

## ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЦЕНТРАЛЬНЫХ И ЮГО-ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО КОМПЛЕКСУ ДАННЫХ ГИС

Е.Ю. Темникова<sup>1</sup>, А.А. Федосеев<sup>1</sup>, В.А. Казаненков<sup>1</sup>, С.И. Грубась<sup>1</sup>,  
В.Н. Глинских<sup>1</sup>, Д.С. Лежнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,  
630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия

Представлены результаты развития и использования численных методов интерпретации данных геофизических исследований скважин в интервале баженовской свиты (верхняя юра) на примере скважин, расположенных в центральных и юго-восточных районах Западной Сибири. На основе метода машинного обучения — искусственных нейронных сетей (с учетом результатов детальных литолого-геохимических исследований керна) разработан и апробирован вычислительный алгоритм для определения вещественного состава пород баженовской свиты. В выполненных исследованиях использовалась классификация литотипов пород, основанная на современном представлении распределения породообразующих минеральных и минералоидных компонентов. В изученных разрезах скважин определен литологический состав баженовской свиты и выявлены особенности его изменения по латерали в центральной части Салымского месторождения, в районе Сургутского свода и в юго-восточных районах Западной Сибири.

*Верхняя юра, баженовская свита, породообразующие компоненты, литологические типы пород, геофизические исследования скважин, искусственные нейронные сети, Западная Сибирь*

## LITHOLOGIC CHARACTERISTICS OF THE BAZHENOV FORMATION SECTIONS IN THE CENTRAL AND SOUTHEASTERN REGIONS OF WEST SIBERIA ACCORDING TO THE LOGGING DATA SET

E.Yu. Temnikova, A.A. Fedoseev, V.A. Kazanenkov, S.I. Grubas', V.N. Glinskikh, D.S. Lezhnin

The paper presents the results of the development and use of numerical methods for interpreting logging data in the Bazhenov Formation interval (Upper Jurassic). We consider wells located in the central and southeastern regions of West Siberia. Based on the machine learning method (artificial neural networks) and with the results of detailed lithological and geochemical core studies taken into account, a computational algorithm has been developed and tested to evaluate the material composition of the Bazhenov Formation rocks. In the studies we use the classification of the Bazhenov Formation lithotypes, which is based on the modern concept of the distribution of rock-forming mineral and mineraloid components. In the examined well sections, the lithologic composition of the Bazhenov Formation rocks has been determined, along with its lateral change in the central part of the Salym field, in the Surgut arch region, and in the southeast of West Siberia.

*Upper Jurassic, Bazhenov Formation, rock-forming components, lithologic types of rocks, well logging, artificial neural networks, West Siberia*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается существенное увеличение количества публикаций, посвященных изучению особенностей геологического строения баженовской свиты — главной нефтегенерирующей толщи в Западно-Сибирском бассейне, к которой приурочены залежи нефти в нетрадиционных коллекторах пласта Ю<sub>0</sub>. В значительной степени интерес к этому объекту обусловлен его высоким ресурсным потенциалом. Согласно некоторым оценкам, на территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции баженовская свита и ее аналоги при толщине 20—40 м на общей площади распространения более 1 млн км<sup>2</sup> содержат извлекаемые ресурсы нефти до 60 млрд т [Нестеров, 2000; Конторович и др., 2014].

Надо отметить, что нефтяные компании в последние годы начали активно вовлекать в разработку запасы в пласте Ю<sub>0</sub>, которые относятся к трудноизвлекаемым. За последние 10 лет на территории Хан-

ты-Мансийского АО (ХМАО) в эксплуатацию введено 33 залежи на 15 месторождениях. Причиной этого является ухудшение ресурсной базы в главных нефтеносных районах провинции и, как следствие, неуклонное снижение добычи нефти из основных продуктивных комплексов нижнего мела (группа пластов «А» и «Б») и верхней юры (группа пластов «Ю<sub>1</sub>»).

Выделенная в 1959 г. Ф.Г. Гурари на территории Омской области в разрезах скважин Саргатской площади баженовская свита (первоначально «пачка» в составе марьяновской свиты) была охарактеризована как «аргиллиты битуминозные», которые на каротажных диаграммах выделялись резким увеличением кажущегося сопротивления пород.

В одной из первых работ, посвященных детальным петрографическим исследованиям образцов керн, отобранных из верхнеюрских отложений в опорных и поисковых скважинах Обь-Иртышского междуречья, было указано, что баженовская пачка сложена аргиллитами с прослоями глинисто-карбонатного и кремнистого состава. Также было отмечено, что породы пачки отличаются от выше- и ниже-лежащих аргиллитов повышенной битуминозностью, известковистостью, обилием органических остатков и пиритизацией [Гурова, 1960].

В дальнейшем литологические и петрографические исследования пород баженовской свиты выполнялись Т.В. Дорофеевой, О.Г. Зариповым, М.Ю. Зубковым, И.И. Нестеровым, Г.Н. Перозио, Г.Э. Прозоровичем, С.В. Сараевым, С.Г. Саркисяном, И.Н. Ушатинским и другими. По результатам этих исследований среди пород свиты были выделены глинистые, карбонатно-глинистые, карбонатные или глинисто-карбонатные, карбонатно-кремнистые, глинисто-кремнистые и кремнистые породы, или силициты.

Необходимо отметить, что в большинстве работ результаты исследований представлены по Салымскому месторождению, на котором в 1967 г. был получен первый фонтанирующий приток нефти из баженовской свиты.

В последние два десятилетия в связи с возросшим интересом нефтяных компаний к возможностям добычи нефти из баженовской свиты значительно увеличился объем литологических работ по ее изучению на всей площади Западно-Сибирского осадочного бассейна. Результаты этих исследований приведены в публикациях А.Д. Алексеева, Н.С. Балужкиной, О.А. Важениной, А.Е. Гаврилова, Е.А. Жуковской, А.Г. Замирайловой, Ю.Н. Занина, М.Ю. Зубкова, Г.А. Калмыкова, А.Э. Конторовича, А.Г. Мухер, В.Д. Немовой, И.В. Панченко, И.Д. Поляковой, Е.А. Предтеченской, С.В. Рыжковой, В.С. Славкина, М.А. Фомина, В.Г. Эдер, П.А. Яна и других [Зубков, 1999; Занин и др., 2005; Балужкина и др., 2014; Эдер и др., 2015; Калмыков, 2016].

К одной из последних работ, где на основе результатов аналитического определения химического и минералогического состава большого объема образцов детально рассмотрен вещественный состав баженовской свиты на большей части территории ее распространения, относится публикация [Конторович и др., 2016]. В ней же предложена дробная классификация пород, которая, как утверждают авторы, может быть использована при решении многих задач, в том числе для установления статистических связей между минералогическим составом пород свиты и результатами геофизических исследований скважин (ГИС).

