

Трехмерное моделирование солянокупольных структур по данным детального бурения в Прикаспии

В.В. Лапковский¹, Б.В. Лунёв¹, М.П. Антипов², Ю.А. Волож², Ю.А. Писаренко³, В.В. Фомина^{2*}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

³Ниже-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, Саратов, Россия

Для создания трехмерных моделей солянокупольных структур на основе данных детального бурения без привлечения генетических соображений и косвенной информации эффективным является метод потенциальных полей, заключающийся в нахождении по координатам точек пластопересечения аппроксимирующей трехмерной функции, изоразности поверхности которой отождествляются со стратиграфическими границами. Для аппроксимации преимущественно применялись трехмерные сплайны, выраженные через функции Грина. Основные трудности связаны с наличием структурных несогласий, для учета которых исходные данные и построенные на их основе модели подвергаются специальным пространственным трансформациям. Чтобы избежать влияния высокоамплитудных соляных куполов на представление геометрии слоев подсолевого комплекса, моделирование последнего выполнялось отдельно от интенсивно деформированных эвапоритов и вышележащих слоев. Апробация метода проведена на одном из участков в Прикаспии. По данным интерпретации каротажа 249 скважин для исследуемой территории построена трехмерная модель, включающая несколько солянокупольных структур и охватывающая стратиграфический интервал от эмского яруса нижнего девона до четвертичных отложений. Полученные результаты подтвердили наличие куполов с опрокинутыми залегающими слоями. Подобные структурные формы плохо фиксируются методами 2D- и 3D-сейсморазведки. Предложенный метод может быть применен в геологических исследованиях при поисках и разведке углеводородов в солянокупольных областях.

Ключевые слова: соляные диапиры, трехмерное численное моделирование, трехмерные сплайны, нефтегазоносность, Прикаспий, Астраханский свод, метод потенциальных полей

Для цитирования: Лапковский В.В., Лунёв Б.В., Антипов М.П., Волож Ю.А., Писаренко Ю.А., Фомина В.В. (2023). Трехмерное моделирование солянокупольных структур по данным детального бурения в Прикаспии. *Георесурсы*, 25(4), с. 192–202. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.18>

Введение

Пространственные модели играют большую роль в геологии. К таким моделям относятся плоские отображения – различного рода карты и разрезы, которые господствовали в доцифровую эру. Как правило, в таком формате обобщались различные наблюдения и измерения, сделанные в отдельных точках, по профилям или в скважинах. С появлением цифровых технологий общепринятым стало создание карт и разрезов с помощью вычислительных методов. Широкое распространение получило трехмерное представление геологических объектов. Этому способствовало распространение 3D-систем регистрации данных (прежде всего в сейсморазведке) и быстро растущие возможности вычислительной техники и программных средств. Трехмерное представление среды имеет существенные преимущества перед моделями меньшей размерности, поскольку в статической геологии среда трехмерна. Кроме того, такие модели обладают внутренней согласованностью. Набор карт, или разрезов, характеризующих некую область, может иметь внутренние

противоречия (пересечения стратиграфических границ для разных карт или рассогласование положения тел на пересекающихся разрезах и т.п.). Многие современные средства исследования нефтегазоносных систем, например бассейновое моделирование, требуют предварительного построения трехмерной структурно-вещественной модели изучаемого объекта.

Создание трехмерных моделей часто базируется на двумерных построениях. Трехмерный структурно-вещественный каркас осадочных бассейнов обычно конструируется на основе двумерных представлений геологических границ. Эти представления определяют формы тел и их вещественное заполнение (стратиграфически привязанные свойства осадочных комплексов). В пакетах прикладных программ имеются специализированные инструменты такого конструирования для визуализации в трехмерном пространстве, которые прекрасно работают при построении моделей большинства осадочных бассейнов. Однако бывают случаи, когда создание трехмерных сеточных моделей вызывает серьезные затруднения, в частности, большие трудности возникают при моделировании областей развития солянокупольной тектоники. Главная проблема состоит в том, что двумерные образы не позволяют корректно представлять поверхности слоев с опрокинутыми залегающими и карнизами, когда одной точке на горизонтальной поверхности соответствует

* Ответственный автор: Валерия Владимировна Фомина
e-mail: valery.fomina17@gmail.com

© 2023 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

несколько точек на кровле или подошве слоя. Другая сложность заключается в существенных изменениях толщин осадочных тел. В областях развития солевого диапиризма встречаются значительные раздувы эвапоритовых толщ в куполах и резкое уменьшение их толщин в межкупольных мульдах. Перекрывающие слои также подвергнуты сильным изменениям мощностей, когда существенное сокращение толщин слоев над куполами сопровождается их увеличением в мульдах. Это затрудняет построение структурных моделей одних геологических границ на основе хорошо изученных других через использование карт мощностей (метод схождения), поскольку мощности оказываются столь же изменчивыми, сколь и гипсометрическое положение границ слоев.

В настоящее время для областей с интенсивно деформированными структурами развит подход, который получил название метода потенциальных, или фолиантных, полей (Chilès et al., 2014; Thornton et al., 2018; Stolz et al., 2019). Его суть заключается в том, что каждой геологической поверхности ставится в соответствие некоторое фиксированное значение трехмерного поля. Тогда результаты измерений можно представить в качестве заданных точечных значений трехмерной функции (и ее производных при использовании углов наклонов, в этом случае поверхности слоев рассматриваются как эквипотенциальные). Далее с помощью аппроксимации определяется вид этой трехмерной функции во всей области, а границы геологических тел – как изоуровневые поверхности этой трехмерной функции. Этот подход успешно применяется для представления структуры интенсивно смятых областей с развитыми опрокинутыми складками и шарьяжами – в трехмерном представлении в таких ситуациях не возникает проблемы неоднозначности границ. Кроме того, существенным достоинством метода является то, что данные всех границ совместно учитываются при создании модели, что обеспечивает ее

обоснованность даже для тех геологических поверхностей, которые заданы относительно небольшим числом прямых измерений.

В настоящей работе показана возможность применения метода потенциальных полей для моделирования толщ сложной солянокупольной тектоники. Фактической основой работы послужили данные детального бурения одного из участков недр на Астраханском своде в Прикаспии (рис. 1). Здесь на небольшой площади, около 300 км², пробурено почти 250 скважин, из которых более 200 проникают под подошву эвапоритовой формации. Этот уникальный массив данных позволяет на основе только результатов бурения построить качественную трехмерную модель строения осадочного комплекса.

Методика и результаты моделирования

Один из способов явно определить поверхность в трехмерном пространстве с измерениями x , y и z состоит в выражении одной из переменных, например z , через остальные:

$$z = f(x, y).$$

С помощью таких двумерных функций обычно описываются границы осадочных тел при моделировании в нефтегазовой геологии.

