

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И МОРФОПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ РЕГИОНАЛЬНОМ ПРОГНОЗЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова, В.Г. Устинов, Н.Н. Стариков

Томский политехнический университет
E-mail: ustinovavn@tpu.ru

Привлечение результатов региональных исследований к прогнозу нефтегазоносности позволило установить критерии выявления скоплений залежей углеводородов на платформах, их приуроченность к линейным троиным сочленениям в рифтовых бассейнах, к бассейнам устойчивого прогибания и унаследованного развития: от древних рифт-авлакогенов до рифтовых структур перми и триаса. Построение цифровых моделей поверхности мантии и магнитного поля Западно-Сибирской плиты стало основой для выявления приуроченности осадочных комплексов с максимальной нефтегазоносностью в осадках чехла платформы к участкам аномальной кривизны поверхности мантии и максимальной вариативности магнитного поля – на фрагментах отрицательных аномалий интенсивности поля, соответствующих выступам фундамента. Вероятностно-статистический анализ информативности прогнозных критериев позволил оценить вероятность наличия перспективных объектов.

Ключевые слова:

Рифтовые структуры, авлакогены, поверхность мантии, пространственные цифровые модели, магнитное поле, тройное сочленение.

Key words:

Rift structures, aulacogen, mantle surface, digital spatial models, magnetic field, triple junction.

Прогноз нефтегазоносности, изучение особенностей строения чехла, фундамента и более глубоких частей земной коры на территории Западно-Сибирской плиты (ЗСП) выполняется в основном по данным сейсморазведки и геофизических исследований в скважинах (ГИС). В региональных исследованиях эти работы выполняются с привлечением данных магнитно- и гравитразведки [1]. В настоящее время накоплен значительный материал, позволяющий установить особенности зональной приуроченности нефтегазоносности, связь высокоёмких коллекторов с глубинным строением земной коры, фундамента и чехла. Построение трёхмерной модели геолого-геофизического строения осадочного чехла и фундамента ЗСП является важной практической задачей, позволяет получить представление о вертикальной и латеральной зональности нефтегазоносных комплексов, установить критерии максимального нефтегазонакопления.

Трёхмерное геолого-геофизическое моделирование предполагает систематизацию представлений о разновозрастных отложениях, начиная с самых древних. С учётом установления закономерностей пространственной и возрастной приуроченности продуктивных коллекторов, геолого-тектонических и физико-геологических условий формирования нефтегазоносных отложений авторами оценивается математическая модель наиболее вероятного расположения высокоёмких залежей углеводородов (УВ). Для определения (индикации) наличия перспективных объектов с заданными характеристиками в ЗСП воспользуемся законом распределения Бернулли:

$$M(X) = 0 \cdot q + 1 \cdot p = p.$$

Индикаторная случайная величина принимает значения: 1 – «успех» или 0 – «неудача» с вероят-

ностями p и соответственно $q=1-p$, а M – математическое ожидание случайной величины X . Определим вероятность наличия перспективных объектов.

ЗСП представляет собой крупнейшую в мире молодую плиту с мезозойско-кайнозойским чехлом. Ее южная и западная части лежат в пределах Урало-Монгольского пояса, а восточная и северная – в пределах смежных с ним метаплатформенных областей. С запада и северо-запада ЗСП обрамляют герциниды Урала и древне-киммерийская складчатая зона Пай-Хоя – Новой Земли, с юга – каледониды, герциниды и салаириды Казахского нагорья и Алтае-Саянской области, с востока – Сибирская платформа и выступ основания Таймыро-Североземельской метаплатформенной области. В районе Кустанайской седловины, в низовьях Енисея и средней части Карского моря мезозойско-кайнозойский чехол ЗСП непосредственно смыкается с плитными комплексами Северо-Туранской плиты и Таймыро-Североземельской области.