Важно отметить, что выделение классов, а в их составе подклассов пород баженовской свиты, характеризующихся различным вещественным составом, предопределяет выполнение интерпретации материалов ГИС на более детальном уровне. Определение вещественного состава пород и построение литологических колонок свиты в разрезах скважин на основе количественной интерпретации материалов ГИС представляется актуальным.

Настоящая работа посвящена определению порообразующих компонентов и основных литологических типов пород баженовской свиты по данным ГИС с использованием разработанного вычислительного алгоритма на базе метода машинного обучения — искусственных нейронных сетей (ИНС).

Полученные результаты выполненных исследований могут быть полезны при изучении строения разрезов баженовской свиты в скважинах, из которых керновый материал не отбирался. Это позволит сгустить сеть наблюдений при анализе распространения по площади пород различного состава.

## **МЕТОДЫ ЛИТОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГИС В ИНТЕРВАЛЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ**

Информация о минерально-вещественном составе пород дает возможность с высокой точностью определить соотношения основных порообразующих компонентов, а также выявить закономерности их распределения по разрезу. Кроме того, знание компонентного состава необходимо при построении петрофизических зависимостей «кern-ГИС» и построении моделей относительного содержания порообразующих компонентов по комплексу ГИС. Традиционная петрофизическая интерпретация данных ГИС проводится с использованием зависимостей kern—кern, kern—ГИС и ГИС—ГИС, и сводится

к обоснованию основных параметров подсчета запасов месторождения. Очевидно, что для изучения разрезов небольшой толщины с полиминеральным составом твердой фазы и сложной структурой порового пространства методов традиционной интерпретации каротажных данных недостаточно, необходимо установление количественного соотношения пород различного состава и в дальнейшем выявление закономерностей его пространственного изменения.

Для расчета объемного содержания минеральных компонентов горной породы по комплексу данных ГИС, в том числе для объектов, аналогичных баженовской свите, многими авторами использовался метод многомерного анализа [Еникеев, 1974; Еникеев и др., 2011, 2014; Вендельштейн, Резанов, 1978]. Затем применение получил метод интерпретации данных ГИС, описанный в работах [Moss, Harrison, 1985; Mitchell, Nelson, 1988, 1991; Doveton, 1994; Методические рекомендации..., 2003; Heidari Z., Torres-Verdín, 2013], который позже использовался при определении вещественного состава пород баженовской свиты [Куляпин, Соколова, 2015; Калмыков, 2016; Федосеев и др., 2018; Федорова и др., 2020; Рыжкова и др., 2021].

Как известно, метод базируется на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), по определению связи каротажных сигналов и искомого относительного содержания породообразующих компонентов:

$$\sum_{j=1}^m e_{ij} V_j = x_i,$$

где  $i \in [1; n]$ ,  $j \in [1; m]$ ,  $n$  — количество методов ГИС;  $m$  — количество породообразующих компонентов;  $x_i$  — показания метода ГИС;  $e_{ij}$  — теоретические значения  $i$ -го параметра для  $j$ -й компоненты;  $V_j$  — объемные содержания породообразующих компонентов.

Для адаптации алгоритма используется априорная информация о строении и составе изучаемых пород. Эмпирические коэффициенты индивидуальны для каждого изучаемого разреза и рассчитываются с привлечением данных, полученных по результатам геохимических и литологических анализов кернового материала. Несомненно, для получения более точного определения объемного содержания породообразующих компонентов нетрадиционных пород-коллекторов баженовской свиты необходимы расширенный комплекс ГИС и полномасштабное изучение керна. Преимуществом описываемого подхода является относительная простота использования алгоритма при известной априорной информации о составе пород свиты, что дает возможность оперативно определять объемное содержание породообразующих компонентов. Причем при адекватно подобранных входных параметрах достоверность полученной литологической модели значительно выше.

Для расширения применения традиционного способа определения вещественного состава баженовской свиты в работе [Глинских, Федосеев, 2019] предложен модельный подход, основанный на эффекте частотной дисперсии электрофизических характеристик. С применением этого подхода породообразующие компоненты рассчитываются на основе моделей смесей, устанавливающих связь между породообразующими компонентами и эффективными электрофизическими характеристиками пласта в целом [Temnikova et al., 2020].

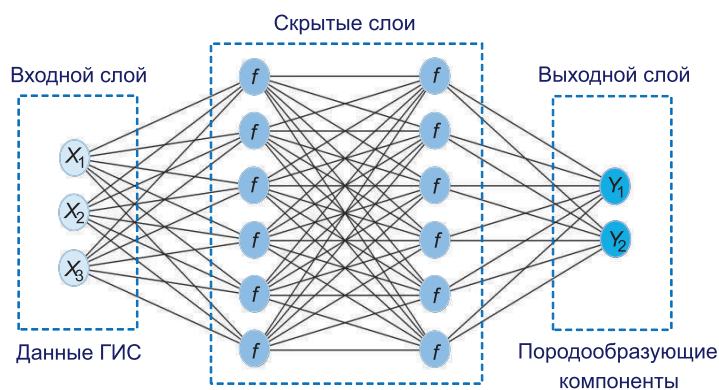
В настоящей работе для определения минерально-компонентного состава баженовской свиты по данным ГИС и керна предлагается использование искусственных нейронных сетей. ИНС — это класс математических моделей, являющихся универсальными аппроксиматорами [McCulloch, Pitts, 1943; Cybenko, 1989; Рашка, 2017]. Основное преимущество заключается в их гибкости, позволяющей учитывать любого рода априорную информацию или физические законы [Raissi et al., 2019]. Опыт успешного применения ИНС при интерпретации и обработке каротажных данных представлен во многих публикациях [Lee, Datta-Gupta, 1999; Al-Mudhafar, 2017; Логинов, Петров, 2019; Wood, 2020].

В общем виде используемая ИНС записывается как произвольная функция, зависящая от входных аргументов и внутренних параметров, которые подбираются в процессе обучения нейронной сети:

$$F(x, \Theta) = \{f_1(x, \Theta), \dots, f_m(x, \Theta)\},$$

где  $x = (x_1, \dots, x_n)$  — входные аргументы, представленные данными ГИС;  $n$  — количество методов ГИС;  $\Theta$  — внутренние параметры нейросети, которые подбираются в процессе обучения;  $f_1, \dots, f_m$  — набор функций, аппроксимирующих содержание каждого породообразующего компонента;  $m$  — количество породообразующих компонентов. Таким образом, нейронная сеть аппроксимирует объемные содержания породообразующих компонентов  $V$ , основываясь на показаниях данных ГИС. При обучении результат показаний нейронной сети сравнивается с известными результатами лабораторного исследования образцов керна.

