



ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОРОДАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ МАНСИЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ И КРАСНОЛЕНИНСКОЙ МЕГАМОНОКЛИЗЫ

В. В. Лапковский, Е. В. Пономарева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

При изучении распределений концентраций $C_{орг}$ в породах обычно ограничиваются построением карт средних содержаний $C_{орг}$ или ОВ по данным аналитических определений по керну. Для увеличения плотности наблюдений в высокорadioактивных толщах используют определения $C_{орг}$, полученные по результатам интерпретации ГИС. Комплексирование аналитических определений $C_{орг}$ и определений $C_{орг}$, полученных с помощью зависимости (концентрации $C_{орг}$ от значений гамма-каротажа) позволило охарактеризовать его распределение для каждой изученной скважины во всем разрезе точно через 0,5 м. Для создания трехмерной модели содержаний $C_{орг}$ выбрана интерполяция трехмерными сплайнами, выраженными через функции Грина. Это дало возможность детально охарактеризовать распределение $C_{орг}$ в различных вертикальных сечениях и субгоризонтальных срезах. Технология может применяться при изучении фильтрационно-емкостных свойств баженовской свиты, для пространственной локализации залежей и решения задач бассейнового моделирования.

Ключевые слова: баженовская свита, трехмерные модели концентраций органического углерода.

CONSTRUCTION OF A THREE-DIMENSIONAL MODEL OF ORGANIC CARBON CONCENTRATIONS IN THE BAZHENOV FORMATION ROCKS OF THE CONJUNCTION ZONE OF THE MANSI SYNECLISE AND KRASNOLENINSKAYA MEGAMONOCLEASE

V. V. Lapkovsky, E. V. Ponomareva

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

When studying the concentration distribution of organic matter in rocks, scientists are usually limited to constructing maps of the average contents of C_{org} or OM according to the analytical definitions by core. To increase the density of observations in highly radioactive strata, C_{org} definitions obtained from the WL interpretation results are used. The present paper contains the integration of analytical definitions of C_{org} and definitions of C_{org} obtained using the dependence (concentration of C_{org} from the values of gamma ray logging) which allowed researchers to characterize the distribution of C_{org} for each studied well in the entire section pointwise through 0.5 m. To create a three-dimensional model of C_{org} contents, an interpolation by three-dimensional splines expressed in terms of Green's functions was chosen, giving an opportunity to characterize the distribution of C_{org} in various cross sections and near-horizontal sections in detail. The described technology can be used in studying the filtration properties of the Bazhenovo Formation, for spatial localization of accumulations and solving basin modeling problems.

Keywords: Bazhenovo Formation, 3-dimensional models of organic carbon concentrations.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-12s-39-46

В Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции отмечается снижение добычи нефти из традиционных берриас-аптских и оксфордских залежей. Одним из перспективных объектов для прироста ресурсов УВ являются трудноизвлекаемые запасы нефти, приуроченные к поровым коллекторам баженовской свиты (баженитам) в резервуаре салымского типа [7].

Проблема нефтеносности этой свиты изучается многими коллективами с начала 1960-х гг., тем не менее до сих пор не выработано единой методики выявления и оконтуривания залежей нефти, что не позволяет эффективно проводить геолого-разведочные работы и обосновывать методику подсчета запасов нефти месторождений в самой свите. Критерий качественного прогноза нефтеносности,

по Ф. Г. Гурари, А. Э. Конторовичу, В. И. Москвину, И. И. Нестерову, Г. Р. Новикову, Ф. К. Салманову, А. В. Тяну и др., – высокая концентрация органического вещества ($C_{орг}$) в породах. Определением закономерностей распределения и построением карт концентраций $C_{орг}$ в баженовской свите и ее стратиграфических аналогах по аналитическим данным в разные годы занимались Н. П. Запивалов, В. Ф. Никонов, Ф. Г. Гурари, И. И. Нестеров, А. Э. Конторович и др. В силу ограниченности исходного аналитического материала эти карты были схематичными. Возможность использования материалов ГИС с помощью зависимости $C_{орг}$ – ГИС (кern – ГИС) для определения концентраций ОВ в высокорadioактивных нефтегазоматеринских толщах, к каким относится и баженовская свита, значительно увеличила плот-

