грейнстоун/Grainstone Порода не содержит ила и состоит из опирающихся друг на друга зерен размером <2 мм, имеет яснокристаллический цемент порового и базального типов. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. The rock does not contain silt and consists of <2 mm grains resting on each other, has clear-crystalline cement of pore and basal types. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк фораминиферо-биокластовый с микритовым цементом. Порода сложена биокластами (в среднем 0,6–0,9 мм) в преобладающем количестве криноиды, остракоды, брахиоподы, пелециподы, ступки и комки синезеленых водорослей, желваки багряных водорослей, гастроподы, мшанки и мелкий раковинный детрит и шлам. В подчиненном количестве крупными одно- и многокамерными фораминиферами и фузулинидами. Цемент микритовый, преимущественно пелитоморфный и регенерационный кальцит. Limestone foraminifera-bioclast with micrite cement. The rock is composed of bioclasts (on average 0,6–0,9 mm) in a predominant number of crinoids, ostracods, brachiopods, pelecipods, clots and lumps of blue-green algae, purple algae nodules, gastropods, mosses and small shell detritus and sludge. In subordinate numbers by large single- and multi-chamber foraminifera and fusulinids. The cement is micrite, predominantly pelitomorphic and regenerative calcite.</p>	<p>Известняк биокластово-фораминиферный со спаритовым цементом, перекристаллизованный. Порода сложена одно- и многокамерными фораминиферами (до 1,1 мм), часто микритизированными до бесструктурных комков. Биокласты: мшанки, криноиды, брахиоподы, пелециподы, остракоды, трубки перекристаллизованных зеленых водорослей и мелкий раковинный детрит. Цемент – спаритовый кальцит. Bioclast-foraminiferous limestone with sparite cement, recrystallized. The rock is composed of single- and multi-chamber foraminifera (up to 1,1 mm), often micritized to structureless lumps. Bioclasts: mosses, crinoids, brachiopods, pelecipods, ostracods, tubes of recrystallized green algae and small shell detritus. Cement-spar calcite.</p>

Продолжение табл. 2

Table 2

<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа) Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p>Баундстоун/Boundstone Автохтонный известняк, первичные компоненты были скреплены во время отложения. Autochthonous limestone, the primary components were bonded during deposition.</p>	<p>Флаутстоун/Floatstone Известняк, состоящий из форменных элементов размером >2 мм, с микро-тонкозернистым цементом порового и базального типов. Опорой служит основная масса. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Limestone consisting of shaped elements >2 mm in size, with micro-fine-grained cement of pore and basal types. Support is the bulk. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк биогермный коралловый. Порода представлена фрагментом кустистой колонии кораллов. Стенки кораллитов тонкие. Внутренние полости кораллитов выполнены вторичным кальцитом. Масса, заполняющая пространство между кораллитами, представлена вторичным спаритовым кальцитом. Встречаются мелкие комки и сгустки сине-зеленых водорослей. Заполнитель – спаритовый кальцит. Limestone bioherm coral. The rock is represented by a fragment of a bushy coral colony. The walls of corallites are thin. The internal cavities of corallites are made of secondary calcite. The mass filling the space between the corallites is represented by secondary sparitic calcite. There are small lumps and clumps of blue-green algae. The filler is sparite calcite.</p>	<p>Известняк фораминиферо-биокластовый с микритовым цементом. Порода сложена крупными одно- и многокамерными фораминиферами и фузулинидами. В преобладающем количестве биокласты – крупные створки брахиопод и остракод, пелециподы, криноиды, мшанки, кальциферы и мелкий раковинный детрит и шлам. Цемент микритовый, преимущественно пелитоморфный. Limestone foraminifera-bioclust with micrite cement. The breed is composed of large single- and multi-chamber foraminifera and fusulinids. In the vast number of bioclust – large sash of brachiopods and ostracods, pelecypoda, crinoidea, bryozoans, and small celticfury of shell detritus and sludge. The cement is micrite, mainly pelitomorphic.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа) Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p>Рудстоун/Rudstone Известняк, состоящий из форменных элементов размером >2 мм, с яснокристаллическим цементом порового типа. Опорой служат зерна. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Limestone consisting of shaped elements >2 mm in size, with clear-crystalline pore-type cement. Grains serve as a support. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p>Кристаллический карбонат (доломит) Crystalline carbonate Перекристаллизованный известняк (вторичный доломит), в котором не распознается первичная структура. Recrystallized limestone (secondary dolomite) in which the primary structure is not recognized.</p>