Другой способ определить поверхности – задать уравнение вида $f(x, y, z) = c$. Задание такой функции и набор констант $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ определяют k изоуровневых поверхностей в пространстве. В используемом методе с набором таких констант ассоциируются различные стратиграфические границы. Значения констант должны монотонно возрастать или убывать, например, более древним стратиграфическим границам присваиваются большие значения. Функцию $f(x, y, z)$ можно называть стратиграфической – ее значения на стратиграфических границах соответствуют заданному набору констант, а значения

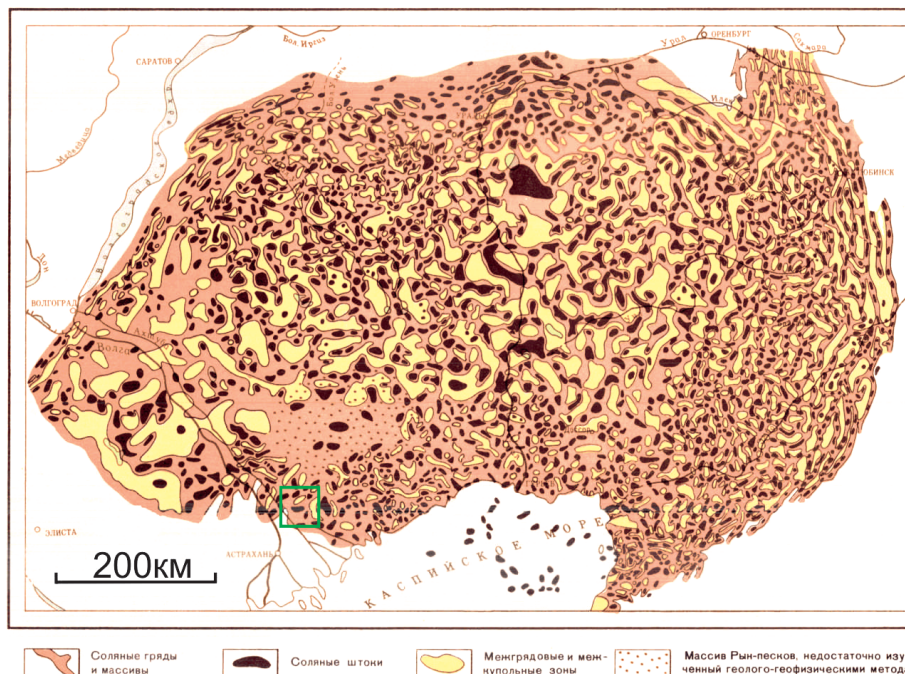


Рис. 1. Схема строения поверхности кунгурских соленосных отложений Прикаспийской впадины (Структурная карта..., 1980). Зеленой рамкой на юго-западной окраине бассейна выделен участок, для которого проведено моделирование

в произвольных точках характеризуют положение этих точек относительно стратиграфических границ.

Фактическим материалом для настоящей статьи послужили данные бурения 249 скважин на одном из участков Астраханского свода в Прикаспии. В этих скважинах сотрудниками Нижне-Волжского научно-исследовательского института геологии и геофизики (г. Саратов) по результатам интерпретации каротажа установлены границы стратиграфических тел в диапазоне от эмского яруса нижнего девона до современных осадков. Определены 24 стратона. На кровле каждого из них задавались значения стратиграфической функции (как именно они определялись, поясним ниже). Сводная характеристика этих стратонов приведена в табл. 1.

На рис. 2 показано расположение скважин в изучаемой области с их разделением по глубине вскрытия осадочного комплекса. Для характеристики структурного положения скважин приведена генерализованная структурная карта кровли эвапоритовой формации.

На всех рисунках с координатными осями горизонтальные и вертикальные размеры приведены в метрах.

Всего в скважинах было установлено почти 3000 пластопересечений в надсолевых, солевых и подсолевых толщах. Стоит отметить, что кровля эвапоритовых отложений (кровля иренского горизонта в кунгурском ярусе нижней перми (табл. 1)) в отдельных скважинах встречалась до трех раз, что свидетельствует о ее опрокинута залегании. Таким образом, в качестве исходных данных использовалась таблица, содержащая почти 3000 строк.

Для каждой строки были заданы три пространственные координаты точки пластопересечения (x_i, y_i, z_i) и значение стратиграфической функции v_i (приведены в табл. 1). Далее на основе методов трехмерной аппроксимации по этим данным получена функция $f(x, y, z)$.

Для достижения целей моделирования могут быть использованы различные аппроксимирующие функции. В настоящем исследовании сравнивались результаты двух методов: трехмерного кригинга (Дюблур, 2003; Демьянов, Савельева, 2010) и сплайнов, выраженных через функции Грина (Василенко, 1983; Роженко, 2005). Оба инструмента широко применяются при пространственном моделировании в геологии. В двумерной постановке распространено построение различных карт на основе этих методов. В трехмерной постановке эти методы используются реже, хотя они и привлекаются для представления распределения свойств в геологической среде.

Сложностью применения кригинга является обоснованный выбор типа и параметров вариограмм. Численные эксперименты показали, что сферические вариограммы позволили в кригинге создавать модели, близкие к тем, что были получены на основе сплайнов. Отметим, что сплайны, в отличие от кригинга, имеют ясную физическую природу (минимизация потенциальной энергии упругого изгиба), кроме того, сплайны вычисляются ощутимо быстрее, поэтому мы остановились на этом аппарате. Модели, рассмотренные далее, построены с помощью сплайн-аппроксимации.

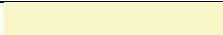



















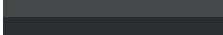



Номер	Стратон	Краткое обозначение	Значения потенциала на кровле	Цвет на разрезах и 3D-изображениях
1	Антропоген	Q	Меньше 0	
2	Неоген	N2A	0	
3	Палеоген	P	559,316	
4	Верхний мел	K2	1377,39	
5	Нижний мел	K1	1626,92	
6	Верхняя юра	J3	1979,78	
7	Средняя юра	J2	2055,68	
8	Верхняя пермь – триас	P2+T	2323,32	
9	Нижняя пермь, кунгурский ярус, иренский горизонт	P1k_ir	4334,05	
10	Нижняя пермь, кунгурский ярус, верхняя часть филипповского горизонта	P1k_f	6061,36	
11	Нижняя пермь, кунгурский ярус, филипповский горизонт, пласт R2	P1k_f_R2	6074,62	
12	Нижняя пермь, кунгурский ярус, филипповский горизонт, пласт R1	P1k_f_R1	6092,2	
13	Нижняя пермь, сакмарский и артинский ярусы	P1s-ar	6108,08	
14	Карбон, башкирский ярус, прикамский горизонт	C2b1_pk	6184,26	
15	Карбон, башкирский ярус, северокельтменский горизонт	C2b1_sk	6246,79	
16	Карбон, башкирский ярус, краснополянский горизонт	C2b1_kp	6299,47	
17	Карбон, серпуховский ярус	C1s	6414,23	
18	Карбон, визейский ярус	C1v	6510,63	
19	Карбон, турнейский ярус	C1t	7067,63	
20	Девон, фаменский ярус	D3_fm	7285,63	
21	Девон, франский ярус	D3_f	7811,63	
22	Девон, живетский ярус	D2_g	8364,13	
23	Девон, эйфельский ярус	D2_ef	8612,13	
24	Девон, эмский ярус	D1_e	8814,13	

Табл. 1. Стратиграфические подразделения и присвоенные их кровлям значения потенциала