В структурном плане мезозойско-кайнозойский плитный комплекс чехла ЗСП представляет собой мегасинеклизу с широкими пологомоноклинальными западными, южными и восточными крыльями. Мощность комплекса в крыльевых частях составляет от 0 до 3 км, платформенные терригенные отложения постепенно выклиниваются к краям плиты, более погруженными (от 3 до 6...8 км) являются внутренние части плиты – в центре и на севере. На западе и юге продуктивный по УВ юрско-кайнозойский комплекс ложится (в основном несогласно) на доюрский – вендско-триасовый промежуточный структурный этаж. Сведения о глубинном строении плиты изложены в трудах Э.Э. Фотиади, В.С. Суркова, О.Г. Жеро и др., позволяют получить общее представление о

структуре докембрийских комплексов, особенностях их формирования, выявить причины перераспределения УВ в продуктивных горизонтах. В восточной части ЗСП вендско-триасовый комплекс выполняет несколько пологих прогибов, в которых его мощность достигает 4...7 км, а его подошва опускается до 6...9 км. Предполагается существование в северной части плиты обширного докембрийского массива, здесь также присутствует промежуточный, слабodeформированный палеозойско-триасовый комплекс, мощность которого возрастает к северу, а подошва опускается от 4...5 до 10 км. Он распространяется и в бассейне Карского моря.

В геологической истории ЗСП различают три главных мегаэтапа. Первый – от архея до начала рифея – предшествовал заложению Урало-Монгольского подвижного пояса. Второй мегаэтап начался с заложения подвижного пояса в рифее и охватывает длительный период терригенно-вулкано-генного осадконакопления, где преимущественно рифтовый режим как минимум трижды сменялся орогенным, завершившийся в северной части плиты – в конце палеозоя. Третий мезозойско-кайнозойский мегаэтап отвечает платформенному развитию этого региона. В раннем триасе, в начале посторогенного мегаэтапа развития, субширотное сжатие сменилось растяжением и раздроблением континентальной коры, приведших к наземным извержениям базальтов, реже липаритов и формированию многочисленных субмеридиональных грабенов. В позднем триасе в грабенах накапливались лимнические угленосные отложения, подстилаемые нижнетриасовыми базальтами траппового типа. Исследования зональной приуроченности высокоёмких резервуаров в пределах осадочных бассейнов показывают их пространственную приуроченность к зонам тройного сочленения рифтовых структур соответствующей фазы рифтогенеза. Приуроченность бассейна осадконакопления к пострифтовым бассейнам является важным критерием для положительного решения относительно возможности обнаружения залежей УВ в перекрывающих комплексах с вероятностью порядка 0,85.

Устанавливается также связь максимальной нефтегазонасыщенности ордовикских, девонских или юрско-меловых осадочных комплексов с рифейскими авлакогенами. Основание рифт-авлакогенов (риффеид), зачастую, представлено сиалическими раннеархейскими комплексами [2, 3]. Сиалические образования часто перекрыты базальтоидами. Мощность рифейских образований (Δh) в авлакогенах значительна, на отдельных участках достигает 10...11 (до 14...16) км. Зональное увеличение мощности (Δh) связывается с формированием рифейских образований в условиях активной континентальной окраины [2–4]. Отложения в рифт-авлакогенах подверглись предпалеозойской складчатости, зеленосланцевому метаморфизму, орогенная фаза завершилась гранитоидным магматизмом – в позднем венде [5]. Наличие и мощность

рифейских подстилающих комплексов является одним из критериев положительного решения относительно возможности обнаружения залежей УВ как в палеозойских, так и юрско-меловых комплексах с вероятностью порядка 0,95.