На схеме (рис. 1) показана архитектура полносвязной ИНС с двумя скрытыми слоями: 3 нейрона на входном слое с входными данными  $X_1, X_2, X_3$ ; 6 нейронов на каждом скрытом слое с функцией активации



**Рис. 1. Схематическое представление полносвязной ИНС с двумя скрытыми слоями.**

вазии  $f$ ; 2 нейрона на выходном слое с выходными данными  $Y_1, Y_2$ .

Для определения вещественного состава пород баженовской свиты используется архитектура полносвязной ИНС с пятью скрытыми слоями и 100 нейронами на каждом слое; алгоритм обучения Adam [Kingma, Ba, 2014] с шагом обучения 0.001. Количество эпох обучения составляет 4000, размер

обучающей выборки равен количеству образцов керна — 35.

Так, реализован вычислительный алгоритм с использованием ИНС для построения литологической модели по результатам интерпретации данных ГИС в интервалах баженовской свиты и показано его применение для центрального участка Салымской площади. Результаты изучения вещественного состава и строения свиты продемонстрированы в следующем разделе. Авторами использованы материалы ГИС по скважинам, которые расположены в центральных (Салымская, Восточно-Сургутская, Федоровская, Рускинская, Дружная, Повховская площади) и юго-восточных (Поскоевская, Ракитинская, Межовская площади) районах Западно-Сибирского осадочного бассейна.

Большинство исследуемых скважин охарактеризовано стандартным комплексом данных ГИС (боковой каротаж, гамма-каротаж, потенциал самополяризации, акустический каротаж, боковое каротажное зондирование, нейтронный гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж плотностной, высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование и его модификации). Анализ каротажного материала показал, что качество и количество данных ГИС на исследуемых площадях позволяет выполнять количественную интерпретацию с определением относительного содержания породообразующих компонентов в разрезах баженовской свиты.

В качестве дополнительного материала использовались результаты литологических и геохимических анализов керна, полученных в ИНГГ СО РАН коллективом специалистов под руководством академика РАН А.Э. Конторовича в рамках выполненных комплексных исследований по изучению баженовской свиты [Эдер и др., 2015, 2016, 2017; Конторович и др., 2016, 2018].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПО САЛЫМСКОЙ ПЛОЩАДИ

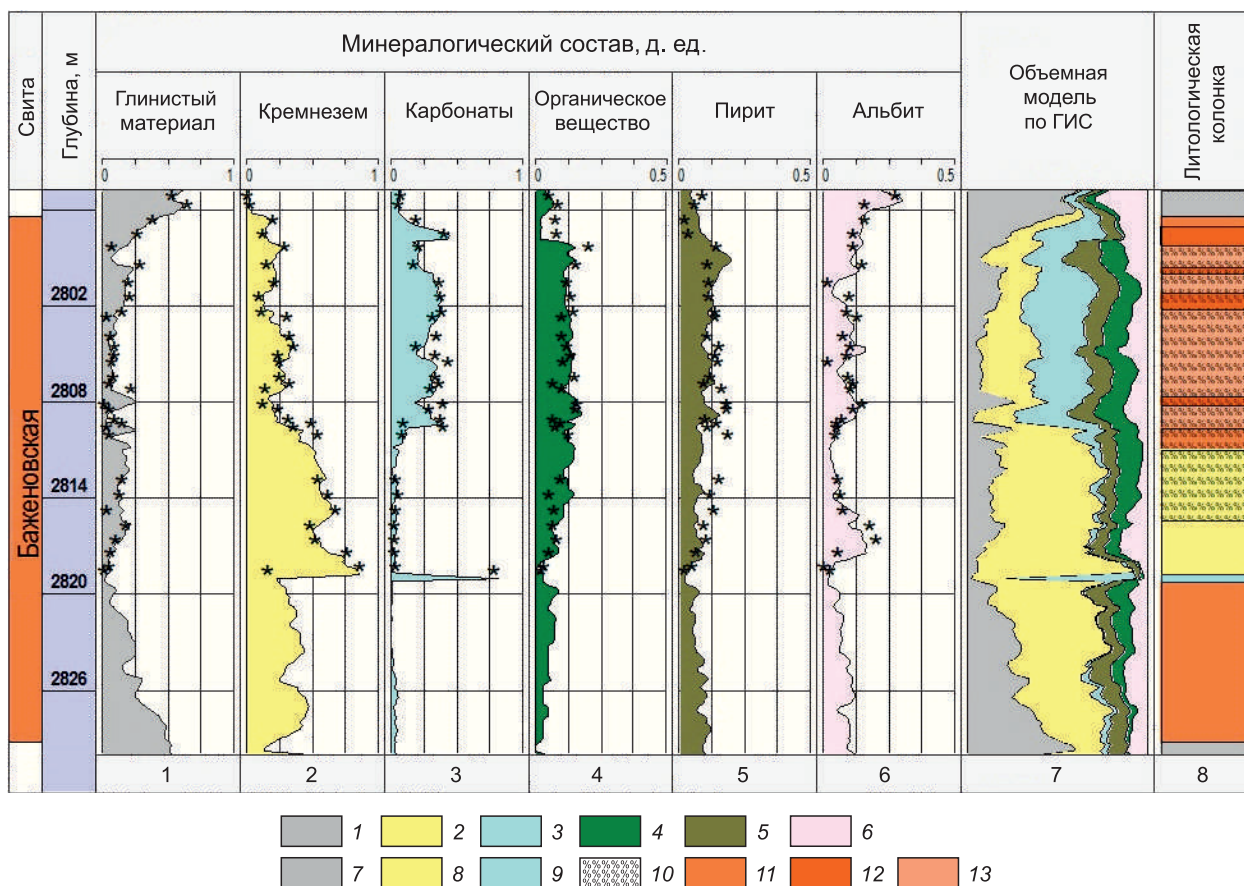
На первом этапе в качестве объекта исследований (эталона) был выбран локальный участок площадью 3.8 км<sup>2</sup> в центральной части Салымской площади, где из баженовской свиты были получены притоки нефти. В пределах этого участка строение свиты изучено по пяти скважинам. Мощность свиты в изученных скважинах изменяется от 33 до 35 м.

При определении основных литологических типов пород использовалась классификация, опубликованная в работе [Конторович и др., 2016]. Эта классификация разработана по результатам комплексного литолого-геохимического изучения керна из 15 скважин, разрезы которых характеризуют строение свиты на большей части территории ее распространения. Авторами выделены 4 основных класса пород, разделенных на 16 подклассов.

Необходимо отметить, что количество типов пород баженовской свиты, которые можно выделить наиболее уверенно и однозначно по материалам ГИС, меньше, чем при литолого-геохимическом анализе керна. Это обусловлено тем, что при определении минералогического состава по ограниченному набору данных ГИС рассчитывается число породообразующих компонентов, не превышающее набор каротажных методов, что, в свою очередь, устанавливает ограничение на количество выделяемых типов пород.