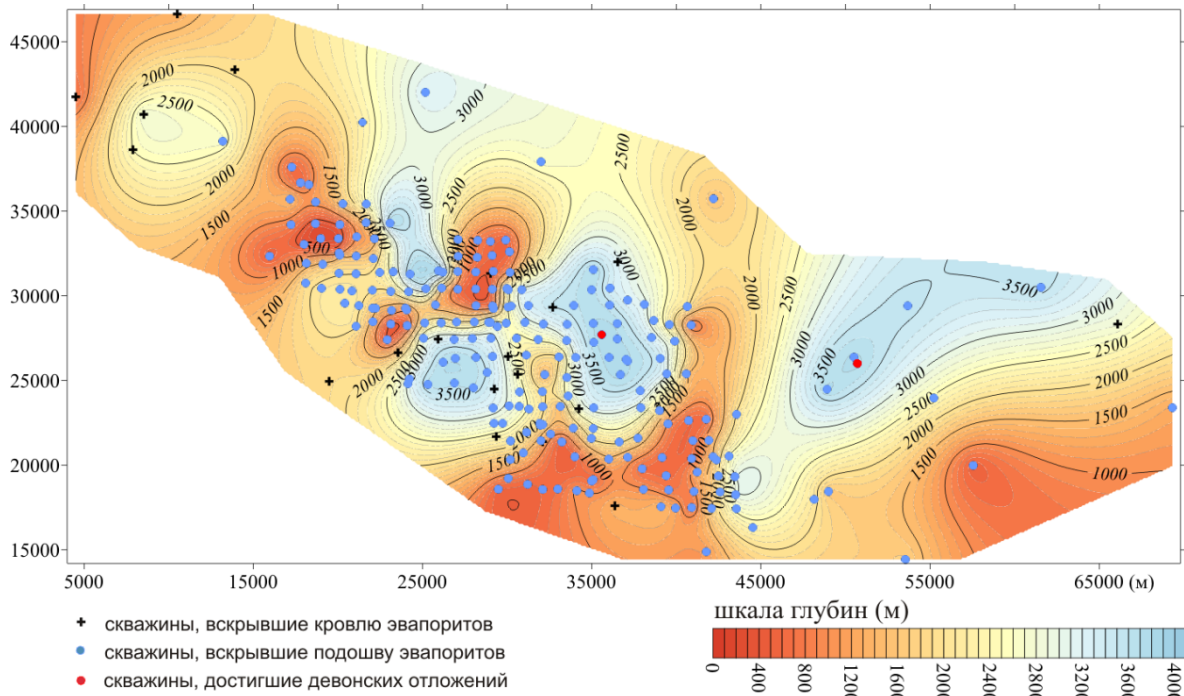


Рис. 2. Области моделирования с генерализованной структурной картой кровли эвапоритов и скважинами, разделенными по интервалу проникновения в осадочный комплекс

Базисом для построения интерполирующего или сглаживающего трехмерного сплайна, выраженного через функции Грина, являются точки трехмерного пространства, в которых заданы значения приближаемой переменной. В ходе работы был использован трехмерный аналог одномерного кубического сплайна (псевдокубический сплайн), который определяется из условия минимизации функционала энергетического типа.

Постановка задачи аппроксимации в трехмерной области Ω , в которой определены координаты x, y, z , 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 удовлетворяет двум условиям:

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

где $I_m(\sigma)$ – функционал энергетического типа с параметром m , и в общем виде он определяется следующим образом:

$$I_m(\sigma) = \sum_{|\alpha|=m} \int_{\Omega} \frac{m!}{\alpha!} (D^\alpha \sigma)^2 d\Omega = \min$$

где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ – тройка неотрицательных целых чисел (мультииндекс),

$$|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3,$$

$$\alpha! = \alpha_1! \alpha_2! \alpha_3!,$$

$$D^\alpha \sigma = \frac{d^{|\alpha|} \sigma}{d^{\alpha_1 x} d^{\alpha_2 y} d^{\alpha_3 z}} - \text{оператор дифференцирования.}$$

Минимизируемый функционал с параметром $m = 2$ (случай псевдокубического сплайна) имеет вид:

$$I_2(\sigma) = \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial xy} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial xz} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial yz} \right)^2 \right] d\Omega.$$

При построении сглаживающего сплайна решается задача минимизации выражения:

$$\alpha \cdot I_2(\sigma) + \sum [\sigma(p_i) - v_i]^2$$

где α – параметр сглаживания. Теоретически α может изменяться от 0 до ∞ . Если $\alpha = 0$, то это интерполирующий сплайн, при $\alpha \rightarrow \infty$ решением является линейная функция (многочлен первого порядка).

Стоит отметить, что из-за необходимости обращать плохо обусловленные матрицы большого размера, существуют числовые ограничения на допустимые значения α . Поскольку целью настоящей работы является максимальное приближение модели к исходным данным, в работе использовались режимы, приближенные к интерполяционным.

Далее остановимся на нахождении необходимых 23 констант, которые приведены в табл. 1. Если стремиться к тому, чтобы аппроксимирующая функция была по возможности линейной по направлению z (линейность обеспечивает меньшие погрешности аппроксимации), то есть стремиться к тому, чтобы $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$ имела бы близкие значения для всего диапазона глубин, то следует положить:

$$c_i = c_{i-1} + \text{средняя толщина тела } (i, i-1).$$

Следовательно, самой верхней границе – кровле неогена (кровля антропогена, естественно, не фиксируется в наблюдениях) – присваивается значение 0, а остальные значения возрастают на величину средней толщины следующего слоя.

На рис. 3 приведен фрагмент моделируемой области, который отражает суть применяемого метода. На рисунке представлены три ортогональных разреза и поверхность, соответствующая кровле эвапоритового комплекса. Тела стратонов на разрезах закрашены соответственно цветами,

перечисленными табл. 1. Показаны три группы точек: красные – пластопересечения кровли пермь-триасовых отложений, зеленые – пластопересечения кровли эвапоритов, синие – кровли филипповского горизонта (нижний слабдеформированный горизонт эвапоритовой формации). Положение остальных пластопересечений на рисунок не вынесено, чтобы не перегружать его. По значениям стратиграфической функции, заданной на пластопересечениях, был построен трехмерный сплайн. Его изоурневая поверхность, соответствующая кровле эвапоритов, показана на рисунке поверхностью золотистого цвета. Особо отметим, что эта поверхность максимально простая и гладкая (что соответствует природе сплайна), при том что она строго проходит через все точки, в которых она задана в скважинах. На рис. 3 все пластопересечения (кровли пермь – триаса, эвапоритов и филипповского горизонта) обозначены одинаковыми элементами – кружочками. Зеленые кружочки оказались обрезанными, поскольку строго через них проходит полученная нами поверхность кунгурских эвапоритов.

Отметим установленные в ходе исследования сложности, характерные для всех областей солянокупольной тектоники.

1. Существование несогласий в осадочном разрезе. В северо-восточной части области моделирования имеются скважины, где под неогеновыми отложениями вскрываются эвапориты. В других местах эти толщи разделены осадками палеогена, мела, юры, а также перми и триаса. Сплайн представляет собой гладкую функцию, поэтому он не подходит для моделирования таких взаимоотношений осадочных толщ. Если данные скважин прямо аппроксимировать трехмерным сплайном, то результат окажется неудовлетворительным (рис. 4).

Сближение вплотную эвапоритов с неогеновыми слоями дает очень большие значения градиента стратиграфической функции и, как следствие этого, появляются «глаза» пород карбона и девона внутри соляного тела. Выходом из этой ситуации является прямой учет несогласий в модели. В рассматриваемом регионе их, по меньшей мере, два: существенный размыв осадков происходил в неогене и в течение нижней и частично средней юры (Антипов, Волож, 2012).