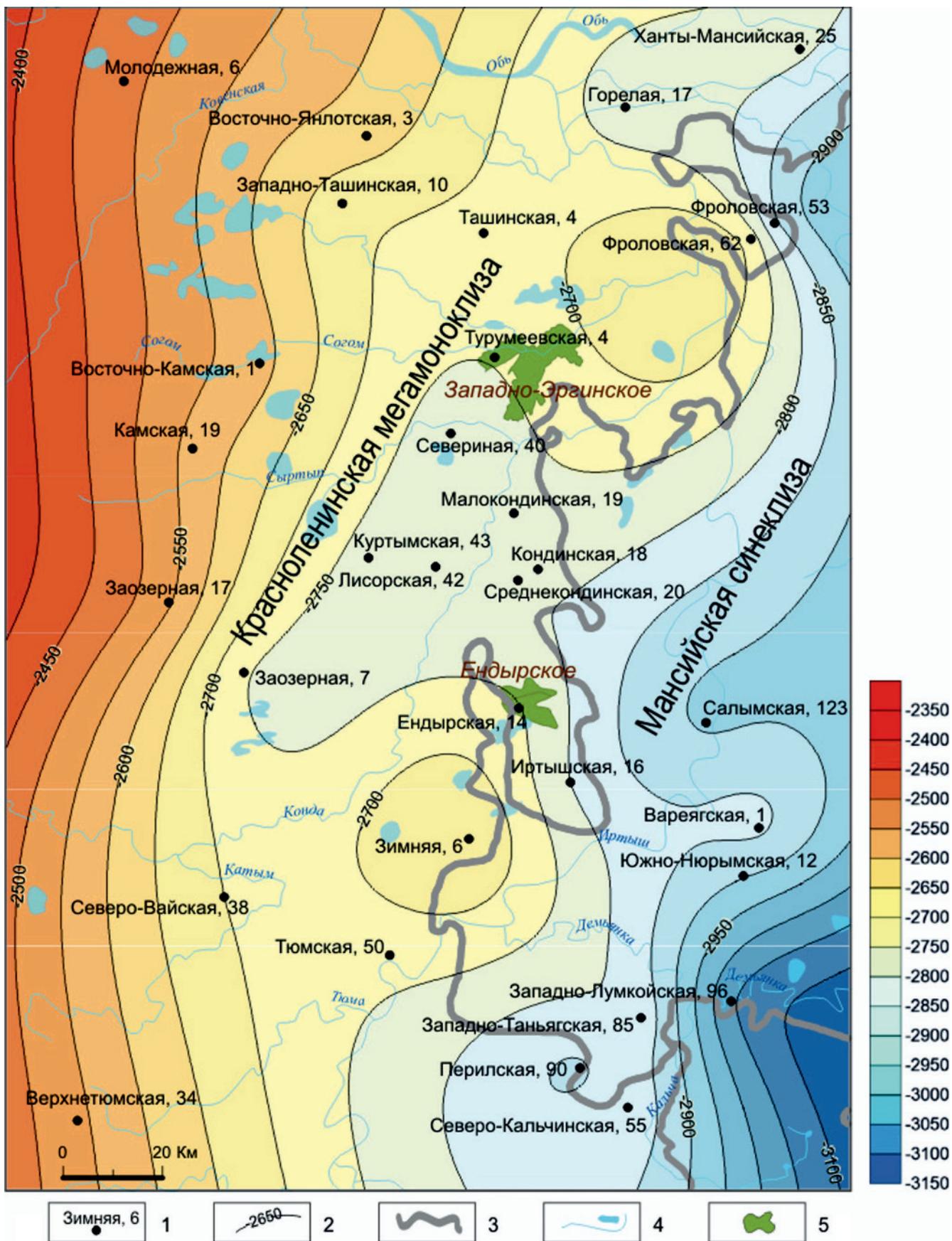


Рис. 1. Обзорная карта территории исследования (фрагмент карты тектонического районирования кровли юрского комплекса Западно-Сибирской геосинеклизы [9])