В дорифейском комплексе предположительно преобладают карелиды [3]. Дорифейские блоки являются фрагментами древних кратонов. Рифейский тафрогенный режим осадконакопления завершился формированием коллизионных и аккреционных орогенов [3]. Картирование дорифейских комплексов позволяет установить участки их максимальной мощности и задать третий значимый критерий (наличие и мощность дорифейских отложений) с надёжностью 0,8. Рифейские слюдяные сланцы, гнейсы вскрыты скважинами на северо-западе в центральной и восточной частях плиты. Этим участкам модели соответствуют критерии прогноза со значимостью 0,85. На рифейские отложения дискордантно наложены байкальские и каледонско-герцинские складчатые системы. Мощность рифейских отложений в бортовых частях ЗСП составляет от 3 до 14 км. Рифейские комплексы зачастую имеют значительное погружение (до 16 км). Например, синклинии фундамента Приуральской зоны соответствуют древним рифейским депрессиям. Наиболее продуктивные отложения чехла пространственно связаны с участками повышенных мощностей Δh рифейских отложений и высоких градиентов $\Delta H(x,y)$ прогибания (в краевых частях рифейских впадин). Оценить пространственное положение рифейских комплексов и величины оптимальных градиентов (с приращением порядка 2 м/м – со значимостью 0,95) в структурах обрамления позволяют профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) или региональные профили [6], которые дают представления об изменчивости мощности рифейских и др. комплексов.

Рифейские авлакогены, формировавшиеся как внутриплитные депрессии, состоят из множества мелких трогов, объединяющихся в достаточно протяжённый пояс. Отложения рифея претерпели изменения в условиях раннекембрийского и кембрий-ордовикского орогенеза, наложенных destructively на рифей-вендские комплексы, и последующие изменения во время каледонско-герцинского осадконакопления и орогенеза. При наличии сведений об их структуре в прогнозную схему вносится дополнительный критерий – коэффициент автокорреляции (со значимостью 0,82) по геологическому или геофизическому изображению (сочетание слоёв для продуктивного комплекса с $r_0=0,975$ – для нефтяного разреза, и со значением $r_0=0,862$ – для газового).

Палеорельеф предъюрской поверхности ЗСП характеризуется большим числом положительных морфоструктур (выступов, поднятий, гряд, валов), обусловленных процессами коллизии вулканических дуг, террейнов, реликтов древней океанической коры, зажатых между палеоконтинентами

Сибири, Евроамерики и Казахстана [1], а также процессами изостазии, приведшими к блоковому расчленению территории и пенепленизации. Постколлизийный рифтогенез в триасовое время на территории юго-востока ЗСП проявился в заложении Колтогорского, Аганского, Усть-Тымского, Чузикского рифтов [6]. Эти рифты пересекают палеозойские плитотектонические элементы: Межовский, Усть-Тымский микроконтиненты – типа террейнов [1], палеоостроводужные системы (Нижневартовскую, Колпашевскую, Кемеровскую), а также Нюрольский и Сургутский реликты погребённой под палеозойским чехлом субокеанической коры.

Проявленность структур фундамента и рифтовых структур в магнитном и гравитационном полях позволяет выполнить прогноз нефтегазоносности, оконтурить перспективные в нефтегазоносном отношении участки территорий, слабоизученные сейсморазведкой и ГИС [6–8]. Так как отложения чехла ЗСП практически не магнитны, особенности строения фундамента, его приповерхностной части проявляются в магнитном поле. Современные компьютерные технологии дают возможность создать модели геофизических полей, в которых отражаются наиболее интересные для изучения геоявления. Компьютерная модель магнитного поля юго-востока ЗСП (рис. 1) наглядно представляет рифтовые структуры в центральной и западной части модели. Колтогорско-Уренгойский, Усть-Тымский, Чузикский рифты – отмечаются в ней контрастными положительными аномалиями интенсивностью до 5 миллиэрстед (мЭ).