В настоящей работе в результате интерпретации материалов ГИС в разрезах баженовской свиты выделены аргиллиты, силициты, карбонаты, микститы глинисто-кремнистые, микститы глинисто-карбонатные и микститы кремнисто-карбонатные, которые подразделяются на породы с повышенным (>10 %) или пониженным (<10 %) содержанием органического вещества. Всего 12 типов пород.

На рисунке 2 приведен пример применения ИНС в интерпретации данных ГИС для определения вещественного состава баженовской свиты в сопоставлении с результатами лабораторных анализов керна (первые шесть колонок) и объемная модель (колонок 7).



**Рис. 2. Литологическая модель разреза баженовской свиты в центральной части Салымской площади, построенная с применением искусственной нейронной сети.**

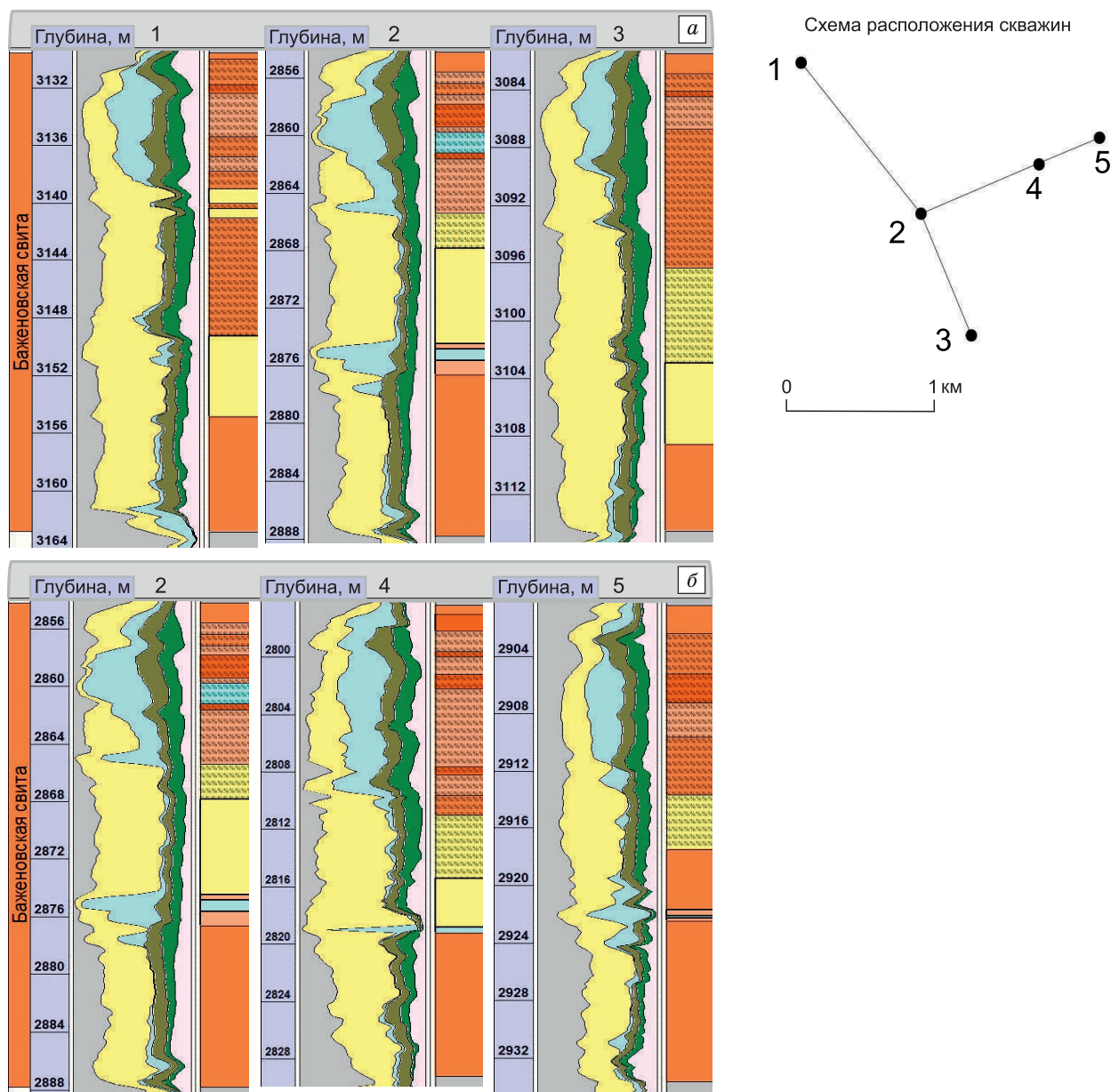
Колонки 1—6: цветом показан результат расчета породообразующих компонентов по данным ГИС; звездочки — значения по лабораторным анализам керн. Трек 7: объемная модель баженовской свиты; 8 — литологическая колонка с основными типами пород. 1—6 — минералогический состав: 1 — глинистый материал, 2 — кремнезем, 3 — карбонаты, 4 — органическое вещество, 5 — пирит, 6 — альбит; 7—13 — основные литологические типы: 7 — аргиллиты, 8 — силициты, 9 — карбонаты, 10 — высокоуглеродистые породы; микститы: 11 — глинисто-кремнистые, 12 — глинисто-карбонатные, 13 — кремнисто-карбонатные.

Построенная литологическая модель отражает многокомпонентный состав пород и отображает его изменение с глубиной. Помимо основных породообразующих компонентов — кремнезема, глинистого материала, карбонатов и органического вещества в модели учтены пирит и альбит, содержания которых в отдельных пачках свиты, по данным работ [Конторович и др., 2016; Эдер и др., 2020], на территории Широкого Приобья составляют от 0 до 23.5 и до 23.9 % соответственно. Приведена также литологическая колонка с основными типами пород.

Из рисунка 2 видно, что для используемого подхода рассчитанные содержания породообразующих компонентов достаточно хорошо коррелируют со значениями, полученными по лабораторным анализам керн. Относительная погрешность на обучающей выборке составила около 7 %, что является допустимым в решаемой задаче. Причем в интервале глубин 2818—2819 м выделяется прослой карбонатов, который был отмечен по результатам изучения литологического состава пород и геохимических анализов керн. При определении состава пород на основе интерпретации материалов ГИС с использованием других методов такие маломощные прослои не выделяются.

На основе вычислительного алгоритма с использованием ИНС вещественный состав пород баженовской свиты в пределах изучаемого участка определен в пяти скважинах, по которым были построены профили для выявления особенностей изменения строения разрезов по латерали (рис. 3).