Для учета несогласий был применен способ, который описан в (Wellmann, Caumon, 2018). Принципиально его демонстрирует рис. 5. Исходная ситуация показана на рис. 5А, где разными символами показаны

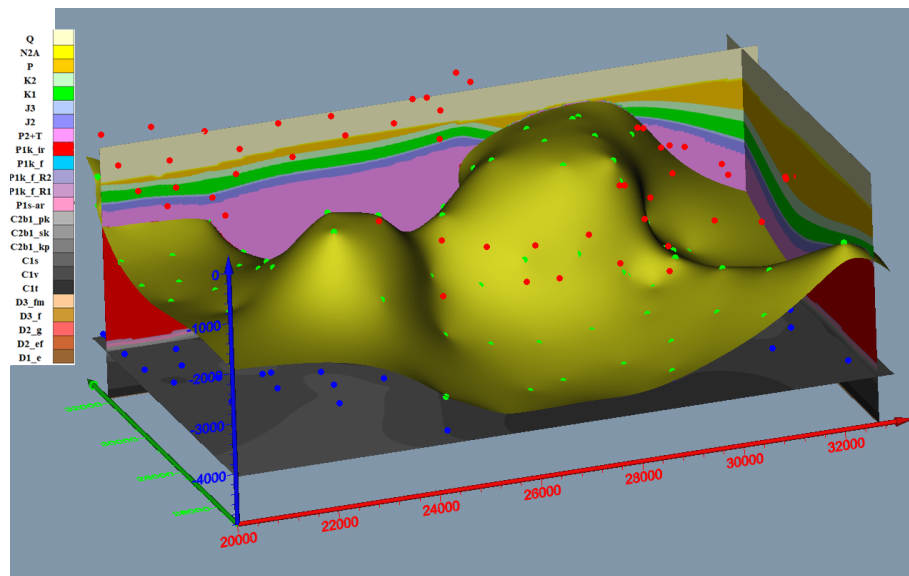


Рис. 3. Фрагмент области моделирования с разрезами, поверхностью соли и пластопересечениями трех разных стратиграфических уровней

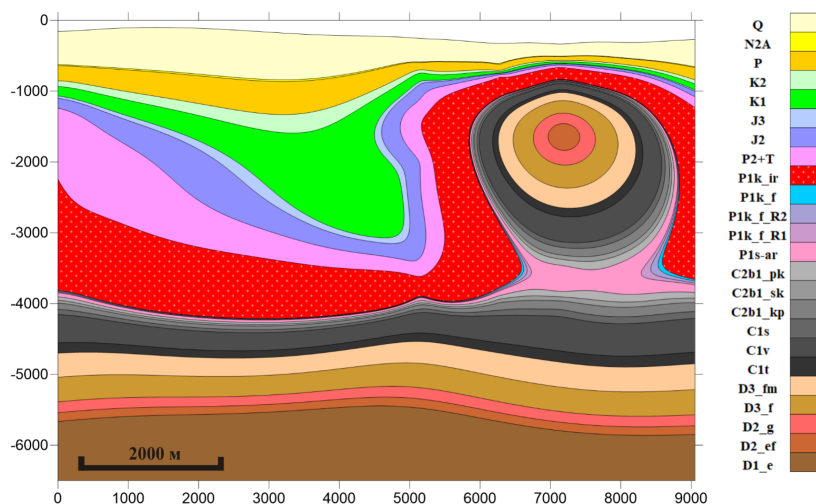


Рис. 4. Плохая модель, не учитывающая существование несогласий в разрезе

пластопересечения различных стратонов. Они образуют две группы, лежащие над несогласием (окружены красным эллипсом) и под ним (внутри синего эллипса). Эти группы были разделены и все пластопересечения над несогласием подняты на некоторую величину Un (в представленном примере это 1500 м). В точках пластопересечений заданы значения стратиграфической функции. От более молодых границ к более древним ее значения задавались величинами $\{0, 50, 200, 300, 400\}$, затем по этим данным путем интерполяции была построена непрерывная функция (рис. 5B). Далее поглощается часть пространства модели, т.е. сначала в модель вставляется область пространства размером 1500 м в вертикальном направлении, которая затем удаляется. При разных условиях склейки двух фрагментов получается либо классическое несогласие (рис. 5C), либо прилегание верхних слоев к более древним (рис. 5D). При этом, что важно, все пластопересечения остались на тех же местах, где они были до выполнения всех пространственных операций (их положения на рис. 5A, C и D совпадают), и что они строго соответствуют значениям стратиграфической функции – точно лежат на своих изолиниях.

Модель, показанная на рис. 5B, не соответствует реальности, это лишь промежуточный расчет. Какой из окончательных вариантов (рис. 5C или рис. 5D) является верным, зависит от того, каким образом нарушено согласие слоев. Если имеет место несогласие с частичным размывом осадков под его поверхностью, то верным является вариант, показанный на рис. 5C. Если же допускается прилегание более молодых отложений к древнему выступу, то правильный вариант на рис. 5D. На рис. 5 показаны возможность и способы учета двух основных видов несогласного залегания слоев в рамках непрерывной гладкой сплайновой модели.

Для исследуемого участка были заданы два несогласия – в неогене и на подошве средней юры, а также условие прилегания на кровле солей для всех отложений старше неогена.

2. При моделировании с учетом несогласий отмечается следующее. Границы девонских слоев значительно изгибаются вниз под соляным диапиром и вверх под мульдой, формируя высокоамплитудные складки, раздувы и сокращения мощности карбона (рис. 6). В данном случае это связано с особенностями гладкой трехмерной аппроксимации: очень большие изменения производной аппроксимирующей функции по z в разных частях моделируемой области, связанные с высокоамплитудными деформациями кровли эвапоритов, влияют на соседние, не охарактеризованные скважинами участки.

Чтобы заведомо исключить этот эффект, независимо строились две модели: одна для солевой и надсолевой частей разреза, а другая для подсолевой. Далее обе модели объединялись. Для этого пластопересечения одной слабдеформированной границы (кровля филипповского горизонта) учитывалась в каждой из этих моделей, затем по этой границе модели сшивались. Результат сшивания показан на рис. 7. Можно заметить, что геометрия слоев в нижней части разреза теперь слабо связана с конфигурацией границ верхней части разреза: раздувы и сокращения мощностей, обусловленные влиянием верхней части разреза, не наблюдаются, а поведение карбоновых и девонских слоев выглядит согласованным, при этом мощность солей существенно меняется по разрезу. В мульдах она исчезающе мала, что согласуется с результатами интерпретации скважинных данных, а иногда превышает 3500 м в диапирах.

Общий вид полученной трехмерной модели представлен на рис. 8.

Графическое представление трехмерной модели в виде отдельных разрезов было выполнено на основе вычислений на детальных 2D-сетках (размер ячейки порядка 10 м). Такие разрезы можно построить для любого сечения, но в настоящей статье приводятся только три таких разреза. Их положение в области моделирования показано на рис. 9, а сами разрезы – на рис. 10–12. Направление