1 – скважины; 2 – изолинии кровли баженовской свиты; 3 – тектоническая граница; 4 – гидросеть; 5 – месторождения



ность наблюдений 2D. В основе метода – оценка содержания $C_{орг}$ в зависимости от значений различных видов каротажа (ГК, БК, КС и АК), что отражено в большом количестве публикаций зарубежных и отечественных авторов.

В работе А. Э. Конторовича с соавторами [8] для получения представления о трехмерном распределении $C_{орг}$ в центральной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна использован набор двумерных моделей для верхнего, среднего и нижнего интервалов баженовской свиты, которые в совокупности позволяют представить объемный образ. Однако для решения задачи зонального и локального прогноза нефтеносности самой баженовской свиты недостаточно схематических двумерных построений, необходимы максимально детальные трехмерные.

Территория исследования находится на западе Западно-Сибирского осадочного мегабассейна и приурочена к зоне сочленения Мансийской синеклизы и Красноленинской мегамоноклизы. В горизонте $Ю_0$ баженовской свиты открыты два нефтяных месторождения – Ендырское и Западно-Эргинское (рис. 1). Согласно современным представлениям [3–5, 10 и др.], баженовская свита является кероген-карбонатно-глинисто-кремнистой толщей, в основном биогенной природы, сформировавшейся в волжско-раннеберриасское время на этапе максимальной трансгрессии моря в Западно-Сибирском бассейне.

Среднее содержание $C_{орг}$ в породах свиты по данным лабораторных определений изменяется от 2,7 до 14,3 %. В близких пределах концентраций (4–14 %) находятся средние значения $C_{орг}$, выявленные по результатам интерпретации ГИС [8]. Повышенные концентрации (8–10 %) развиты в пределах полосы северо-западного направления, проходящей через Молодежную, Ташинскую, Ендырскую, Салымскую, Иртышскую, Западно-Лумкойскую и Перилскую площади.

На отдельных участках (Севериная, Куртымская, Лисорская и Кондинская площади) содержание $C_{орг}$ достигает 12 % и более, на северо-востоке и юго-западе (Заозерная, Горелая площади) оно снижается до 4–6 %.

В интервале баженовской свиты концентрации $C_{орг}$ изменяются от 2–5 до 29 %, при этом на ряде площадей (Фроловская, Камская, Перилская, Южно-Нюрымская, Молодежная, Заозерная, Ташинская) они не превышают 10–14 %. На отдельных территориях (Ендырская, Салымская, Западно-Лумкойская, Иртышская, Севериная, Зимняя, Кондинская, Куртымская площади) отмечаются повышенные концентрации органического углерода (22–29 %), приуроченные к верхней и средней частям разреза.

Глубины залегания баженовской свиты (см. рис. 1) изменяются от 3100 м на юго-востоке (Мансийская синеклиза) до 2400 м на северо-западе (Красноленинская мегамоноклиза). Отмечается общий региональный подъем баженовских отложе-

ний в западном направлении. Толщина свиты изменяется от 30 м (Иртышская скв. 16) в центральной части до 46 м (Западно-Лумкойская скв. 96) в юго-западной.

В предлагаемой статье описаны опыт построения трехмерной модели с использованием трехмерных аналитических сплайнов и анализ распределения $C_{орг}$ баженовской свиты на основе комплексного обобщения геохимической и геофизической информации в зоне сочленения Мансийской синеклизы и Красноленинской мегамоноклизы.