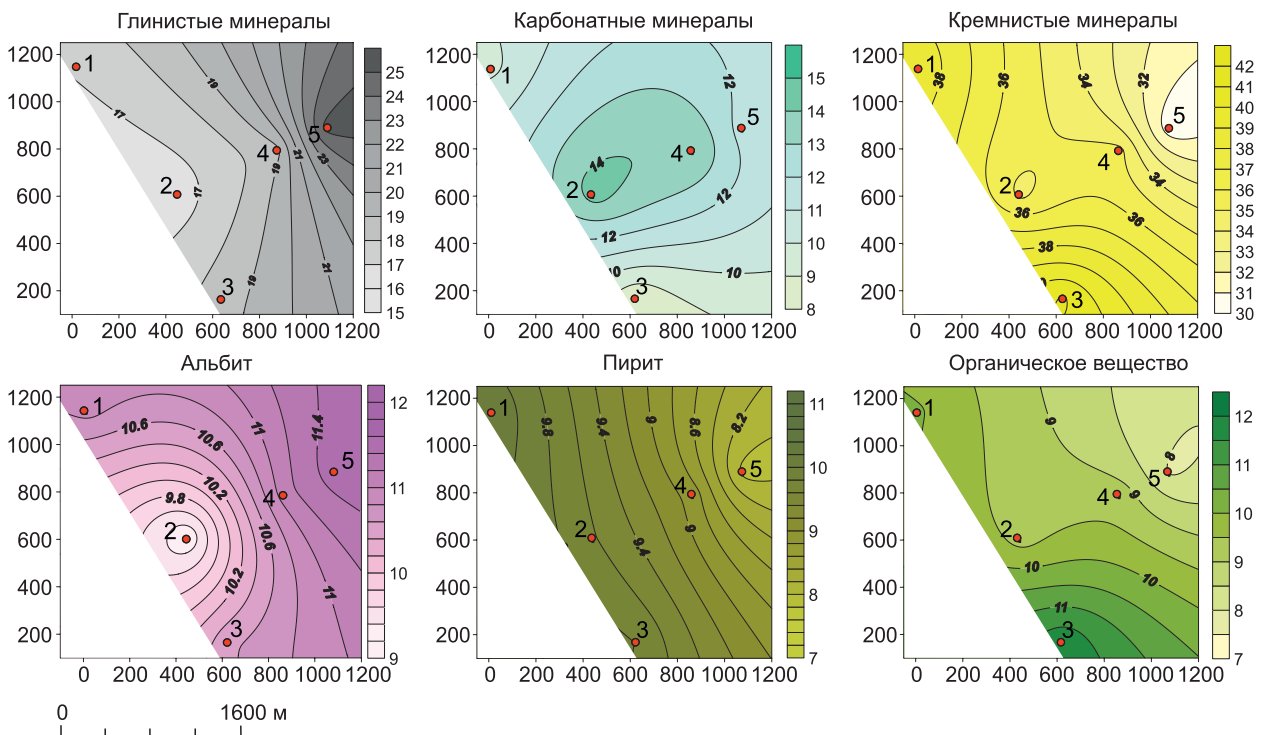
Разрезы свиты во всех скважинах отчетливо разделяются на три части. В нижней части свиты выделяется пачка микститов глинисто-кремнистых толщиной от 6.0 до 16.2 м с содержанием глинистого материала (15—47 %) и кремнезема (18—48 %). Содержание органического вещества в ней не превышает 9 %. Выше этой пачки отмечается прослой карбонатных пород, толщина которого в разрезах изу-



**Рис. 3.** Схемы (а, б) сопоставления разрезов баженовской свиты в пределах центрального участка Салымской площади по результатам интерпретации данных ГИС и керна.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

ченных скважин изменяется от 0 м в скв. 3 (см. рис. 3, а) до 1 м в скв. 2. В средней части свиты обособляется пачка существенно кремнистых пород — силицитов с пониженным в нижней части и повышенным в верхней части содержанием органического вещества. Толщина пачки составляет 4.0—12.2 м. Верхняя часть свиты представлена микститами: кремнисто-карбонатными, глинисто-карбонатными и глинисто-кремнистыми. Характерной особенностью этой пачки является повышенное содержание карбонатного материала (до 57 %), пирита (до 21 %) и органического вещества (до 25 %). Толщина пачки в изученных скважинах изменяется от 9.8 до 17.5 м. Согласно работе [Эдер и др., 2016, 2019], высокая концентрация карбонатов в верхней части свиты связана с реликтами кокколитофорид, представленных кальцитом, с существенным количеством карбонатных конкреций толщиной 10—13 см, а также прослоями остатков раковин двустворок. В кровле свиты выделяется маломощная 1.0—4.7 м пачка микситов глинисто-кремнистых, которая, согласно представлениям В.Г. Эдер и др. [Эдер и др., 2020], является переходной от верхней части баженовской свиты к подошвенной части подачимовской толщи.



**Рис. 4. Карты средних содержаний (мас. %) породообразующих компонентов баженовской свиты центрального участка Салымской площади по результатам интерпретации данных ГИС и керн.**

Из анализа результатов литологической интерпретации данных ГИС следует, что микститы кремнисто-карбонатные с повышенным содержанием органического вещества приурочены к верхней части баженовской свиты и перекрываются небольшой по толщине пачкой микститов глинисто-кремнистых. Ниже по разрезу выделяется относительно мощная пачка силицитов, которая подстилается микститами глинисто-кремнистыми. Такое трехчленное строение разреза свиты по результатам детального литологического исследования разрезов в пределах Мансийской синеклизы, где расположена Салымская площадь, ранее отмечалось в работе [Эдер и др., 2015].

На рисунке 3, а видно, что мощность микститов кремнисто-карбонатных в верхней части и микститов глинисто-кремнистых в нижней части баженовской свиты максимальна в районе скв. 2 и уменьшается в северо-западном и юго-восточном направлениях. Мощность силицитов в средней части свиты незначительно изменяется по разрезу, при этом толщина силицитов с повышенным содержанием органического вещества увеличивается с северо-запада на юго-восток.

По направлению с юго-запада на северо-восток в нижней части свиты отмечается увеличение толщины пачки микститов глинисто-кремнистых, выше которой прослой карбонатов имеет непостоянную толщину (см. рис. 3, б). В этом же направлении происходит сокращение (уменьшение) мощности пачки силицитов с одновременным увеличением в ее нижней части глинистого материала (скв. 5). Верхняя пачка имеет максимальную мощность в средней части профиля (скв. 4), при этом в ее составе отмечается существенное увеличение толщин прослоев микститов кремнисто-карбонатных с повышенным содержанием органического вещества и появление в кровле слоя микститов глинисто-карбонатных толщиной 5.2 м. Мощность микститов глинисто-кремнистых переходной пачки, венчающей разрез баженовской свиты, увеличивается с юго-запада на северо-восток.