Облик магнитного поля в пределах плиты изменчив. Контрастность аномалий магнитного поля увеличивается при сокращении мощности отложений чехла, зависит от состава близповерхностных

(поверхность палеозойского фундамента) отложений. Интенсивные линейные положительные аномалии, в том числе скелетного облика аномалии (по С.В. Аплонову [1]), характерны для рифтовых структур пермско-триасового возраста. Эти аномалии как индикаторы рифтовых структур позволяют выявить перспективные в нефтегазоносном отношении зоны, тяготеющие к бортовым частям пострифтовых впадин [8]. В пределах положительных структур фундамента (отрицательные аномалии магнитного поля на рис. 2) выполнены оценки вариативности поля (δZ_a). Авторы при расчёте величин отклонений магнитного поля для локальных структур применили методику, предложенную в [9], формула (1).

$$\delta Z_a = \left[1 + \frac{Z_a}{Z_0 \left(1 + \frac{I_r}{Z_0} \right)} \right] \delta Z_0, \quad (1)$$

где Z_a – аномальные значения поля, а Z_0 – средние интервальные величины Z в пределах локальных поднятий, I_r – величина намагниченности пород в аномальных зонах.

Крупные залежи УВ проявляются в магнитном поле. По результатам расчётов максимальные величины приращений аномального поля T обнаружены над Мыльджинским, Крапивинским, Первомайским месторождениями. Эта методика позволяет ранжировать локальные структуры по величине приращений аномалий полного вектора напряжённости магнитного поля T или его вертикальной компоненты Z и разработать методы оптимальной фильтрации для выявления нефтеперспективных территорий. Эти результаты стали основанием для включения в прогноз критерия, оцени-

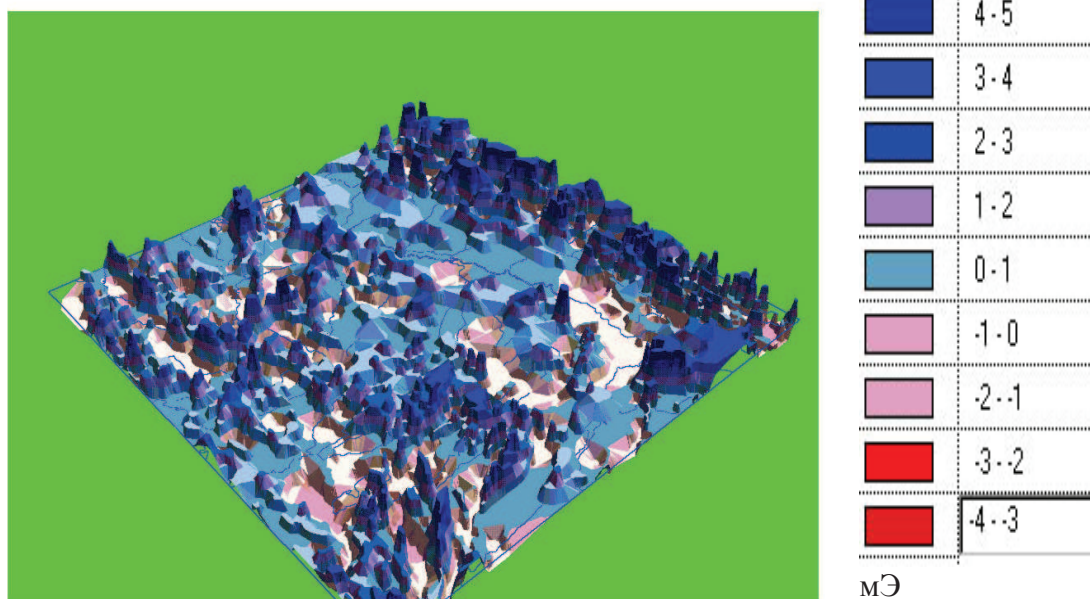


Рис. 1. 3D-модель вектора T магнитного поля в среднем течении реки Оби: построения выполнены с использованием карты под ред. П.А. Кукина, масштаба 1:1500000, в 1 см линейного масштаба модели 50 км