Материал и методы исследования

Для оценки содержаний $C_{орг}$ в породах баженовской свиты использованы аналитические (химический анализ и пиролиз) определения (191 анализ из 15 скважин), полученные в геохимических лабораториях ИНГГ СО РАН и ВНИГНИ, а также выявленные по результатам интерпретации ГИС во всем разрезе точно (через 0,5 м) для каждой изученной скважины (2504 определений из 32 скважин банка данных ИНГГ СО РАН) с помощью линейной регрессии, установленной по Горшковской скв. 1017 [6]:

$$C_{орг} = a_0 + a_1 \gamma,$$

где $a_0 = 0,35$; $a_1 = 0,17$; γ – значение естественной радиоактивности по ГК (мкР/ч).

Коэффициент детерминации R^2 для зависимости, полученной по экспериментальным данным, равен 0,70.

Из множества возможностей для создания трехмерной модели распределения ОВ баженовской свиты мы выбрали аппроксимацию сплайнами, выраженными через функции Грина. Подробно теория этого метода изложена, в частности, В. А. Василенко [1]. Базисом для построения интерполирующего или сглаживающего сплайна являются точки трехмерного пространства, в которых заданы значения приближаемой переменной. Нами был использован трехмерный аналог кубического сплайна, для которого решение находится исходя из условия минимизации функционала энергетического типа, а именно: минимума потенциальной энергии упругой деформации однородного пространства.

Постановка задачи аппроксимации в трехмерном пространстве Ω , в котором определены координаты x_1, x_2, x_3 , формулируется следующим образом. На множестве хаотически расположенных точек p_1, p_2, \dots, p_n известны значения некоторой функции v_1, v_2, \dots, v_n ; следует построить приближение этой функции σ . Интерполирующий сплайн определяется как функция, удовлетворяющая двум условиям:

$$\begin{cases} \sigma(p_i) = v_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ I_m(\sigma) = \min. \end{cases}$$

Здесь $I_m(\sigma)$ – функционал энергетического типа с параметром m . В общем виде для многомерных сплайнов он определяется следующим образом:

ствующей в построении сплайна, вычислялось отклонение результатов аппроксимации от известных в ней значений концентраций $C_{орг}$. Последовательно проделав это для каждой скважины проекта при некотором заданном коэффициенте Scale, мы вычисляли среднеквадратическое значение погрешности аппроксимации. Полученные результаты показаны на рис. 2. Минимальная погрешность аппроксимации получена при Scale = 500. Это значение и было выбрано для построения трехмерных моделей распределения ОВ.



Рис. 2. График среднеквадратической погрешности аппроксимации концентраций $C_{орг}$ в зависимости от масштабного коэффициента пересчета стратиграфической переменной

Отметим, что структурные карты кровли и подошвы баженовской свиты, построенные по данным бурения, позволяют без труда представлять результаты моделирования как в координатах, связанных со стратиграфической позицией точек, так и в евклидовых координатах, связанных с глубинами. Далее результаты приведены в обоих представлениях.

Обсуждение результатов

Трехмерная сплайн-аппроксимация позволила вычислить куб распределения ОВ для баженовской свиты. Строки и столбцы этого куба (ин-лайн и кросс-лайн) соответствуют горизонтальным и вертикальным линиям на карте, а слои – пропорциональным срезам пород баженовской свиты между ее кровлей и подошвой. Расстояние между соседними ячейками вычисленного куба составило 1 км, было сделано 200 пропорциональных сечений. Полученный куб содержаний может быть изображен с помощью различных графических инструментов программы Voxler 3 от Golden Software. Также были созданы модели по заданным сечениям в евклидовом пространстве.