Из оценки средних концентраций породообразующих компонентов баженовской свиты на рассматриваемом участке Салымской площади следует, что наибольшее содержание характерно для кремнистых минералов — 34 %. Глинистые и карбонатные минералы составляют 20 и 15 % соответственно. При этом отмечается пониженное среднее содержание органического углерода — 9 %. Близкие по значениям концентрации приходятся на альбит (11 %) и пирит (9 %).

На основе полученных результатов литологической интерпретации данных ГИС построены карты средних концентраций породообразующих компонентов баженовской свиты (рис. 4).

Несмотря на сходное строение разрезов свиты в исследованных скважинах, средние концентрации породообразующих компонентов на пределах локального участка Салымской площади имеют значи-

тельные изменения. Так, среднее содержание глинистых минералов и альбита увеличивается с юго-запада на северо-восток, а содержание кремнистых минералов, пирита и органического углерода, наоборот, уменьшается. Наибольшее значение среднего содержания карбонатного материала отмечается в центральной части исследуемой территории, уменьшаясь на северо-запад, юго-запад и северо-восток.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПО РАЙОНУ СУРГУТСКОГО СВОДА

В районе Сургутского свода и прилегающей с востока территории строение разрезов баженовской свиты по результатам интерпретации данных ГИС изучено на Восточно-Сургутской, Федоровской, Рускинской, Дружной и Повховской площадях (рис. 5.). При этом надо отметить, что керном разрезы свиты охарактеризованы на Дружной и Повховской площадях [Эдер и др., 2019, 2020]. Мощность свиты в скважинах перечисленных площадей составляет 22.5—26.0 м.

На рассматриваемой территории, как и на Салымской площади, в разрезах баженовской свиты отмечается ярко выраженное трехчленное строение.

Нижняя пачка сложена микститами глинисто-кремнистыми с пониженным содержанием органического вещества (< 10 %), глинистых минералов 20—49 %, кремнезема 30—49 %. На Федоровской площади в нижней части этой пачки на глубине 3008—3009 м выделяется маломощный прослой микститов глинисто-карбонатных. Толщина пачки уменьшается в северо-восточном направлении от 8 м на Восточно-Сургутской площади до 2 м на Повховской. Средняя пачка состоит преимущественно из силицитов. Содержание кремнезема в ней варьирует от 50 до 70 %. Мощность пачки изменяется от 4.5 до 10.0 м, причем повышенные толщины отмечаются в районе Дружной и Повховской площадей. Верхняя пачка свиты представлена переслаиванием микститов глинисто-кремнистых, глинисто-карбонатных и кремнисто-карбонатных. Для пачки характерны высокие концентрации органического вещества (10—28 %). Повышенное содержание карбонатного материала (до 35 %) наблюдается в верхней части свиты.

Отличительной особенностью разрезов баженовской свиты в районе Сургутского свода является очень небольшая толщина переходной пачки в ее кровле. В изученных интервалах керна на Дружной и Повховской площадях толщина пачки не превышает 0.3 м [Эдер и др., 2020]. Это не позволяет ее выделить по материалам ГИС, поскольку шаг дискретизации при каротаже составляет 0.2 м.

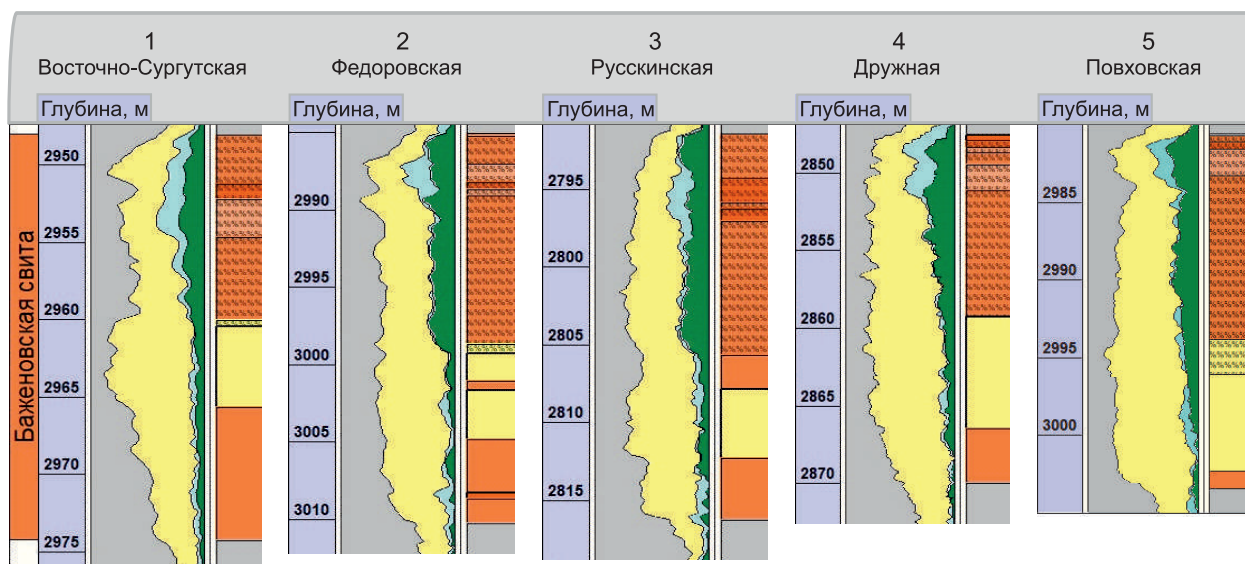


Рис. 5. Схема сопоставления разрезов баженовской свиты по результатам интерпретации данных ГИС и керна (район Сургутского свода).

Усл. обозн. см. на рис. 2.