Окончание табл. 2

Table 2

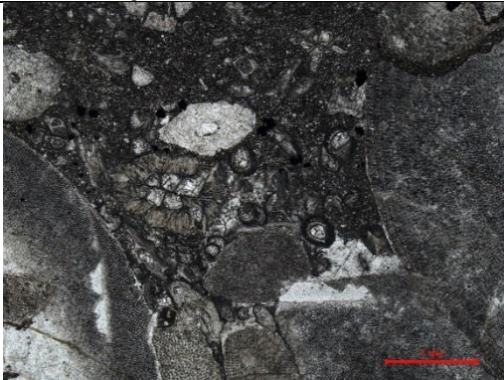

<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк мшанково-эхиноидный трещиноватый. Породообразующими являются многочисленные членики криноидей, размером до 7,0×5,0 мм. Также встречаются иглы морских ежей, размером до 3,9 мм. Часто наблюдаются фрагменты мшанок, размером до 2,74 мм, ячеистого строения, ветвистого морфологического типа. Отмечаются единичные обломки створок остракод и брахиопод. Цемент базального и порового типов, сложного состава: преобладает кальцит микро-тонкозернистой размерности с примесью терригенного вещества. Также отмечается регенерационный цемент (5 %), связанный с члениками криноидей. Limestone mankovo-echinoidea fractured. Numerous segments of crinoids, up to 7,0×5, 0 mm in size, are rock-forming. There are also needles of sea urchins, up to 3,9 mm in size. Often there are fragments of mosses, up to 2,74 mm in size, cellular structure, branched morphological type. There are single fragments of the valves of ostracods and brachiopods. Cement of basal and pore types, complex composition: calcite of micro-fine-grained dimension with admixture of terrigenous substance prevails. Regeneration cement (5 %) associated with crinoid segments is also noted.</p>	<p>Вторичный доломит микрозернистый, известняковый. Порода сложена вторичным микрозернистым доломитом. Биокласты, выполненные пелитоморфным кальцитом, иглокожие и мелкий неопределимый раковинный детрит и шлам. Grained secondary dolomite and limestone. The rock is composed of secondary micrograin dolomite. Bioclasts made of pelitomorphic calcite, echinoderms and small indeterminate shell detritus and sludge.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа) Photo (the most characteristic image of this type)</p>		

Таблица 3. Соотношение классификации пород по Данему и полученных в лабораторных условиях геолого-физических параметров пород

Table 3. Ratio of rock to the classification of Danhem and geological and physical parameters of rocks obtained in the laboratory

Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem	Геолого-физические параметры/Geological and physical parameters						
	Количество определений Number of definitions, %	Проницаемость Permeability, 10 ⁻³ мкм ² (mcm ²)	Пористость Porosity, %	Плотность мин., г/см ³ Mineralogical density, g/cm ³	Содержание кальцита Calcite content, %	Содержание доломита Dolomite content, %	Нераств. ост. Insoluble residue, %
Мадстоун Mudstone	6	152,42±129,17 3,27–227,00	10,14±7,18 1,85–14,28	2,68±0,01 2,68–2,69	35,90±28,20 19,60–68,50	3,00±5,25 0,00–9,10	61,00±33,46 22,40–80,40
Вакстоун Wackestone	14	8,08±12,30 0,01–26,01	5,35±0,93 3,99–6,00	2,70±0,02 2,67–2,72	93,10±10,60 77,40–100,00	0,70±1,45 0,00–2,90	6,20±10,95 0,00–22,60
Пакстоун Packstone	225	9,13±33,47 0,01–257,20	6,62±5,84 0,59–27,02	2,70±0,02 2,64–2,83	86,50±22,16 0,00–100,00	5,20±16,52 0,00–98,00	8,30±15,90 0,00–74,80
Грейнстоун Grainstone	190	13,16±35,41 0,01–242,60	9,33±6,32 0,51–22,45	2,70±0,01 2,66–2,74	95,60±7,10 52,70–100,00	0,10±0,61 0,00–6,80	4,40±7,05 0,00–47,30
Баундстоун Boundstone	427	97,85±325,33 0,01–2016,00	6,90±5,98 0,37–25,58	2,70±0,02 2,64–2,84	93,50±11,36 0,00–100,00	1,10±7,68 0,00–100,00	5,40±8,07 0,00–70,20
Флаутстоун Floatstone	43	6,41±13,95 0,01–46,97	7,65±6,64 0,73–21,91	2,72±0,05 2,68–2,88	88,20±22,81 0,00–100,00	7,30±21,04 0,00–86,80	4,50±3,80 0,00–13,20
Рудстоун Rudstone	197	10,87±46,56 0,01–300,50	4,50±4,00 0,98–21,89	2,69±0,02 2,62–2,78	94,10±8,63 52,90–100,00	3,00±7,69 0,00–47,10	2,90±3,57 0,00–22,20
Кристаллический Карбонат (доломит) Crystalline carbonate	148	106,71±200,27 0,01–1055,00	19,51±9,73 0,94–37,02	2,80±0,04 2,69–2,84	18,40±32,87 0,00–99,00	74,70±32,02 0,00–98,60	7,00±6,98 0,00–33,60

Технология глубокого обучения при описании шлифов

Одной из новых технологий, быстро развивающихся в последние годы, является технология глубокого обучения. Глубокое обучение – это раздел машинного обучения, который за последние пять лет очень эффективно проявил себя в задачах компьютерного зрения, заняв прочные лидирующие позиции. Преимущество данного подхода сводится к использованию многослойных сетей сложной архитектуры для расширения пространства признаков, а затем его редукции под поставленную задачу. Применение глубокого обучения не ограничивается задачами машинного зрения, а распространяется на целый ряд других задач, таких как распознавание речи, перевод текстов, управление беспилотными автомобилями и другими.

Таблица 4. Архитектура глубокой нейронной сети для классификации фотографий шлифов

Table 4. Architecture of a deep neural network for classification of photos of cuts

Номер Number	Слой Layer	Размерность данных Data dimensionality
1	Входная свертка Input Convolution	3, 256, 256
2	Свертка Convolution	16, 256, 256
3	Снижения размерности MaxPooling	16, 256, 256
4	Свертка Convolution	16, 128, 128
5	Свертка Convolution	32, 128, 128
6	Свертка Convolution	32, 128, 128
7	Снижения размерности MaxPooling	32, 128, 128
8	Свертка Convolution	32, 64, 64
9	Свертка Convolution	64, 64, 64
10	Свертка Convolution	64, 64, 64
11	Снижения размерности MaxPooling	64, 64, 64
12	Свертка Convolution	64, 32, 32
13	Свертка Convolution	128, 32, 32
14	Свертка Convolution	128, 32, 32
15	Снижения размерности MaxPooling	128, 32, 32
16	Свертка Convolution	128, 16, 16
17	Свертка Convolution	256, 16, 16
18	Свертка Convolution	256, 16, 16
19	Снижения размерности MaxPooling	256, 16, 16
20	Смена формы тензора Flatten	256, 8, 8
21	Полносвязный слой Dense	16384
22	Полносвязный слой Dense	2048
23	Классификация Softmax	8