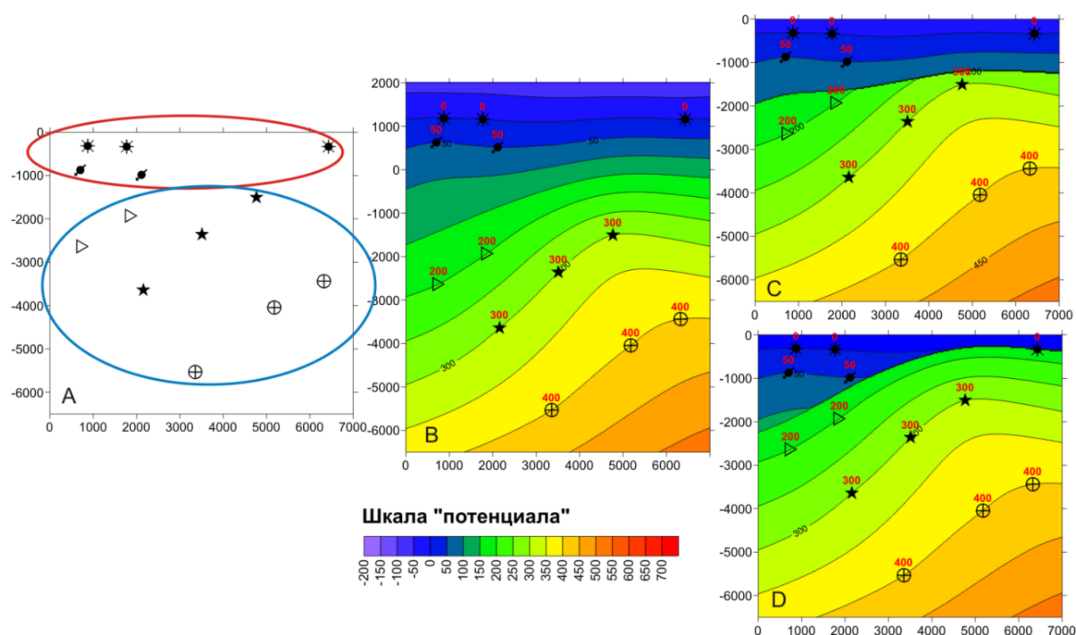


Рис. 5. Принципиальная схема моделирования несогласия: А – исходная ситуация; В – точки пластопересечений раздвинуты и построена гладкая функция, аппроксимирующая значение потенциала; С – удален вставленный объем пространства с согласованием частей модели как несогласие; D – согласование как прилегание

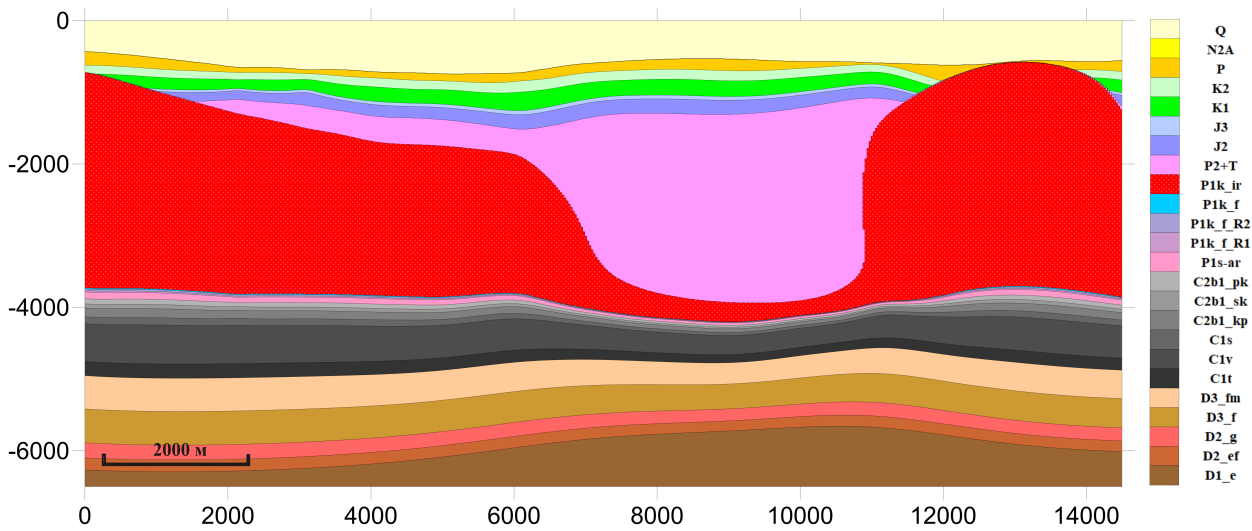


Рис. 6. Модель с учетом двух несогласий – в неогене и у подошвы средней юры

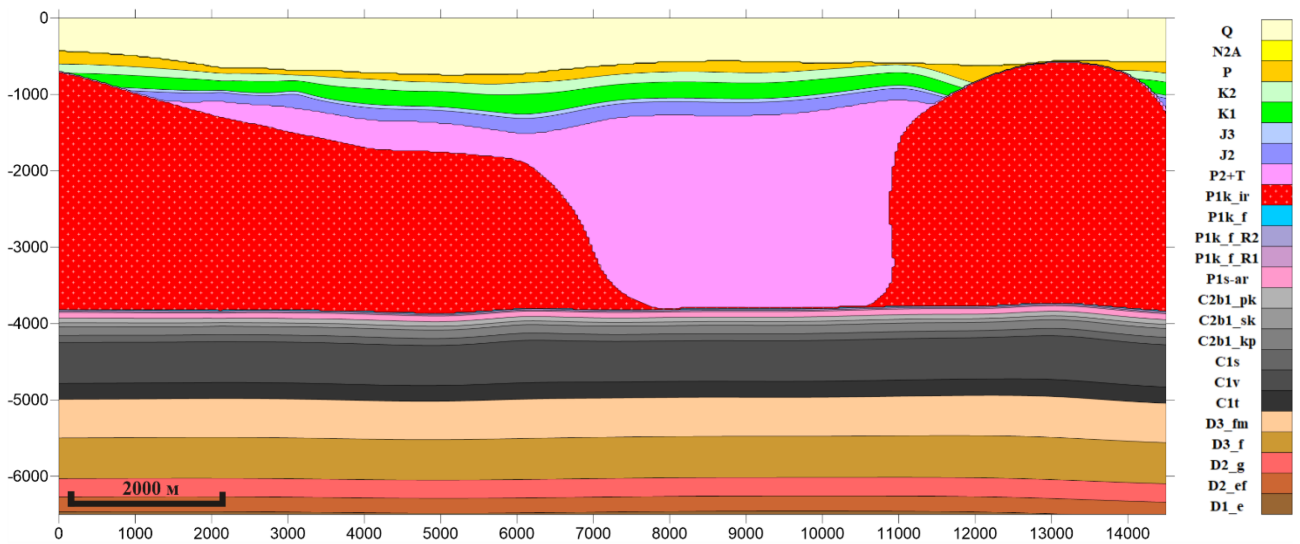


Рис. 7. Модель с двумя несогласиями и двумя отдельно моделируемыми областями: подсолевой комплекс и солевой с надсолевым

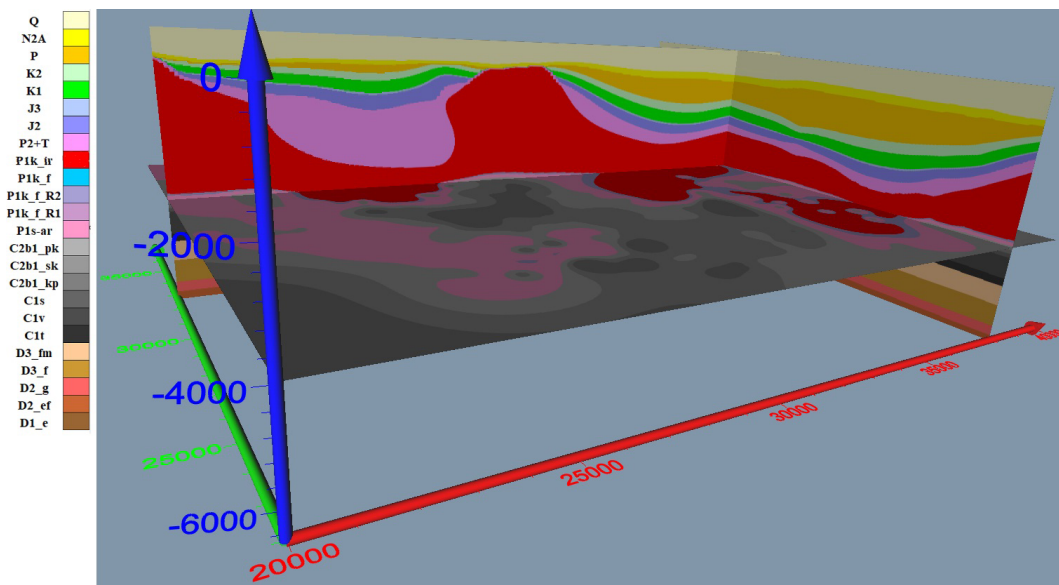


Рис. 8. Изображение трехмерной модели на срезах

разрезов А, В указано от меньших значений х-координаты (красная ось) к большим; разреза С – от меньших значений у-координаты (зеленая ось) к большим.

