

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.А., Петров А.В. Основные процедуры обработки и интерпретации нестационарных геофизических полей // Геофизика. – 2007. – № 3. – С. 63–70.
2. Барышев А.С. Статистический анализ направлений изолиний гравитационного и магнитного полей // Сб. науч. тр.: Состояние и перспективы развития геофизических работ в Восточной Сибири / под ред. Г.С. Вахромеева. – Иркутск: Иркутский политехнический университет, 1993. – С. 11–14.
3. Дашевская Е.А., Стевас Г.М. Статистический анализ и взаимосвязь магнитного поля и простираения пород на Украинском щите // Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 135–138.
4. Horton C.W., Hemphkins W.B., Hoffman A.A. A statistical analysis of some aeromagnetic maps from the northwestern Canadian Shield // Geophysical. – 1964. – V. 29. – P. 4–8.
5. Брусиловский Н.В. и др. Магнитное поле и генезис хребта Сакура, Курильская котловина // Геофизика. – 2008. – № 6. – С. 60–70.
6. Елисеев И.С. Интерпретация гравиметрических материалов с использованием угла вектора полного нормированного градиента при изучении верхней мантии // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 3–7.
7. Федюк В.И. Микромагнитная съемка и ее геологические возможности. – М.: Гостоптехиздат, 1968. – 64 с.
8. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
9. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 652 с.
10. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
11. Алабин Л.В. Центральный массив Мартайгинского гранитоидного комплекса (Кузнецкий Алатау) // В кн.: Магматические формации Сибири и Дальнего Востока / под ред. Ю.А. Кузнецова. – М.: Наука, 1971. – С. 169–213.
12. Баженов В.И., Митюшин А.М. Основные черты структуры Центрального золоторудного месторождения (Маринская тайга) // В кн.: Геология золоторудных месторождений Сибири / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: Наука, 1970. – С. 79–87.

Поступила 24.05.2011 г.

УДК 550.83:551.3

ДИСКРЕТНЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ГЕОФИЗИКЕ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова

Томский политехнический университет

E-mail: ustinovavn@tpu.ru

Дискретизация, иерархическая вложенность и наличие типовых форм геологических объектов и геофизических полей позволили выполнить их ранжирование, разработать вероятностно-статистические методы анализа подобных систем и разделения полей. Установлено наличие типовых форм для сейсмических структур; отражённых сейсмических сигналов; в морфологическом проявлении сейсмофаций, вмещающих залежи углеводородов; в пространственном сочетании структурообразующих трещин. Типизация форм структур, морфологических форм геофизических аномалий, сейсмического сигнала с привлечением автокорреляционного анализа нашла применение в процедурах восстановления сейсмического сигнала и структурных построениях, при формировании эффективных графов обработки и интерпретации данных сейсморазведки.

Ключевые слова:

Сейсмоморфоструктурные карты; типы морфоформ структур, модели сейсмических сигналов; регулярная сеть тектонических трещин; вероятностно-статистическая типизация.

Key words:

Seismic morphological maps, types of morphological forms for structures, model forms of seismic signals, regular network of tectonic fractures, probabilistic statistical typing.

Упорядоченность и иерархическая соподчинённость элементов геологических структур и геофизических полей обращает на себя внимание многих исследователей. Структура вложенности, иерархизации, соподчинения элементов структур имеет некоторые черты подобия [1]. Подобие в форме и иерархической структуре объектов позволяет формализовать процесс типизации соподчинённых составляющих, создать классы моделей геолого-геофизического строения нефтегазоносных месторождений и ловушек нефти и газа. Авторы статьи работают в направлении формализации подходов и разработки алгоритмов распознавания форм структур, типизации форм сейсмических сигналов с целью повышения качества прослеживания сейсмических отражений, структуропостроения, выявления

участков высокоёмких коллекторов и зон максимального нефтегазоаккумуляции на месторождениях нефти и газа Западно-Сибирской плиты (ЗСП). Дискретизация, вложенность и наличие типовых форм в структуре вещества позволяют разработать математические модели нефтегазовых объектов, где для формализации используются закономерности подразделения вещества, формы вложенности структурных фрагментов, их сочетания и последовательности взаимного дополнения. Наличие подобия и вложенности является основой для разработки математических методов их анализа и выделения факторов, благоприятствующих нефтегазоаккумуляции, позволяет разработать новые критерии локализации нефтегазоперспективных объектов и зон высокоёмких коллекторов.