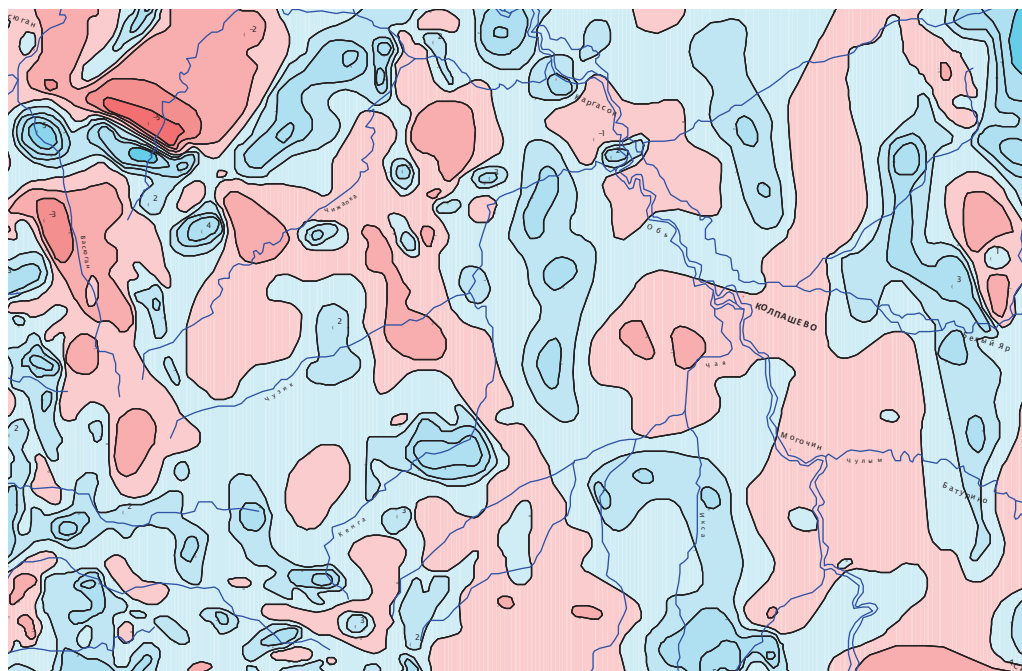


Рис. 2. Модель магнитного поля юго-востока ЗСП. Изодинамы поля T по карте под ред. П.А. Кукина, шкала интенсивностей T на рис. 1, в 1 см линейного масштаба модели 20 км

ваемого по магнитному полю, по величине его дисперсии (со значимостью 0,8).

Разные по возрасту и по составу осадков приповерхностные (для фундамента) комплексы по-разному проявляются в магнитном поле. Отложения триаса и верхнего палеозоя сосредоточены преимущественно в западных, центральных частях юго-востока ЗСП. Значительное увеличение мощности отложений карбона, перми наблюдается во впадинах по периферии Казахстанской плиты, мощность осадков этого комплекса увеличивается здесь от 1...2 до 4...6 км. В крайнем южном и западном участках территории это проявляется в ослаблении интенсивности поля T .

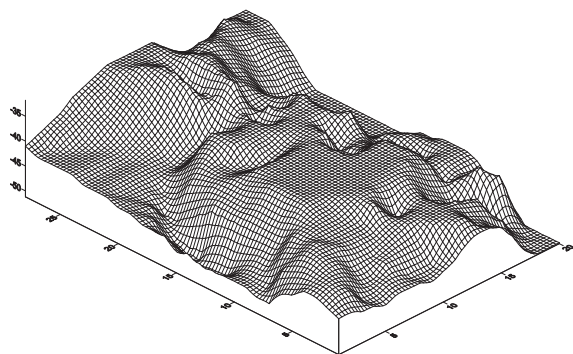


Рис. 3. Модель поверхности мантии ЗСП по данным ГСЗ, карта глубин по [10], вертикальный масштаб, в км, в единице горизонтального масштаба 100 км

Увеличение мощностей осадков перми, триаса обнаружено в Колтогорско-Уренгойском прогибе (и в его северной половине). В юго-восточных районах плиты наблюдается уменьшение интенсивности