Обсуждение результатов и заключение

В настоящей работе был успешно адаптирован метод «фолиантных полей» к описанию структуры осадочного чехла с развитой соляной тектоникой и наличием двух выраженных несогласий. Основное преимущество такого подхода состоит в том, что вся толща осадков представляется в виде одной математической конструкции, что исключает возможность появления в моделях внутренних противоречий, которые иногда возникают при независимом построении отдельных структурных поверхностей: это пересечение поверхностей слоев в согласно залегающих толщах или несоответствие их положений на пересекающихся разрезах.

Высокая плотность бурения на исследуемом участке Астраханского свода и вскрытие большинством скважин

подсолевых слоев сделали уникальным полученный массив данных. Это позволило, опираясь только на надежные результаты бурения, построить качественную трехмерную модель строения осадочного комплекса. Приведенные выше примеры показывают, что применение метода трехмерной сплайн-аппроксимации с опорой исключительно на данные бурения позволяет автоматически получить адекватную цифровую 3D-модель с выраженными структурами соляной тектоники, в частности описать опрокинутое залегание кровли эвапоритов (рис. 7–12). Вопрос о существовании соляных карнизов пока остается открытым. Полученные нами ранее результаты трехмерного численного моделирования динамики формирования соляных диапиров с заданием достаточно сложной внутренней структуры эвапоритовой формации и учетом уплотнения осадков позволили сделать обоснованные предположения о наличии соляных карнизов, маскируемых верхней бессолевой частью эвапоритовой толщи (Лунёв и др., 2023). В настоящей работе мы использовали

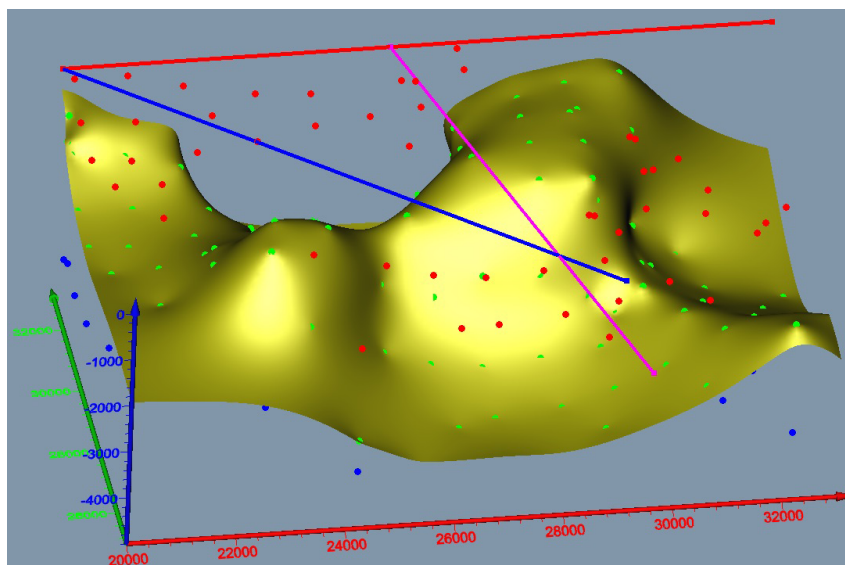


Рис. 9. Положение разрезов (красная, синяя, розовая линии, обозначаемые на рис. 10–12 соответственно буквами А, В, С), построенных на детальных 2D-сетках