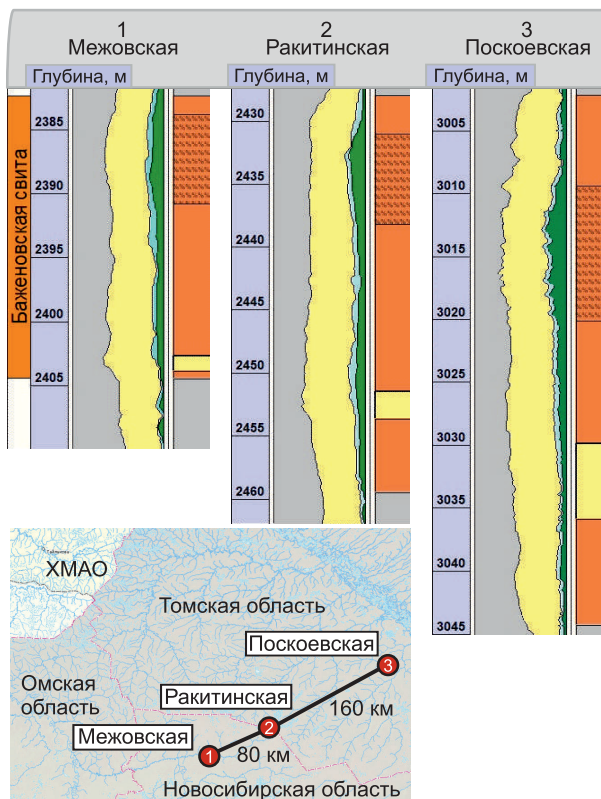
**Рис. 6. Схема сопоставления разрезов баженовской свиты по результатам интерпретации данных ГИС и керна (юго-восточные районы Западной Сибири).**

Усл. обозн. см. на рис. 2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ЮГО-ВОСТОЧНЫМ РАЙОНАМ

В юго-восточных районах в разрезах баженовской свиты на Межовской, Ракитинской и Поскоевской площадях отмечается существенное уменьшение количества биогенного материала (кремнезем, карбонаты, органическое вещество) и увеличение содержания терригенного материала, представленного глинистыми минералами (рис. 6). Мощность свиты в изученных скважинах составляет 24—41 м.

Разрезы почти полностью состоят из микститов глинисто-кремнистого состава с приблизительно равным содержанием кремнистых и глинистых компонентов (25—45 %). Органического вещества в них, как правило, мало (<10 %). При этом в верхней части всех разрезов выделяется пачка высокоуглеродистых пород с содержанием органического вещества 10—23 %. Ее толщина изменяется от 7 до 10 м. В нижней части свиты выделяется маломощный слой силицитов (1—5 м) с концентрацией кремнезема 50—55 %, мощность которого уменьшается в юго-западном направлении, от Поскоевской площади к Межовской. Для разрезов характерно отсутствие карбонатной пачки в верхней части свиты, что ранее было отмечено по результатам детальных литологических исследований керна, представленных в работе [Эдер и др., 2016].



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена литологическая характеристика разрезов баженовской свиты по комплексу каротажных данных с учетом результатов лабораторных анализов керна. С использованием современных вычислительных алгоритмов построены литологические модели разрезов свиты по скважинам Сальмской, Восточно-Сургутской, Федоровской, Рускинской, Дружной, Повховской, Поскоевской, Ракитинской и Межовской площадей Западно-Сибирского осадочного бассейна.

Для литологической интерпретации данных ГИС применительно к изучению вещественного состава баженовской свиты был разработан вычислительный алгоритм на основе искусственных нейронных сетей. С использованием этого подхода рассчитанные содержания породообразующих компонентов хорошо согласуются с результатами детальных литолого-геохимических исследований керна.

Литологические типы пород баженовской свиты по данным ГИС определялись согласно классификации литотипов, основанной на современном представлении распределения породообразующих минеральных и минералоидных компонентов (кремнистые, глинистые, карбонатные породообразующие компоненты и органическое вещество). В изученных разрезах скважин выделены основные литологические типы пород, включающие силициты, аргиллиты, карбонаты, а также микститы (смешанные кремнисто-глинисто-карбонатные породы), в том числе обогащенные органическим веществом.

По выделенным литотипам определено взаимоположение пачек пород различного литологического состава, составлены схемы сопоставления разрезов для центральных и юго-восточных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна. Для центрального района по результатам интерпретации данных ГИС отмечается ярко выраженное трехчленное строение разрезов баженовской свиты. Нижняя пачка сложена микститами глинисто-кремнистыми с пониженным содержанием органического вещества, средняя пачка состоит преимущественно из силицитов, а верхняя пачка свиты представлена переслаиванием микститов глинисто-кремнистых, глинисто-карбонатных и кремнисто-карбонатных с характерно высокими концентрациями органического вещества и повышенным содержанием карбонатно-

го материала. Отличительной особенностью разрезов свиты в районе Сургутского свода является очень небольшая толщина переходной пачки в ее кровле. Для юго-восточных районов в разрезах баженовской свиты отмечается существенное уменьшение количества биогенного материала и увеличение содержания терригенного материала, представленного глинистыми минералами. Разрезы почти полностью состоят из микститов глинисто-кремнистого состава с приблизительно равным содержанием кремнистых и глинистых компонентов и пониженным содержанием органического вещества. Для разрезов характерно отсутствие карбонатной пачки в верхней части свиты.

По рассчитанному на основе метода машинного обучения вещественному составу баженовской свиты в пределах участка Салымской площади построены карты средних концентраций породообразующих компонентов, позволившие проследить пространственное изменение содержаний органического вещества и основных породообразующих компонентов. Отмечены значительная вертикальная неоднородность и латеральная изменчивость баженовской свиты, которые обусловлены поликомпонентным составом и сложным распределением различных типов отложений, определяющими ее основные характерные особенности.

Разработка вычислительного алгоритма определения вещественного состава горных пород на основе искусственных нейронных сетей и его применение для построения реалистичных моделей для импульсного электромагнитного зондирования баженовской свиты с использованием системы наклонно-горизонтальных скважин выполнено в рамках гранта РФФИ № 19-77-20130 «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН».

Обобщение результатов геолого-геофизических материалов центральных и юго-восточных районов Западной Сибири выполнено в рамках научной темы «Цифровая модель Западно-Сибирской нефтегазонасыщенной провинции, седиментогенез и литостратиграфия, закономерности размещения нефтяных и газовых месторождений, детализированная количественная оценка ресурсов углеводородов в традиционных и нетрадиционных скоплениях как основа прогноза развития нефтегазового комплекса» государственной программы ФНИ.

Результат интеллектуальной деятельности получен в рамках гранта по соглашению с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-804 от 02.10.2020 (внутренний номер гранта № 13.1902.21.0016).

## ЛИТЕРАТУРА

**Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Белохин В.С., Хамидуллин Р.А., Корост Д.В.** Кремнистые коллекторы баженовского горизонта Среднеазымского месторождения и структура их пустотного пространства // Вестник Московского университета, 2014, № 4 (2), с. 35—43.

**Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А.** Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов (при подсчете запасов и проектировании разработки месторождений). М., Недра, 1978, 29 с.

**Глинских В.Н., Федосеев А.А.** Новый подход к литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований в интервалах баженовской свиты // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2019, № 4, с. 80—88.

**Гурова Т.И.** О вещественном составе верхнеюрских отложений Западно-Сибирской низменности // Докл. Академии наук СССР, 1960, т. 134, № 4, с. 924—927.

**Еникеев Б.Н.** Системный подход к статистической интерпретации геофизических данных в задачах с априорно известной структурой многомерных моделей // Тезисы семинара «Применение математических способов и ЭВМ в геологии» (Алма-Ата, 20—22 августа, 1974). Алма-Ата, 1974, с. 85—87.