аномального магнитного поля, что связано с повышенными мощностями осадков среднего и верхнего девона, максимальные приращения величин мощностей которых обнаруживаются в восточных и крайних северных территориях [10] — в Каскской, Баихинской, Маковской, Усть-Енисейской и др. впадинах. На восточной периферии мощность осадков в прогибах увеличена за счёт вулканогенно-осадочных отложений ордовика, силура и кембрия. Углеводородонакопление на всех нефтегазоносных территориях связывается с бассейнами устойчивого прогибания [11]. Оценочный критерий, как признак устойчивого прогибания бассейна, предлагается определять по величине приращения региональной компоненты магнитного поля (приращение вектора T порядка 200 $\gamma/\text{км}$ в бортовых частях впадин является признаком нефтегазоносности, со значимостью 0,76). Юго-восточная периферия плиты характеризуется режимом длительного и устойчивого прогибания, но для её территорий характерен переменный знак движений и большая тектоническая активность.

На юго-востоке ЗСП (западная часть модели на рис. 1) при анализе особенностей строения поверхности мантии [8] основная нефтегазоносность картируется в краевых частях мантийного купола (рис. 3) на участках его локальных осложнений. Менее перспективны для нефтегазообразования Киселёвская, Тегульдетская впадины, Касский прогиб, обладающие колоссальной мощностью осадочных комплексов, но они расположены вдали от градиентных поверхностей мантийного выступа. В центральной части ЗСП и на её северной периферии поверхность мантии характеризуется по-

вышенной аномальностью. Вариативность приращений рельефа поверхности мантии, оценённая по формуле (1), где за Z взяты величины глубин до поверхности мантии, а вместо I_r – величины скорости по поверхности мантии по данным ГСЗ [10], в центральных районах превысила её значения в юго-восточных территориях ЗСП – в 2...3 раза, а на севере плиты – в 3...4 раза. Результаты оценок говорят о высоком нефтегазовом потенциале центральной части ЗСП и её северных территорий, интенсивно исследуемых в настоящее время. Величина приращения глубин до поверхности мантии порядка 300 м/км признана прогнозным критерием с вероятностью 0,76. На цифровых моделях по поверхности мантии (рис. 3) области максимального нефтегазонакопления в осадках чехла (в юрских отложениях и мелу) расположены вблизи градиентных участков центрального поднятия (мантийного диапира) поверхности мантии. Нефтегазоносные области расположены вблизи зон врезов, отмечающих положение пересечений региональных разломов меридионального, широтного и диагонального простирания [12, 13].

В геолого-тектоническом развитии ЗСП наблюдается определённая закономерность в последовательности движений, проявляющаяся в смене направлений прогибания: с преимущественно восточного – в кембрии, ордовике, на западное – в ордовике, силуре, раннем девоне и субцентральное – в девоне, карбоне [10, 11]. На представленном фрагменте магнитного поля (рис. 1, 2) прослеживаются две зоны: центральная и восточная, отличающиеся по составу осадков и по структуре магнитного поля. Максимум установленного нефтегазонакопления отмечается в центральной части плиты, которая до настоящего времени характеризуется интенсивным тепловым потоком и перераспределением глубинных флюидов, и приурочен к области

«тройного сочленения» линеаментов. Трёхзональность проявляется в строении (сочетании) систем рифтов, древних (рифейских рифт-авлакогенов) и сравнительно молодых (пермско-триасовых), в наложенных впадинах выявляется в трёхзональном сочетании макрокомпонентов (Колтогорско-Уренгойский, Аганский рифт) и в сегментах мезоуровня (Колтогорский, Усть-Тымский), выявляется в сочетании контрастно проявляющихся в желобах систем тектонических трещин [12, 13]. Статистическая параметризация моделей рифтовых систем показывает проявление особенностей их строения в типе функции автокорреляции (АКФ). Тройное сочленение рифтовых структур отмечается тройной зональностью в изображении АКФ на радиальной диаграмме. Форма АКФ определена как прогнозный критерий с доверительной вероятностью 0,86.