Дискретность и вложенность геолого-геофизических систем имеет сложную пространственную структуру. Геолого-геофизические объекты на любом из изучаемых уровней организации есть система систем и могут рассматриваться как упорядоченная совокупность дискретных составляющих. При создании физико-геологической модели ме-

сторождений нефти и газа изучается их проявление в структурных планах и на сейсмических и сейсмогеологических разрезах, в разрезах скважин. Каждую из реализаций физических полей: трёхмерную, двумерную или одномерную можно рассматривать как моносистему. Установлено, что геолого-геофизическая моносистема может быть

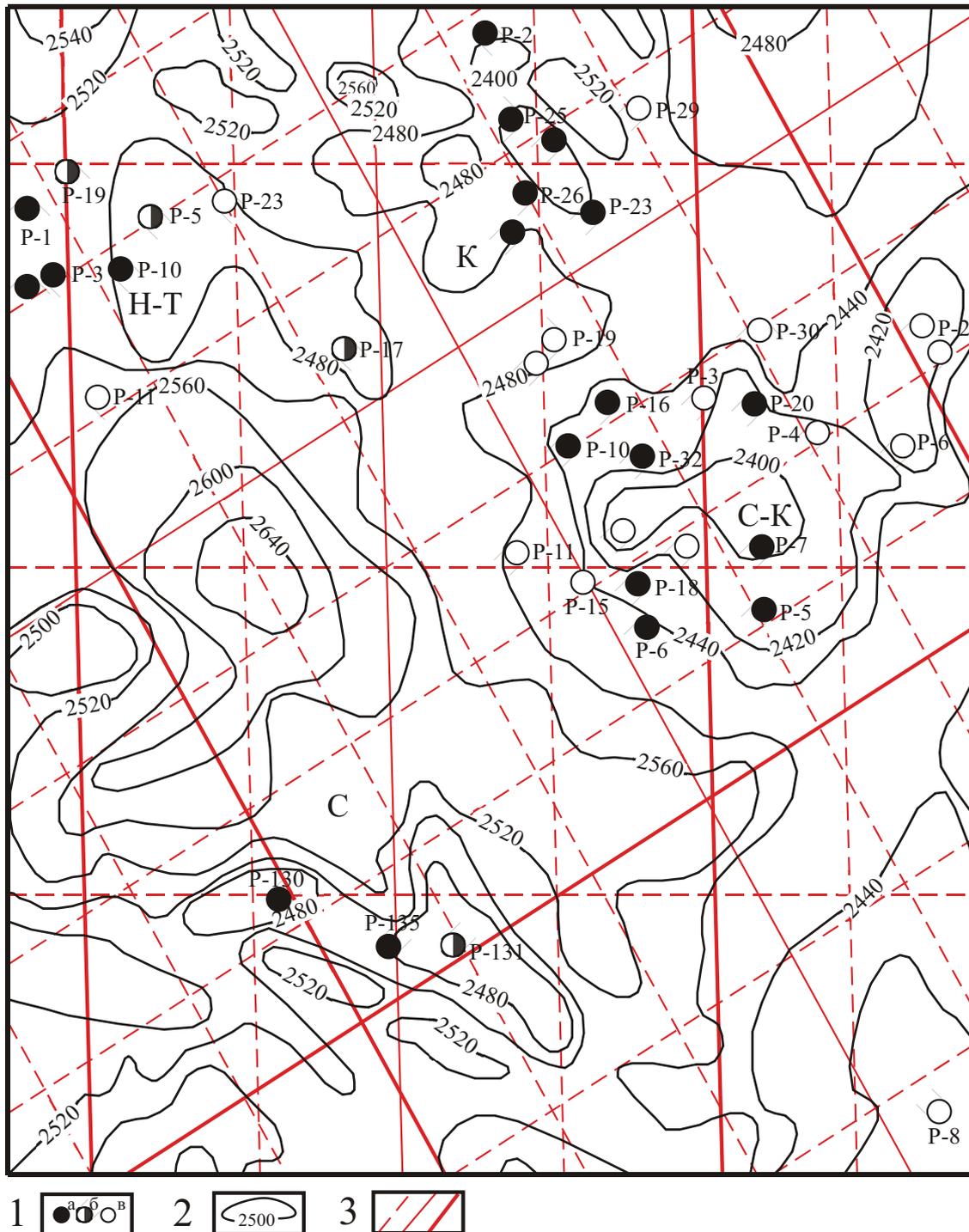


Рис. 1. Тектоническая трещиноватость по результатам морфоструктурного анализа для структурных моделей локальных поднятий: Калиновой (К), Северо-Калиновой (С-К), Нижнетабаганской (Н-Т), Солоновской (С) площадей: 1) глубокие скважины: а) продуктивные, б) с нефтепроявлениями, в) пустые; 2) стратозигипсы по отражающему горизонту II_3 , в м глубины; 3) тектонические трещины: первого, второго, третьего порядков, соответственно; структурная карта на основе построений Г.И. Берлина

представлена как двух, трёх и более компонентная – составляющих меньших порядков [1]. В вертикальном разрезе дискретность и вложенность объектов проявляется в наличии разнопорядковых циклитов. На поверхности Земных оболочек она выявляется в мозаичной структуре поверхности, в наличии типовых форм структур [2, 3]. Дискретность оболочечных объектов имеет прямоугольную симметрию [1–7], которая осуществляется через сеть ортогональных и радиальных трещин, либо – квазиконцентрическую [8], связанную со структурами центрального типа. Прямоугольные и концентрические блоки структурно согласованы и являются составными частями дискретно-иерархической [1] блоковой системы.

При анализе морфологических особенностей поверхности фундамента ЗСП фиксируется его блочное строение, проявляющееся и в строении чехла. Крупные блоки (первого порядка) размерами (20...24)×(23...32) км в свою очередь разбиты на блоки последующих порядков, вкладывающиеся друг в друга: размеры блоков порядка (6...8)×(4...5) км и мельче (рис. 1). Факт ячеистого строения фундамента свидетельствует о контроле размещения тектонических трещин планетарными силами [4], природа которых вероятно связана с неравномерным ротационным режимом Земли.