Применимо глубокое обучение и для того, чтобы получить математическую модель прогноза ряда геологических параметров по фотографиям шлифов. В качестве основного примера рассмотрим прогноз восьми классов по Данему, выделяемых по шлифам. Учитывая ограниченный объем выборки исследованных шлифов, всего 1700 шлифов, был применен подход на основе уже обученной нейронной сети, разработанной специально для распознавания графических образов. Рассмотрев и оценив ряд ранее обученных нейронных сетей, находящихся в открытом доступе, была выбрана сеть, дающая наиболее информативные тензоры для последующего анализа. В качестве предварительного обучения сети была выбрана многослойная нейронная сеть Paintest, победившая в соревновании Kaggle по распознаванию художественных стилей по фотографиям картин [29]. Обучение Paintest происходило на 79433 фотографиях картин, количество классов составляло 1584, количество слов 24. Обученная нейронная сеть используется для получения набора информативных тензоров, на основе которых выполнялся прогноз заданных классов согласно табл. 2, 3. В сети Paintest был заменен последний классифицирующий слой и выполнено дополнительное обучение на выборке из 1700 фотографий шлифов, количество классов составляло 8 (табл. 4). Обучение глубокой нейронной сети проводилось на языке Python с применением библиотек Keras и TensorFlow. Подбор гиперпараметров последних трех модифицированных слоев глубокой нейронной сети выполнялся с использованием автоматизированного инструмента Keras-Tuner из библиотеки Keras.

Для предотвращения переобучения выборка была разделена на три части: обучающую 70 %, контрольную 15 % и тестовую 15 %. При обучении использовалась технология перекрестной проверки. Полученная модель дала 94,5 % правильности и 80 % точности классификации на тестовой выборке. Правильность классификации по классам составляет: мадстоун 99 %, вакстоун 99 %, пакстоун 80 %, грейнстоун 91 %, баундстоун 79 %, флаутстоун 97 %, рудстоун 87 % и кристаллический карбонат 94 %. Разработанная глубокая нейронная сеть позволяет определять петрографические параметры шлифов с достаточно высокой для практического применения правильностью классификации. Сразу стоит отметить, что высокие проценты классификации для мадстоун, вакстоун и флаутстоун отчасти обусловлены скорее небольшими выборками шлифов и в дальнейшем планируется уточнить модель за счет расширения количества образцов именно по этим классам. По остальным пяти обучаемым классам, где количество шлифов превышает 100, результаты могут быть применены для прогноза с установленной правильностью. Полученные математические модели на основе глубокого обучения были использованы для прогноза классов по Данему при изучении 2000 шлифов, для которых отсутствовала классификация. Это позволило впервые на несколько порядков сократить время получения такого параметра, как класс по Данему,

для дальнейшего его использования в фациальном моделировании. Скорость классификации 2000 фотографий шлифов при использовании двухъядерного центрального процессора Intel Core i5 с чистотой 1,3 ГГц составляет 10 секунд, что позволяет обученную глубокую нейронную сеть широко применять как цифровую экспресс-технологию анализа и получения новой геологической информации для исторически накопленных и вновь получаемых фотографий шлифов.

Заключение

Разработан цифровой формат для описания шлифов в карбонатных отложениях, который позволил сформировать базу данных описаний шлифов для пермокарбонатной залежи Усинского месторождения. Сформированная база данных использована в качестве информационной основы для получения математической модели, которая на основе фотографии шлифа определяет его класс по Данему и другие параметры. Применяя машинное обучение, авторы разработали новую технологию описания фотографий шлифов. С использованием новой технологии полу-

чена дополнительная информация по 2000 шлифам, позволяющая уточнить концептуальную модель седиментации пермокарбонатной залежи Усинского месторождения для последующего построения более достоверных трёхмерных фациальных моделей, промышленного подсчёта запасов и проектирования разработок месторождений.

На сегодняшний день работы по пополнению базы данных и совершенствованию модели продолжаются, но полученная модель уже позволяет решать практические задачи и используется как инструмент для экспресс-анализа, ускоряющий на несколько порядков процесс описания шлифов. Разработанный авторами подход к описанию шлифов с применением технологии глубокого обучения пермокарбонатной залежи Усинского месторождения может быть использован для аналогичных залежей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и мира.