Нефтегазоносность в чехле ЗСП определяется многими факторами регионального плана, она тесно связана с распределением песчаных фаций коллекторов, нефтематеринских толщ, покрышек [8–10]. При выборе региональных критериев нефтегазоносности информативен морфоструктурный анализ сейсмоповерхностей [11–13]. Для регионального прогноза важные нефтегазопрогностические параметры можно получить, исследуя вариативные и стресс-модели поверхности фундамента, поверхности мантии. По вещественно-структурным характеристикам чехла эти нефтегазопрогностические элементы моделей (высокодисперсные, повышенных величин стресс-параметров) зачастую коррелируют с повышенной мощностью песчаных фаций [11]. Карты повышенных мощностей песчаных фаций и мощностей терригенных отложений являются картами перспектив нефтегазоносности с прогнозной вероятностью 0,9. Повышенные мощности осадочных комплексов (песчаных фаций) также указывают на мобильность, по-

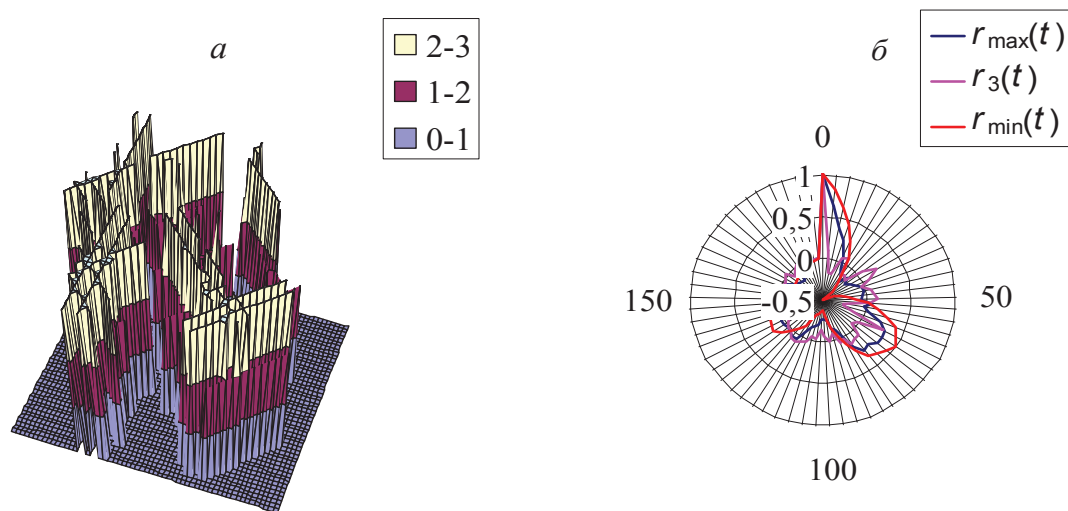


Рис 4. Модель линеаментов рифтовых структур по поверхности верхнеюрских отложений в пределах пострифтовых впадин (а); АКФ фрагментов модели (б) для трёх расчётных схем: $r_{\min}=0,1R$, $r_{\max}=0,3R$, $r_3=0,2R$, где R – размеры территории: в единицах вертикального масштаба (а) – глубины до поверхности по сейсмическому горизонту II_3 . Модель линеаментов для западного фрагмента карты – на рис 1.

движность этих областей в процессе осадконакопления. Изучение структурных карт по поверхности мантии, по поверхности фундамента ЗСП показывает, что такие области (максимального осадконакопления) являются унаследованными по отношению к мобильным (напряжённым) участкам поверхности мантии и поверхности фундамента.

При оценке «успеха» прогноза по вышеперечисленным критериям для ряда месторождений юго-востока ЗСП (Мыльджинское, Крапивинское, Двуреченское, Калиновое, Лонтынь-Яхское и др.) расчётная надёжность по вышеуказанным критериям составила 0,89. Проведены расчёты вероятности для сводов ЗСП. Выявлены 6 перспективных площадей с величиной $p > 0,75$ в склоновых частях Каймысовского, Сургутского, Нижневартовского сводов.