Сечения куба баженовских отложений в плоскостях с разными значениями x_3 представлены на рис. 3. На срезе $x_3 = 0,1$ (на рис. 3 не приведен) в приподошвенной части свиты концентрация $C_{орг}$ на всей территории исследования не превышает

4–5 %. Для среза $x_3 = 0,3$ (см. рис. 3, а) высокие значения (более 14 %) содержаний $C_{орг}$ имеются только на юго-восточной границе области в районе Перилской и Северо-Кальчинской площадей. Эти значения отмечаются у границы области и могут быть объяснены краевым эффектом интерполяции. Для остальной территории характерны содержания 3–10 %. К центральному интервалу свиты ($x_3 = 0,5$, см. рис. 3, б) концентрации $C_{орг}$ заметно (до 10 %) возрастают на востоке и юго-востоке в районе Перилской, Северо-Кальчинской, Салымской и Ендырской площадей. В средней части разреза они достигают 14–16 % на востоке, юго-западе и севере (Салымская, Верхнетюмская и Западно-Ташинская площади). Концентрации $C_{орг}$ повсеместно находятся в пределах 7–11 %, и лишь в районе Северо-Вайской, Зимней, Ташинской и Ханты-Мансийской площадей составляют 4–5 %. В интервале, смещенном к кровле свиты ($x_3 = 0,7$, см. рис. 3, в), происходит локализация повышенных концентраций $C_{орг}$ (до 12–15 %) полосой северо-западного направления с максимальным содержанием $C_{орг}$ до 16–18 % в районе Западно-Ташинской и Восточно-Янлотской площадей. В кровельной части свиты ($x_3 = 0,9$, см. рис. 3, г) концентрации $C_{орг}$ около 7–10 % отмечаются почти на всей территории исследования, за исключением районов Молодежной, Западно-Ташинской, Ташинской, Восточно-Камской, Камской и Куртымской площадей, где они составляют 2–5 %.

Детальный анализ полученного куба по вертикальным сечениям показал, что интервалы с повышенными концентрациями (более 10–15 %) выделяются в виде небольших (от 1–2 до 5–7 м) прослоев, при этом не отмечается закономерностей их прослеживания от скважины к скважине (рис. 4). Эти области высоких концентраций, ограниченные изоурвневой поверхностью $C_{орг} = 15 \%$, образуют мозаичную структуру с преобладанием в средней части разреза свиты.

На рис. 5 модель представлена уже в евклидовом пространстве. Здесь в вертикальных сечениях области моделирования на фоне общего регионального подъема кровли юры отмечается изменение рельефа баженовской свиты с выделением локальных возвышений (Северо-Кальчинская, Западно-Ташинская, Зимняя, Горелая площади).

На представленных сечениях 3D модели видно, что наиболее высокие содержания $C_{орг}$ (12–18 %) характерны для пачки в средней части разреза. В наиболее южной части (верхний срез на рис. 5) в относительно погруженной области свиты отмечаются два уровня с повышенным содержанием $C_{орг}$.

Пример изменения содержаний $C_{орг}$ в горизонтальных сечениях показан на рис. 6. Здесь видно, что картина распределения содержаний ОВ определяется их вертикальной изменчивостью (от наиболее низких значений у подошвы к максимальным