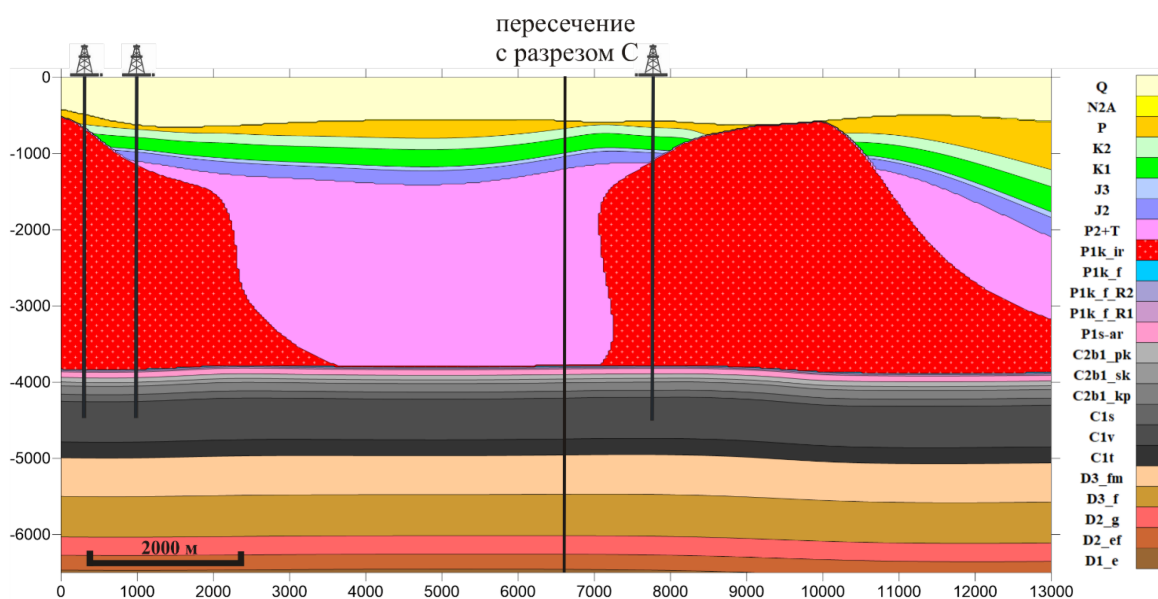


Рис. 10. Разрез по красной линии А

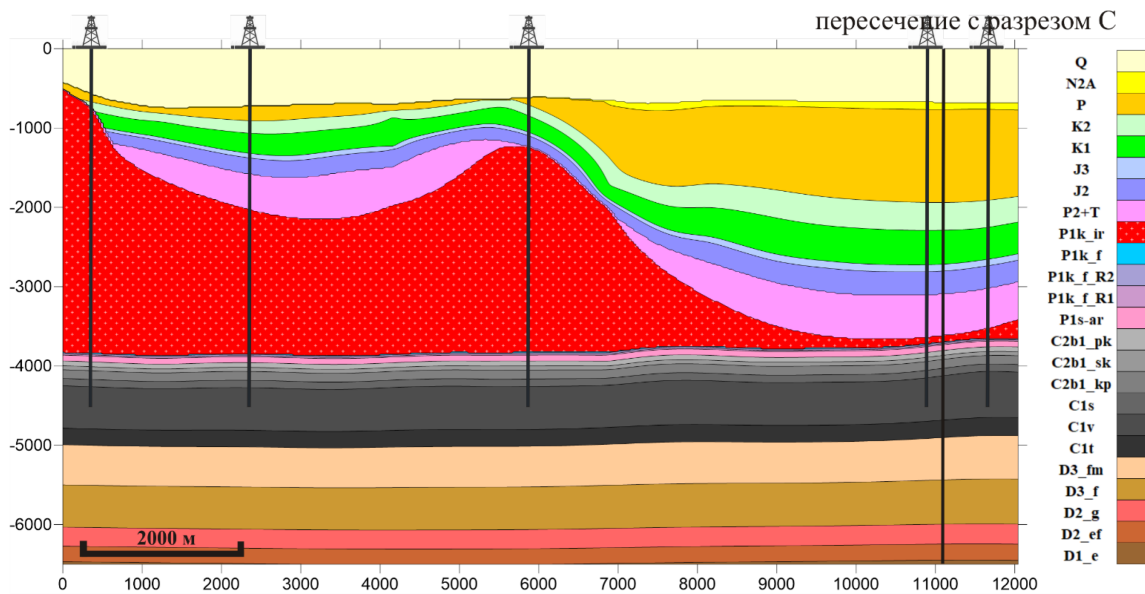


Рис. 11. Разрез по синей линии В

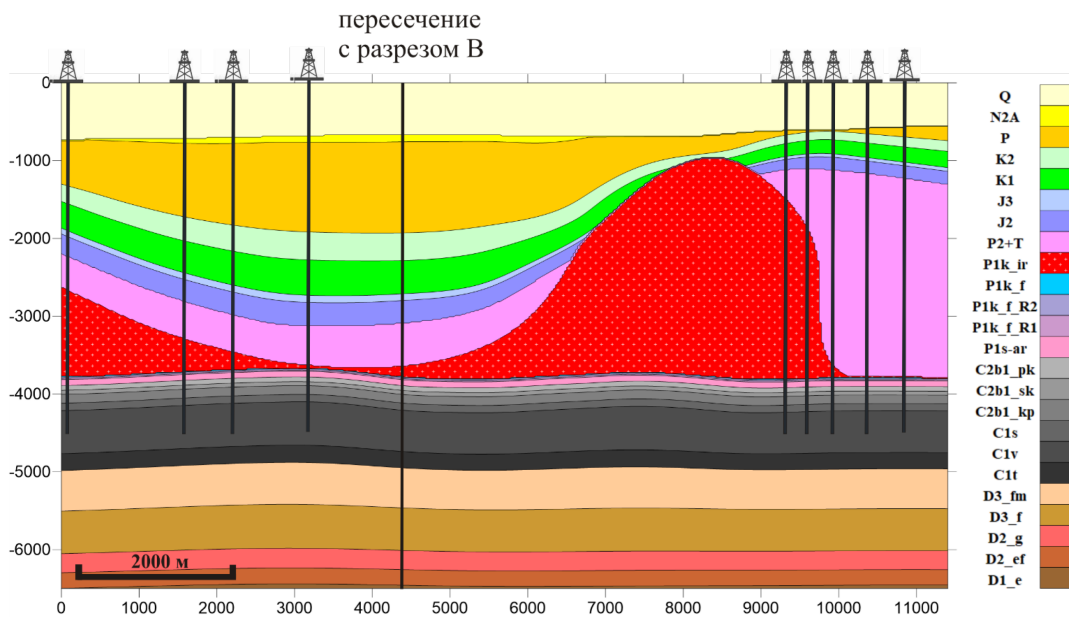


Рис. 12. Разрез по розовой линии С

только данные по кровле эвапоритов, поэтому на основе полученных результатов нельзя сделать выводы о наличии или отсутствии соляных карнизов внутри эвапоритовой формации.

Отметим также две особенности, выявленные при моделировании структуры осадочной толщи на исследованном участке.

1. Как видно из модели структуры (построенной исключительно на данных исследования скважин и полностью с ними согласующейся), в некоторых мульдах толщина региональной эвапоритовой покрывки (видимо, в связи с ростом куполов) уменьшается до нескольких метров. Толщина слоев соли имеет существенное значение для оценки перспектив нахождения залежей углеводородов как в нижележащих, так и в вышележащих толщах.

2. При анализе разрезов, представленных на рис. 10–12, можно заметить наличие низкоамплитудной, но все-таки достаточно выраженной складчатости подстилающих

эвапориты карбоновых и девонских слоев. Существенно, что эти складки имеют инверсионный характер по отношению к вышележащему разрезу: под межкупольными мульдами наблюдаются антиклинали, а под куполами эти границы слабо прогибаются. Эти структуры не являются артефактами, предпринятые специальные процедуры (раздельное моделирование верхней и нижней частей разреза с последующей сшивкой) исключают такую возможность. Поэтому картина, представленная на рис. 10–12, будучи основана только на данных бурения под эвапоритами, имеет объективный характер.

Вопрос о существовании инверсионной складчатости в подсолевом комплексе солянокупольных областей является дискуссионным. Одни исследователи (Тимурзиев, 2007; Чердабаев, 2010) доказывают ее существование с использованием данных сейсморазведки, другие полагают, что эти данные интерпретированы с не вполне корректными скоростными моделями среды. Результаты

настоящей работы свидетельствуют в пользу ее (инверсионной складчатости) существования. Отметим, что представленная модель структуры получена на основании исключительно данных бурения, без привлечения дополнительных геофизических данных и без использования генетических представлений. Механизм развития такой инверсионной складчатости в подсолевых комплексах теоретически описан нами ранее и подтвержден численными экспериментами по моделированию роста диапиров (Lunev, Lapkovsky, 2014).

Метод потенциальных полей (иногда называется методом фолиантных полей) относительно недавно стал широко использоваться зарубежными геологами (в основном в Австралии и Европе), в отечественной практике он не распространен. Основным достоинством метода является то, что структура осадочной толщи моделируется не послойно (пусть и с использованием представлений об их геометрическом подобии, которые позволяют использовать регрессионные модели или метод схождения), а целиком. Общая модель строится так, чтобы соответствовать данным о всей совокупности пластопересечений некоторого структурного этажа. Другим преимуществом данного подхода является возможность представлять геометрически сложные формы, такие как складки с опрокинутым залеганием слоев, диапиры, штоки сложной конфигурации, за счет того, что модель не отображает координатную плоскость на границу слоя в виде двумерной функции, а является трехмерной.

Предложенный метод может быть использован при геологических исследованиях, в том числе при поиске и разведке углеводородов, солянокупольных областей, таких как Прикаспий. Поскольку рассмотренная модель опирается только на надежные результаты бурения, она может применяться для верификации и регулирования параметров геофизических методов изучения недр – сейсморазведки, электро- и гравиразведки для снижения неопределенности их оценок.

Финансирование/Благодарности

Работы выполнены в рамках госзаданий ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0009) и ГИН РАН.

Авторы выражают признательность рецензентам за внимательную работу со статьей.

Литература

- Антипов М.П., Волож Ю.А. (2012). Особенности строения и нефтегазоносность надсолевого разреза прикаспийской впадины. *Нефть и газ*, (1), с. 47–71.
- Василенко В.А. (1983). Сплайны: теория, алгоритмы, программы. Новосибирск: Наука, 214 с.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. (2010). Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 327 с.
- Дюблур О. (2003). Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных. *EAGE*, 296 с.
- Лунёв Б.В., Лапковский В.В., Антипов М.П., Волож Ю.А., Постникова И.С. (2023). Влияние строения эвапоритовой формации на формирование структур соляной тектоники и ловушек углеводородов (по результатам численного моделирования галокинеза в Прикаспии). *Геодинамика и тектонофизика*, 14(2), 0690. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0690>

Роженко А.И. (2005). Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации. Новосибирск: ИВМиГ СО РАН, 243 с.

Структурная карта надсолевого комплекса Прикаспийской впадины: 1980 (1981). Масштаб 1:1 000 000. Ред. Л.Ф. Волчегурский, О.С. Турков, А.Е. Шлезингер. Л., 4 л.