Сама технология использования машинного зрения для описания шлифов может быть тиражирована на любые другие геологические объекты, где имеется достаточный набор описанных шлифов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Школле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
2. Гурбатова И.П., Мелехин С.В., Юрьев А.В. Особенности изучения петрофизических и упругих свойств керна в сложнопостроенных коллекторах нефти и газа при моделировании термобарических пластовых условий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 5. – С. 67–72.
3. Костин Н.Г., Губайдуллин М.Г. Влияние размеров исследуемых образцов керна на величину коэффициента пористости карбонатных и терригенных коллекторов // Геологические опасности: материалы XV Всероссийской конференции с международным участием – Архангельск, 2009. – С. 248–250.
4. Петерсилье В.И., Рабиц Э.Г., Белов Ю.Я. Методы и аппаратура для изучения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на образцах большого размера. – М.: Недра, 1980. – 53 с.
5. Алексин Г.А., Клещев А.А., Россихин Ю.А. Перспективы поисков нефти и газа на севере Тимано-Печорской провинции. – М.: ВНИИОЭНГ, 1982. – 44 с.
6. Ruth D., Arabjamaloei R. Reconsidering Klinkenberg's permeability data // *Petrophysics*. – 2019. – V. 60. – Iss. 03. Web of conferences. URL: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPWLA-2019-v60n3a5> (дата обращения 12.12.2019).
7. Validation of permeability and relative permeability data using mercury injection capillary pressure data / R. Arabjamaloei, D. Daniels, E. Ebeltoft, E. Petersen, R.J. Pitman, D. Ruth // *E3S Web Conf.* 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01001/e3sconf_sca2018_01001.html (дата обращения 12.12.2019).
8. Insights, trends and challenges associated with measuring coal relative permeability / D. Shaw, P. Mostaghimi, F. Hussain, R.T. Armstrong // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01004/e3sconf_sca2018_01004.html (дата обращения 12.12.2019).
9. Pruno S., Rodvelt H.E., Skjæveland O. Measurement of spontaneous imbibition capillary pressure, saturation and resistivity index by counter current technique at net reservoir stress and elevated temperature // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02002/e3sconf_sca2018_02002.html (дата обращения 12.12.2019).
10. A fast method for trapped gas determination / P. Faurissoux, M. Lutui-Tefuka, C. Caubit, B. Lalanne, B. Nicot // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02004/e3sconf_sca2018_02004.html (дата обращения 12.12.2019).
11. Гурбатова И.П., Михайлов Н.Н. Изучение анизотропии сложнопостроенных карбонатных коллекторов лабораторными методами // Актуальная проблема развития нефтегазового комплекса России: сб. тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. – М., 2010. – Ч. 1. – С. 94–95.
12. Гурбатова И.П., Кузьмин В.А., Михайлов Н.Н. Влияние структуры порового пространства на масштабный эффект при изучении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов // *Геология нефти и газа.* – 2011. – № 2. – С. 74–82.
13. Особенности изучения карбонатных пород-коллекторов лабораторными методами; Фил. ООО «ЛУКОЙЛ-инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Пермь / И.П. Гурбатова, Д.В. Глушков, П.Н. Рехачев, С.В. Мелехин, Н.А. Попов. – Пермь: Астер Диджитал, 2017. – 264 с.
14. Михайлов Н.Н., Гурбатова И.П. Масштабный эффект при лабораторном определении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов // *Технологии нефти и газа.* – 2011. – № 4 (75). – С. 32–35.
15. Эпоха полноразмерного керна при лабораторных исследованиях технологий повышения нефтеотдачи пластов / И.С. Путилов, П.Н. Рехачев, И.П. Гурбатова, Н.Н. Барковский, О.И. Якимов, О.А. Морозюк // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело.* – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 155–164. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.6
16. Суходанова С.С. Создание 3D-модели залежи с карбонатными трещиноватыми коллекторами на основе комплексирования гидродинамических, геофизических, сейсмических и промысловых данных (на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 157 с.
17. Worthington P.F. Advances in core evaluation. Accuracy and precision in reserves estimation // *Reviewed Proceedings of the First Society of Core Analysts European Core Analysis Symposium.* – London, 1990. – 567 p.

18. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 7 с.
19. МР-ИСМ-03-ОЛФИ-046-2013. Горные породы. Определение коэффициента открытой пористости газовольнометрическим методом. – Пермь: Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, 2013. – 22 с.
20. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов объемными методами / под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Порокуна, Г.Г. Яценко. – М.; Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «ТверьГеофизика», 2003. – 130 с.
21. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. – М.: Недра, 1966. – 206 с.
22. Мирзанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 228 с.
23. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. – М.: Мир, 1986. – 189 с.
24. Шарапов И.П. Применение математической статистики в геологии. – М.: Недра, 1965. – 260 с.
25. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. – New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley & Sons, 1977. – 606 p.
26. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
27. Watson G.S. Statistic on spheres. – New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. – 238 p.
28. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. AAPG. – Tulsa, Oklahoma: John Wiley & Sons, 1994. – 231 p.
29. Painter by Numbers (Kaggle). URL: <https://inejc.github.io/kaggle/2016/11/17/painter-by-numbers-competition-on-kaggle/> (дата обращения 12.12.2019).

Поступила 03.06.2020 г.

Информация об авторах

Попов Н.А., начальник Управления комплексных исследований керна Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Путилов И.С., доктор технических наук, заместитель директора по научной работе в области геологии Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Гуляева А.А., инженер 2 категории Отдела подсчета запасов северной группы месторождений Волго-Уральского региона Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Винокурова Е.Е., главный специалист Отдела литологии и стратиграфии Управления комплексных исследований керна Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 550.8.023; 519.223.4

APPLICATION OF DEEP LEARNING TECHNOLOGIES FOR STUDYING THIN SECTIONS ON THE EXAMPLE OF USINSK OIL FIELD

Nikita A. Popov¹,
Nikita.Popov@pnn.lukoil.com

Ivan S. Putilov¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Anastasiya A. Gulyaeva¹,
Anastasija.Guljaeva@pnn.lukoil.com

Ekaterina V. Vinokurova¹,
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

¹ Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm,
29, Sovetskaya Armiya avenue, Perm, 614006, Russia.

The article is devoted to development of methodological techniques for application of machine learning technologies, including deep learning, to the problems of in-depth analysis of geological and physical parameters based on the results of laboratory studies of core sections. To achieve this goal, we solve the problem of developing a specialized tabular format for describing the core sections of carbonate deposits, formation of a database on the basis of the developed format for further analysis and application of deep and surface training technologies. The permocarbon deposit of Usinsk field located in the Komi Republic was chosen as the object of research. Deep learning technology was applied to obtain a mathematical model for predicting a number of geological parameters from the photos of sections. As the main example, the forecast of eight classes of Danhem, allocated by sections, was considered.

The developed format allows presenting all text descriptions of the geological characteristics of the section in a tabular form with a discrete encoding. The table view provides a number of advantages. First, it allows you to perform mathematical and statistical analysis of the description of sections. Second, it is possible to form a database for analysis, using the results of the work of different authors, including photographs of thin sections, thirdly, provides an opportunity to compare and analyze the parameters obtained for the sections with other results of studies of the cores. On the example of permocarbon deposit of Usinsk field, a unique database of 500 sections from 6 wells was formed according to the developed format. In addition to the descriptions of the sections, the database was loaded with information on the results of laboratory studies of various geological and physical parameters obtained on standard core samples from the same intervals as the sections. Using the formed database, the ratio of mineralogical density and permeability with the categorization of points according to the Danhem classification on the permocarbon deposit of the Usinsk field is constructed. The generated database of sections descriptions is related as well to photographs of sections, that, in its turn, allows the use of modern computer vision technologies based on deep learning to analyze and predict the parameters of sections.

As a result of the experiments, a model was obtained, which allows distinguishing geological parameters from the photo of the plume. To date, work on updating the database and improving the model continues, but the model is already used as a tool to accelerate the process of sections analysis.

Key words:

Technology of machine learning, laboratory investigations of core, description of thin sections, mathematical-statistical analysis, the classification of Danhem.