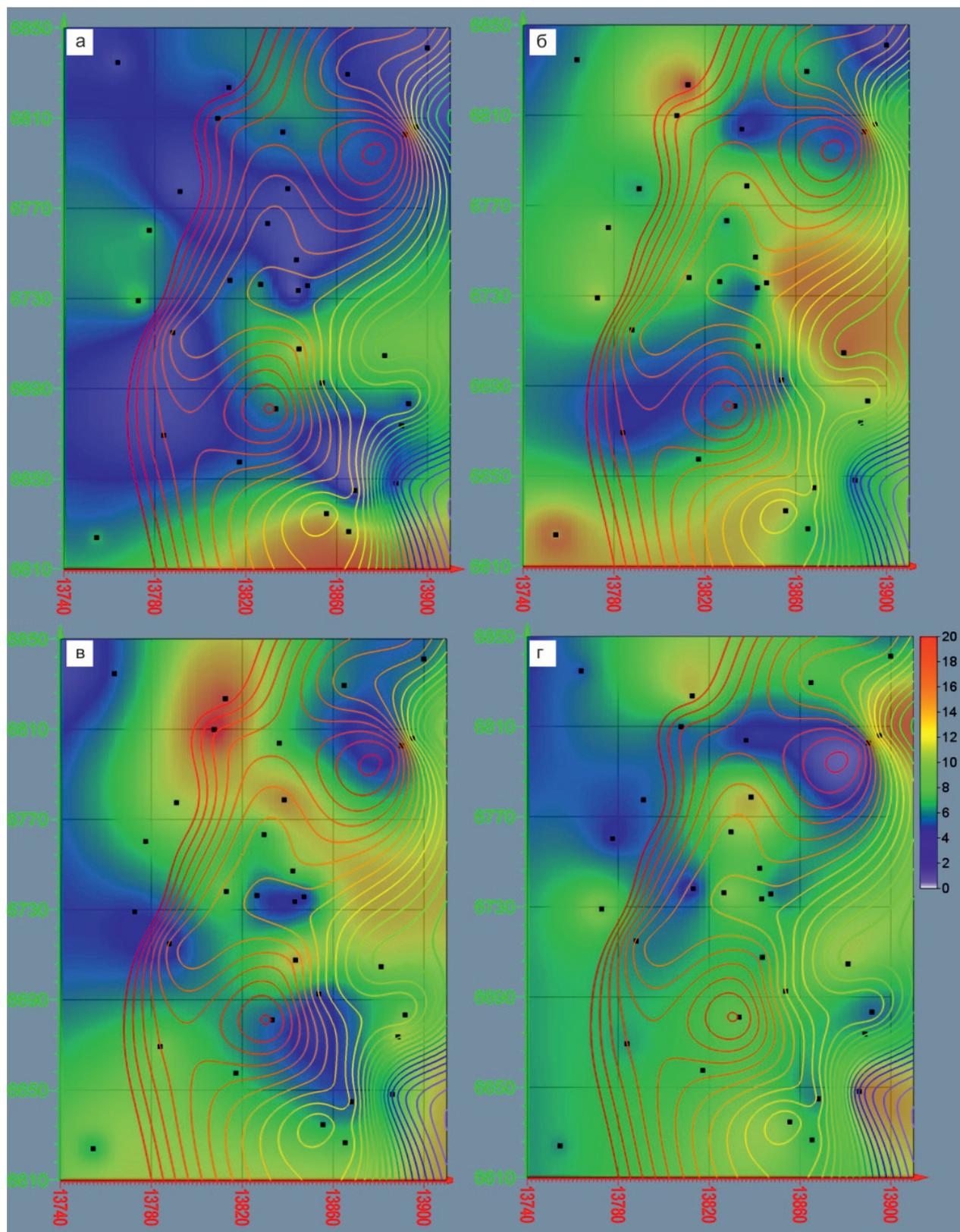


Рис. 3. Процентные содержания $C_{\text{орг}}$ баженовской свиты по пропорциональным срезам между кровлей и подошвой: а – $x_3 = 0,3$, б – $x_3 = 0,5$, в – $x_3 = 0,7$, г – $x_3 = 0,9$ (изолиниями показаны глубины залегания подошвы баженовской свиты)

в центральных частях) во взаимодействии с рельефом границ баженовской свиты.

Выводы

Использование примененного метода интерполяции сплайнами, выраженных через функции

Грина, позволило создать 3D модель распределения $C_{\text{орг}}$ в баженовской свите в зоне сочленения Мансийской синеклизы и Красноленинской мегамоноклизы. Подтверждено (это ранее отмечалось и другими авторами), что ОВ в породах свиты распределено неравномерно как по площади, так и в разрезе.