Тимурзиев А.И. (2007). Особенности строения и механизм формирования соляных диапиров Астраханского свода (на примере Еленовской площади). *Геофизика*, (6), с. 16–29.

Чердабаев Ж.М. (2010). Структурно-тектоническое районирование подсолевых осадочных комплексов северо-восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины (по материалам сейсморазведки). *Геофизика*, (3), с. 30–34.

Chilès J.P., Aug C., Guillen A., Lees T. (2014). Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data – The Potential-Field Method. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 14, pp. 329–336.

Lunev B.V., Lapkovsky V.V. (2014). Mechanism of development of inversion folding in the subsalt. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(1), pp. 57–63. <https://doi.org/10.1134/S1069351314010066>

Stolz E., Spampinato G., Davidson J. (2019). A statewide 3D geological model for New South Wales. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1080/22020586.2019.12073222>

Thornton J., Mariethoz G., Brunner P. (2018). A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. *Scientific Data*, 5, 180238. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.238>

Wellmann F., Caumon G. (2018). 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. Cedric Schmelzbach. *Advances in Geophysics*, 59, pp. 1–121. <https://doi.org/10.1016/bs.agph.2018.09.001>

Сведения об авторах

Владимир Валентинович Лапковский – доктор геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией математического моделирования природных нефтегазовых систем, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, д. 3

Борис Валентинович Лунёв – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, д. 3

Михаил Петрович Антипов – кандидат геол.-минерал. наук, и.о. ведущего научного сотрудника, Геологический институт РАН Россия, 119017, Москва, Пыжёвский переулок, д. 7

Юрий Абрамович Волож – доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, Геологический институт РАН Россия, 119017, Москва, Пыжёвский переулок, д. 7

Юрий Алексеевич Писаренко – доктор геол.-минерал. наук, заведующий отделом стратиграфии и палеонтологии, Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики Россия, 413503, Саратов, ул. Московская, д. 70

Валерия Владимировна Фомина – младший научный сотрудник, Геологический институт РАН Россия, 119017, Москва, Пыжёвский переулок, д. 7 e-mail: valery.fomina17@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.02.2023;
Принята к публикации 26.07.2023; Опубликована 30.12.2023

3D modeling of salt domes according to detailed drilling data in the Precaspian region

V.V. Lapkovsky¹, B.V. Lunev¹, M.P. Antipov², Yu.A. Volozh², Yu.A. Pisarenko³, V.V. Fomina^{2*}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³Nizhne-Volzhsky Research Institute of Geology and Geophysics, Saratov, Russian Federation

*Corresponding author: Valeria V. Fomina, e-mail: valery.fomina17@gmail.com

Abstract. To create three-dimensional models of arcomorph structures based on detailed data of drilling without involving genetic considerations and indirect information, the potential fields method is effective, which consists of finding an approximating three-dimensional function, the set of isolevel surfaces of which are identified with stratigraphic boundaries, using the coordinates of the formation intersection points. For approximation, mainly three-dimensional splines expressed in terms of Green's functions were used. The main difficulties are associated with the presence of structural unconformities, to take into account which the initial data, and the models built on their basis, are subjected to special spatial transformations. To avoid the influence of high-amplitude arcomorphs on the geometry of the layers of the pre-salt complex, the modeling of the latter was carried out separately from the intensely deformed evaporates and overlying layers. Assaying of the method was carried out at one of the sites in the Caspian Sea. On the study area, according to the interpretation of logging data from 249 wells, a three-dimensional model was created, including several arcomorph structures, and covering the stratigraphic interval from the Emsian stage of the Lower Devonian to Quaternary deposits. The results confirmed the presence of arcomorphs with overturned beds. Such structural forms are poorly fixed by 2D–3D seismic survey methods. The proposed method can be applied in geological studies in the search and exploration of hydrocarbons in salt dome areas.

Keywords: salt diapirs, 3D numerical modeling, 3D splines, oil and gas potential, Precaspian region, Astrakhan arc, potential field method

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of state orders of INGG SB RAS (project FWZZ-2022-0009) and GIN RAS.

The authors are grateful to the reviewers for careful work with the article.

Recommended citation: Lapkovsky V.V., Lunev B.V., Antipov M.P., Volozh Yu.A., Pisarenko Yu.A., Fomina V.V. (2023). 3D modeling of salt domes according to detailed drilling data in the Precaspian region. *Georesursy = Georesources*, 25(4), pp. 192–202. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.18>

References

- Antipov M.P., Volozh Yu.A. (2012). Features of the structure and oil and gas content of the post-salt section of the PreCaspian depression. *Neft i gaz*, 1(67), pp. 47–71. (In Russ.)
- Cherdabaev Zh.M. (2010). Structurally tectonic zoning of subsalt sedimentary complexes of the northeastern side zone of the Caspian depression (based on seismic survey materials). *Geofizika*, 3, pp. 30–35. (In Russ.)
- Chilès J.P., Aug C., Guillen A., Lees T. (2014). Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data – The Potential-Field Method. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 14, pp. 329–336.
- Demyanov V.V., Savelyeva E.A. (2010). *Geostatistics. Theory and practice*. Moscow: Nauka, 327 p. (In Russ.)
- Dubrulle O. (2003). *Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models*. *EAGE*, 296 p. (In Russ.)
- Lunev B.V., Lapkovsky V.V. (2014). Mechanism of development of inversion folding in the subsalt. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(1), pp. 57–63. <https://doi.org/10.1134/S1069351314010066>

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Antipov M.P., Volozh Y.A., Postnikova I.S., (2023). Influence of the Evaporite Formation Structure on Salt Tectonics and Hydrocarbon Traps (by the Results of Numerical Simulation of Halokinesis in the Pre-Caspian). *Geodynamics & Tectonophysics*, 14(2), 0690. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0690>

Rozhenko A.I. (2005). Theory and algorithms of variational spline approximation. Ed. by A.M. Matsokin. Novosibirsk: IVMiMG SB RAS, 240 p. (In Russ.)

Stolz E., Spampinato G., Davidson J. (2019). A statewide 3D geological model for New South Wales. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1080/22020586.2019.12073222>

Structural map of the suprasalt complex of the Caspian basin (1981). Scale 1:1000000. Ed. Volchegursky L.F., Turkov O.S., Schlesinger A.E. (In Russ.)

Thornton J., Mariethoz G., Brunner P. (2018). A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. *Scientific Data*, 5, 180238. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.238>

Timurziev A.I. (2007). Features of the structure and mechanism of formation of salt diapirs of the Astrakhan arch. *Geofizika*, 6, pp. 16–29.

Vasilenko V.A. (1983). *Splines: theory, algorithms, programs*. Novosibirsk: Nauka, 214 p. (In Russ.)

Wellmann F., Caumon G. (2018). 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. Cedric Schmelzbach. *Advances in Geophysics*, 59, pp. 1–121. <https://doi.org/10.1016/bs.agph.2018.09.001>

About the Authors

Vladimir V. Lapkovsky – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Natural Oil and Gas Systems, Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Boris V. Lunev – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Mikhail P. Antipov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences

4 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation

Yuri A. Volozh – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences

7 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation

Yuri A. Pisarenko – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Department of Stratigraphy and Paleontology, Nizhne-Volzhsky Research Institute of Geology and Geophysics

70 Moskovskaya st., Saratov, 413503, Russian Federation

Valeria V. Fomina – Junior Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences

7 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation

e-mail: valery.fomina17@gmail.com

Manuscript received 3 February 2023;

Accepted 26 July 2023;

Published 30 December 2023