REFERENCES

- Shkolle F. *Glubokoe obuchenie na Python* [Deep learning in Python]. St-Petersburg, Piter Publ., 2018. 400 p.
- Gurbatova I.P., Melekhin S.V., Yurev A.V. Features of the study of petrophysical and elastic properties of the core in complex reservoirs of oil and gas in the modeling of thermobaric reservoir conditions. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 5, pp. 67–72. In Rus.
- Kostin N.G., Gubaydullin M.G. Vliyanie razmerov issleduemykh obraztsov kerna na velichinu koeffitsienta poristosti karbonatnykh i terrigennykh kollektorov [Influence of the sizes of the studied core samples on the porosity coefficient of carbonate and terrigenous reservoirs]. *Geologicheskoe opasnosti. Materialy XV Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Geological hazards. Proc. of the XV all-Russian conference with international participation]. Arkhangelsk, 2009. pp. 248–250.
- Petersile V.I., Rabc E.G., Belov Yu.Ya. *Metody i apparatura dlya izucheniya filtratsionno-enkostnykh svoystv porod-kollektorov na obrazcah bolshogo razmera* [Methods and equipment for studying filtration-capacitance properties of reservoir rocks on large samples]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 53 p.
- Aleksin G.A., Kleshchev A.A., Rossihin Yu.A. *Perspektivy poiskov nefii i gaza na severe Timano-Pechorskoy provintsii* [Prospects for oil and gas exploration in the North of the Timan-Pechora province]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1982. 44 p.
- Ruth D., Arajmaloei R. Reconsidering Klinkenberg's permeability data. *Petrophysics*, 2019, vol. 60, Iss. 03. Web of conferences. Available at: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPWLA-2019-v60n3a5> (accessed 12 December 2020).
- Arabjamaloei R., Daniels D., Ebeltoft E., Petersen E., Pitman R.J., Ruth D. Validation of permeability and relative permeability data using mercury injection capillary pressure data. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018)*. Web of conferences. Available at: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01001/e3sconf_sca2018_01001.html (accessed 12 December 2020).
- Shaw D., Mostaghimi P., Hussain F., Armstrong R.T. Insights, trends and challenges associated with measuring coal relative permeability. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018)*. Web of conferences. Available at: <https://www.e3sconferences.org/>

- articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01004/e3sconf_sca2018_01004.html (accessed 12 December 2020).
9. Pruno S., Rodvelt H.E., Skjæveland O. Measurement of spontaneous imbibition capillary pressure, saturation and resistivity index by counter current technique at net reservoir stress and elevated temperature. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts* (SCA 2018). Web of conferences. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02002/e3sconf_sca2018_02002.html (accessed 12 December 2020).
 10. Faurissoux P., Lutui-Tefuka M., Caubit C., Lalanne B., Nicot B. A fast method for trapped gas determination. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts* (SCA 2018). Web of conferences. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02004/e3sconf_sca2018_02004.html (accessed 12 December 2020).
 11. Gurbatova I.P., Mikhaylov N.N. Izuchenie anizotropii slozhnopostronnykh karbonatnykh kollektorov laboratornymi metodami [The study of the anisotropy of structurally complex carbonate reservoirs in the laboratory]. *Aktualnaya problema razvitiya neftegazovogo kompleksa Rossii. Sbornik tezisev dokladov VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problem of development of oil and gas complex of Russia. Collection of abstracts of VIII all-Russian scientific and technical conference]. Moscow, 2010. P. 1, pp. 94–95.
 12. Gurbatova I.P., Kuzmin V.A., Mihaylov N.N. Influence of the pore space structure on the scale effect in the study of filtration-capacitance properties of complex carbonate reservoirs. *Geology of oil and gas*, 2011, no. 2, pp. 74–82. In Rus.
 13. Gurbatova I.P., Gushkov D.V., Rekhachev P.N., Melekhin S.V., Popov N.A. *Osobennosti izucheniya karbonatnykh porod-kollektorov laboratornymi metodami; Fil. OOO «LUKOIL-Inzhiniring» «PermNIPneft» v g. Permi* [Features of the study of carbonate reservoir rocks by laboratory methods; Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm]. Perm, Aster Didzhital Publ., 2017. 264 p.
 14. Mikhaylov N.N., Gurbatova I.P. Large-scale effect in laboratory determination of filtration-capacitance properties of complex carbonate reservoirs. *Oil and gas technologies*, 2011, no. 4 (75), pp. 32–35. In Rus.
 15. Putilov I.S., Rekhachev P.N., Gurbatova I.P., Barkovskiy N.N., Yakimov O.I., Morozuk O.A. The era of full-size core in laboratory studies of enhanced oil recovery technologies. *PNRPU Bulletin. Geology. Oil and gas mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 155–164. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.6 In Rus.
 16. Suhodanova S.S. *Sozdanie 3D-modeli zalezhi s karbonatnymi treshchinovatyimi kollektorami na osnove kompleksirovaniya gidrodinamicheskikh, geofizicheskikh, seysmicheskikh i promyslovykh dannyykh (na primere nizhnepermiskikh otlozheniy Varandeyevskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Creation of a 3D model of a deposit with carbonate fractured reservoirs based on the integration of hydrodynamic, geophysical, seismic and field data (on the example of the lower Permian deposits of the Varandey Deposit)]. Cand. Diss]. Moscow, 2016. 157 p.
 17. Worthington P.F. Advances in core evaluation. Accuracy and precision in reserves estimation. *Reviewed Proceedings of the First Society of Core Analysts European Core Analysis Symposium*. London, 1990. 567 p.
 18. *GOST 26450.1-85. Porody gornye. Metod opredeleniya koeffitsienta otkrytoy poristosti zhidkostenasyshcheniem* [State Standard 26450.1-85. Rocks mountain. Method for determination of open porosity coefficient by liquid saturation]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1985. 7 p.
 19. *MR-ISM-03-OLFI-046-2013. Gornye porody. Opredelenie koeffitsienta otkrytoy poristosti gazovolyumetricheskim metodom* [MR-ISM-03-OLFI-046-2013. Rock. Determination of open porosity coefficient by gas-volumetric method]. Perm, Filial OOO «LUKOIL-Inzhiniring» «PermNIPneft» v g. Permi, 2013. 22 p.
 20. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov obemnymi metodami* [Guidelines for calculation of geological reserves by volumetric methods]. Eds. V.I. Petersile, V.I. Poroskun, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, VNIGNI, NPTS «TverGeofizika» Publ., 2003. 130 p.
 21. Dementev L.F. *Statisticheskie metody obrabotki i analiza promyslovo-geologicheskikh dannyykh* [Statistical methods of processing and analysis of geological data]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 206 p.
 22. Mirzadzhanzade A.Kh., Stepanova G.S. *Matematicheskaya teoriya eksperimenta v dobyche nefii i gaza* [Mathematical theory of experiment in oil and gas production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 228 p.
 23. Chini R.F. *Statisticheskie metody v geologii* [Statistical methods in geology]. Moscow, Mir Publ., 1986. 189 p.
 24. Sharapov I.P. *Primenenie matematicheskoy statistiki v geologii* [Application of mathematical statistics in Geology]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 260 p.
 25. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 606 p.
 26. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
 27. Watson G.S. *Statistic on spheres*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1983. 238 p.
 28. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics*. Tulsa, Oklahoma, John Wiley & Sons, 1994. 231 p.
 29. *Painter by Numbers (Kaggle)*. Available at: <https://inejc.github.io/kaggle/2016/11/17/painter-by-numbers-competition-on-kaggle/> (accessed 12 December 2020).

Received: 3 June 2020.

Information about the authors

Nikita A. Popov, head of the department of complex core studies, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

Ivan S. Putilov, Dr. Sc., deputy director for scientific work in the field of geology Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

Anastasiya A. Gulyaeva, engineer of the 2nd category, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

Ekaterina V. Vinokurova, chief specialist, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.