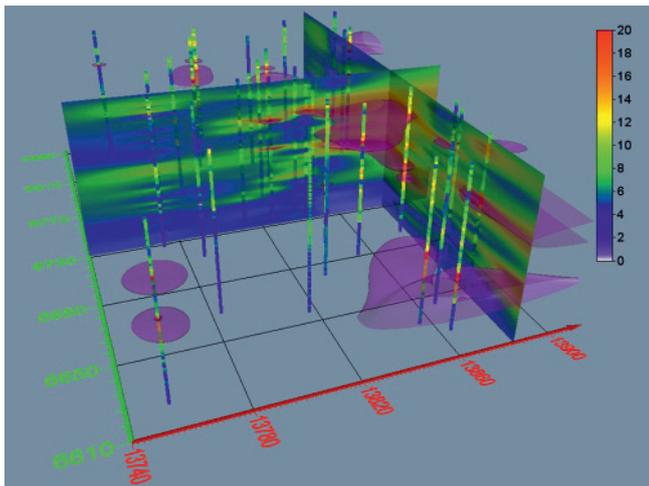


Рис. 4. Вертикальные сечения куба процентных содержания $C_{орг}$ баженовской свиты (сиреневые полупрозрачные области ограничены изоурвневой поверхностью $C_{орг} = 15\%$)

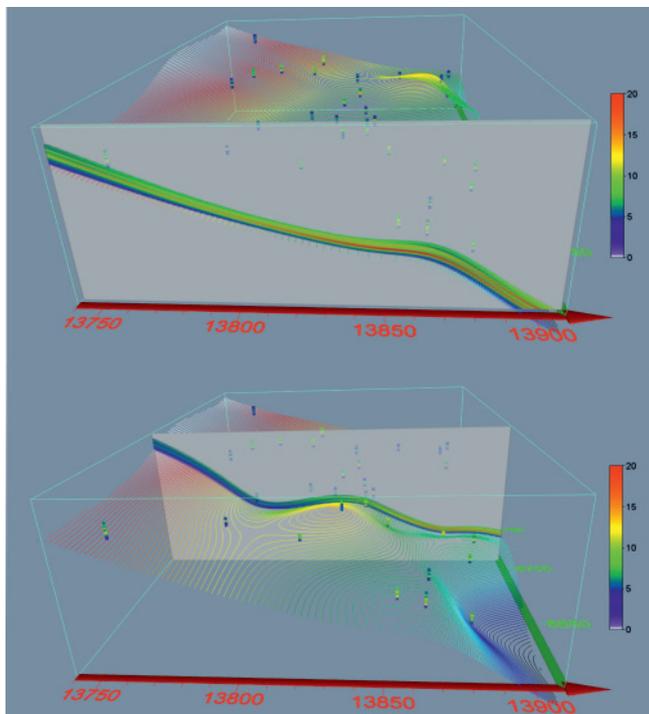


Рис. 5. Распределение $C_{орг}$ в сечении по двум меридиональным направлениям со значением x_1 от 0 до 135 км (изолиниями изображен рельеф подошвы баженовской свиты)

Наиболее богатые по содержанию $C_{орг}$ породы находятся в средней и верхней частях разреза, где средние значения более 8 %. Эти породы развиты в пределах всей территории исследования, за исключением районов, где $C_{орг}$ снижается до 4–6 % (Молодежная, Камская, Ташинская и Фроловская площади в пределах верхнего интервала свиты; Молодежная, Заозерная, Лисорская, Кондинская, Зимняя, Иртышская, Западно-Танягская, Северо-Вайская, Фроловская, Горелая, Ханты-Мансийская – в пределах среднего интервала).

Отложения с максимальными концентрациями $C_{орг}$ более 12 % приурочены к среднему интервалу свиты и развиты полосой с юго-запада (Верхнетюмская площадь) на восток (Перилская, Салымская),

и далее на северо-запад (Турмеевская, Восточно-Янлотская, Западно-Ташинская). На отдельных площадях концентрации достигают 14–25 %.

В нижнем интервале свиты $C_{орг}$ повсеместно снижается до 5–6 %, за исключением юго-восточных (Перилская, Северо-Кальчинская) и центральных (Иртышская) площадей, где в отдельных слоях концентрации достигают 8–12 %. По направлению к подошве баженовских отложений отмечается дальнейшее снижение концентраций $C_{орг}$ (до 2–5 %).