**Еникеев Б.Н., Охрименко А.Б., Смирнов О.А.** Фундаментальные и статистические взаимосвязи в петрофизике и проблематика сравнения сходных петрофизических взаимосвязей // НТВ Каротажник, 2011, № 7, 102 с.

**Еникеев Б.Н., Колесов В.В., Лебедева М.Л., Смирнов О.А., Сусанина О.М.** Петрофизические аспекты проблемы оценки отложений бажена // Материалы 6-й Международной геолого-геофизической конференции «Санкт-Петербург 2014. Геонауки — инвестиции в будущее» (Санкт-Петербург, 7—10 апреля, 2014). СПб, 2014, PaperTuD 05, 5 с.

**Зубков М.Ю.** Литолого-петрофизическая характеристика отложений баженовской и абалакской свит центральной части Красноленинского свода (Западная Сибирь) // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (12), с. 1821—1836.

**Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г.** Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера, 2005, № 4, с. 118—135.

**Калмыков Г.А.** Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: Автореф. дис... д.г.-м.н. М., МГУ, 2016, 91 с.

**Куляпин П.С., Соколова Т.Ф.** Использование статистического подхода при интерпретации данных ГИС в нефтематеринских породах баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Технологии сейсморазведки, 2013, № 3, с. 28—42.

**Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Казаненков В.А., Конторович В.А., Костырева Е.А., Пономарева Е.В., Рыжкова С.В., Ян П.А.** Баженовская свита — главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России // Электронный научный журнал. Георесурсы. Геознергетика. Геополитика, 2014, вып. 2 (10), с. 1—8.

**Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г.** Классификация пород баженовской свиты // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (11), с. 2034—2043.

**Конторович А.Э., Пономарева Е.В., Бурштейн Л.М., Глинских В.Н., Ким Н.С., Костырева Е.А., Павлова М.А., Родченко А.П., Ян П.А.** Распределение органического вещества в породах баженовского горизонта // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (3), с. 357—371.

**Куляпин П.С., Соколова Т.Ф.** Прогноз коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керна и геофизических исследований скважин // Изв. Томск. политех. ун-та, 2015, т. 326, № 1, с. 118—133.

**Логинов Г.Н., Петров А.М.** Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (11), с. 1650—1657.

**Методические рекомендации** по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / Под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. Москва—Тверь, ВНИГНИ, НПЦ Тверьгеофизика, 2003, 130 с.

**Нестеров И.И.** Новые объекты и технологии производства энергетического сырья в XXI веке // Георесурсы, 2000, №3 (4), с. 31—33.

**Рашка С.** Python и машинное обучение. М., ДМК Пресс, 2017, 418 с.

**Рыжкова С.В., Фомин М.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Покрышкина Э.М.** Литологическая интерпретация каротажа скважин баженовской свиты юго-восточных районов Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2021, т. 16, № 3, с. 1—15.

**Федосеев А.А., Глинских В.Н., Казаненков В.А.** Относительное содержание породообразующих компонентов и основные литологические типы пород баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов по данным геофизических исследований скважин и керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2018, т. 13, № 2, с. 1—19.

**Федорова Д.В., Астафьев А.А., Надеждин О.В., Латыпов И.Д.** Петрофизическая модель баженовской свиты Приобского месторождения «Роснефти» // Деловой журнал neftegaz.ru, 2020, № 6 (102), с. 76—84.

**Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Занин Ю.Н., Жигульский И.А.** Особенности литологического состава основных типов разрезов баженовской свиты // Геология нефти и газа, 2015, № 6, с. 96—106.

**Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Жигульский И.А.** Литология баженовской свиты в районах Хантейской гемиянтеклизы и Межовского мегамыса Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Геология нефти и газа, 2016, № 6, с. 87—96.

**Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Ян П.А.** Закономерности распространения кремнистых пород и «кокколитовой» пачки баженовской свиты // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (3—4), с. 511—521.

**Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Калмыков Г.А.** Свидетельства образования карбонатных пород на геохимических барьерах в черных сланцах на примере баженовской свиты Западной Сибири // Георесурсы, 2019, т. 21, № 2, с. 143—152.

**Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Костырева Е.А., Павлова М.А., Сотнич И.С., Замирайлова А.Г., Пономарева Е.В.** Литолого-геохимические и геофизические особенности приграничных толщ баженовского и куломзинского горизонтов (основание нижнего мела) центральных районов Западной Сибири // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (7), с. 943—961.

**Al-Mudhafar W.J.** Integrating well log interpretations for lithofacies classification and permeability modeling through advanced machine learning algorithms // J. Petrol. Explor. Product. Technol., 2017, v. 7 (4), p. 1023—1033.

**Cybenko G.** Approximation by superpositions of a sigmoidal function // Math. Control Signals Syst., 1989, v. 2 (4), p. 303—314.

**Doveton J.H.** Geologic log analysis using computer methods. Chapter 3. Compositional analysis from wireline logs. AAPG, 1994.

**Heidari Z., Torres-Verdín C.** Inversion-based method for estimating total organic carbon and porosity and for diagnosing mineral constituents from multiple well logs in shale-gas formations // Interpretation, SEG 1 (1), 2013, p. 113—123.

- Kingma D.P., Ba J.A.** A method for stochastic optimization // arXiv: 1412.6980. 2014.
- Lee S.H., Datta-Gupta A.** Electrofacies characterization and permeability predictions in carbonate reservoirs: role of multivariate analysis and nonparametric regression // SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1999.
- McCulloch W.S., Pitts W.A.** Logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bull. Math. Biophys., 1943, v. 5 (4), p. 115—133.
- Mitchell W.K., Nelson R.J.** A practical approach to statistical log analysis // SPWLA 29th Annual Logging Symposium (June 5—8), 1988.
- Mitchell W.K., Nelson R.J.** Statistical log analysis made practical // World Oil, 1991, v. 212 (6), p. 115—119.
- Moss B., Harrison R.** Statistically valid log analysis method improves reservoir description // SPE 13981, 1985.
- Raissi M., Perdikaris P., Karniadaki G.E.** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // J. Comput. Phys., 2019, v. 378, p. 686—707.
- Temnikova E.Y., Fedoseev A.A., Glinskikh V.N.** The material composition and dispersion properties of unconventional reservoir according to electromagnetic sounding // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. Society of Exploration Geophysicists, 2020, p. 1170—1174.
- Wood D.A.** Predicting porosity, permeability and water saturation applying an optimized nearest-neighbour, machine-learning and data-mining network of well-log data // J. Petrol. Sci. Eng., 2020, v. 184, 106587, p. 1—17.

*Поступила в редакцию 15 ноября 2021 г.,  
принята в печать 29 ноября 2021 г.*