Вероятностно-статистический анализ трёхмерной модели ЗСП на предмет наличия перспектив обнаружения крупных месторождений нефти и газа по заданным критериям значимости: мощность рифейских комплексов, наличие фрагментов дорифейских выступов в авлакогенах, градиент склоновой части близрасположенных к сводам первого порядка рифтовых впадин, мощность дорифейских

отложений, градиент поверхности мантии, рисунок сочетания слоёв продуктивных отложений или мощности песчаных отложений, структура магнитного поля — позволил с расчётной достоверностью 0,7–0,9 обнаружить на территории юго-востока ЗСП ряд перспективных объектов.

Выводы

Обширный геолого-геофизический материал по региональным и крупномасштабным исследованиям, которые проведены на территории Западно-Сибирской плиты, в связи с исследованием её нефтегазоносности, позволил авторам определить ряд критериев нефтегазоносности, которые являются основой для установления высокоперспективных участков с привлечением цифровых моделей магнитного поля, структурных карт по поверхностям отражений в фундаменте и по поверхности мантии. Оценки вариативности аномальных осложнений полей и морфоповерхностей предоставили новую информацию о структуре геологических формаций и стали основанием для разработки формализованного подхода в подборе региональных критериев прогноза нефтегазоносности и выявлении нефтеперспективных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аплонев С.В. Палеообский океан и его роль в нефтегазоносности Западной Сибири // Рифтогенез и нефтегазоносность. — М.: Наука, 1993. — С. 85–90.
2. Берзин Р.Г., Аккуратова Л.Л., Керимова И.К. Предварительные результаты анализа геолого-геофизических данных по международному геотраверсу «Уралсейс-95» // Геофизика. — 2000. — № 6. — С. 25–29.
3. Маслов А.В. Осадочные комплексы в разрезах рифтогенных структур. — Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 1994. — 163 с.
4. Нечеухин В.М. Геодинамические обстановки седиментогенеза и структурное положение осадочных комплексов в межплитных и внутриплитных орогенах // Осадочные бассейны Урала и прилегающих регионов. — Екатеринбург: Изд-во ИГиГ УрО РАН, 2000. — С. 159–162.
5. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Северного Урала. — Уфа: Даурья, 2000. — 145 с.
6. Сурков В.С. Строение грабен-рифтов и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности // Рифтогенез и нефтегазоносность. — М.: Наука, 1993. — С. 77–84.
7. Сурков В.С., Смирнов Л.В., Казаков А.М., Крамник В.Н. Раннетриасовый рифтогенез и особенности формирования нефтегазоносных комплексов Западно-Сибирского бассейна // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и северо-востока России. — Томск: ГалаПресс, 2000. — С. 114–116.
8. Устинова В.Н., Устинова И.Г. Некоторые особенности строения фундамента Западно-Сибирской плиты в связи с нефтегазоносностью // Вестник ТГУ. — 2003. — № 3 (II). — С. 371–373.
9. Яновский Б.М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1978. — 592 с.
10. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / под ред. В.С. Суркова. — М.: Недра, 1986. — 149 с.
11. Устинова В.Н. Морфологическая интерпретация сейсмических поверхностей // Отечественная геология. — 2005. — № 6. — С. 23–27.
12. Устинова В.Н., Устинов В.Г. Сейсмоморфологический анализ при картировании высокоёмких коллекторов. I. Классификация морфоформ. Отражение фациального типа коллектора в палеорельефе // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 3. — С. 42–48.
13. Устинова В.Н., Устинов В.Г. Сейсмоморфологический анализ при картировании высокоёмких коллекторов. II. Роль тектонической трещиноватости в форме палеорельефа и формировании проницаемых ячеек коллекторов // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 4. — С. 63–69.

Поступила 16.02.2012 г.