Полученные результаты исследования – трехмерная модель распределения концентраций $C_{орг}$ в интервале баженовской свиты – могут быть использованы при оценке ресурсов и выборе методики прогноза, поиска и разведки скоплений нефти на территории исследования, а примененный метод построения трехмерной модели распределения $C_{орг}$ – в бассейновом моделировании для выявления закономерностей распределения ОВ в породах на всей территории распространения баженовской свиты.

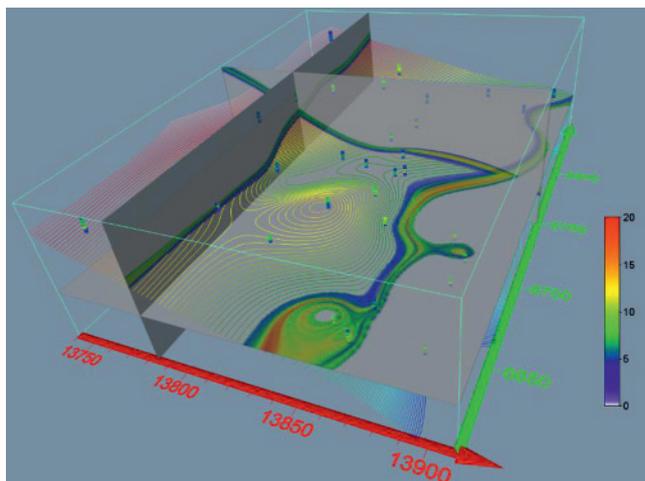


Рис. 6. Содержание $C_{орг}$ в горизонтальном и вертикальном сечениях модели (изолиниями изображен рельеф подошвы баженовской свиты)

Тема исследования соответствует госзадачу ИНГГ СО РАН (проекты FWZZ-2022-0007, FWZZ-2022-0009) государственной программы ФНИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Василенко В. А.** Слайны: теория, алгоритмы, программы. – Новосибирск: Наука, 1983. – 214 с.
2. **Дюбрул О.** Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных. – EAGE, 2002. – 296 с. – URL: <https://bookree.org/reader?file=486943 pg=13>.
3. **Классификация пород баженовской свиты** / А. Э. Контарович, П. А. Ян, А. Г. Замирайлова и др. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 11. – С. 2034–2043.
4. **Маргинальный фильтр волжско-раннеберриасского Западно-Сибирского морского бассейна и его влияние на распределение осадков** / А. Э. Кон-



торович, Л. М. Бурштейн, Б. Л. Никитенко и др. // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 3. – С. 199–210.

5. **Палеобиофации** нефтегазоносных волжских и неокотских отложений Западно-Сибирской плиты / С. П. Булынникова, А. В. Гольберт, И. Г. Климова и др. – М.: Недра, 1978. – 86 с. – (Тр. СНИИГГиМС; вып. 248).

6. **Пономарева Е. В.** Геохимия органического углерода в баженовском горизонте Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна: автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2021. – 21 с.

7. **Пористость** и нефтенасыщенность пород баженовской свиты / А. Э. Конторович, С. В. Родякин,

Л. М. Бурштейн и др. // Геология нефти и газа. – 2018. – № 5 – С. 61–73.

8. **Распределение** органического вещества в породах баженовского горизонта / А. Э. Конторович, Е. В. Пономарева, Л. М. Бурштейн и др. // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 3. – С. 357–371.

9. **Тектоническое** строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое / В. А. Конторович, С. Ю. Беляев, А. Э. Конторович и др. // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11–12. – С. 1832–1845.

3. **Условия** формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты / Ф. Г. Гурари, Э. Я. Вайц, В. Н. Меленевский и др. – М.: Недра, 1988. – 199 с.

© В. В. Лапковский, Е. В. Пономарева, 2022