По материалам сейсморазведки (наличие зон смещения осей синфазности, повышенного поглощения, ухудшения прослеживаемости отражённых волн на временных разрезах; ориентированные, линейно-вытянутые аномалии величин скорости по палеоповерхностям и пр.) можно выявить палеоследы тех закономерно-направленных деформаций, которые в различные циклы тектогенеза определили условия тектонического развития структурных элементов разного порядка, влияли на динамику онтогенеза нефти и газа, суммарный потенциал нефтегазоносности, соотношение жидкой и газообразной фаз. В контуре нефтегазоносности (рис. 1) зачастую третий и четвертый порядок трещин [5], которые, как правило (на месторождениях юго-востока плиты: Мыльджинское, Крапивинское, Игольско-Таловое, Двуреченское, Калиновое, Герасимовское и др.), не нарушают коллектор, а способствуют формированию открытой пористости и зональному распределению участков повышенной проницаемости, локальности в распределении высокоёмких ячей коллектора. Нарушения первого, второго порядков контролируют блоки, формирующие структуры первого и второго порядка, где осуществляется в основном переток тепла и флюидов, аномальное изменение сейсмических параметров в них указывает на наличие напряжённо-деформированных участков структур [7] и близкое расположение ловушек нефти и газа.

Используя знание о расположении и иерархии планетарной сети трещин (разломов) по интенсивности вышеперечисленных сейсмических аномалий можно прогнозировать зоны повышенных планетарных напряжений и целенаправленно вести поиск нефтегазоносных отложений.

Сочетания разномасштабных геоблоков на поверхности Земли образуют симметричные системы [6, 9, 10], среди которых выявляется ограниченное число типовых форм. Типовые формы строения структурно-вещественных комплексов проявляются в квазирегулярном соподчинении основных структурно-морфологических элементов систем, представляющих собой «вихревые», круговые, спиральные, «сигмоидные», двух-, трёх- и многолепестковые [2, 3, 9, 10] системы элементов рельефа – контрастно проявляющиеся, например, на структурной сейсмической карте, представляющие собой равновесные структурно-вещественные комплексы [9, 10], в близких морфологических типах проявляющиеся в полях сейсмических параметров и в потенциальных полях. Морфологическая типизация форм сейсмоструктур актуальна при ранжировании сейсмофаций. Геохронологическая повторяемость режимов осадконакопления, форм структур и типов фаций позволяет разработать типовые формы сейсмических сигналов для мезоциклитов.

Наличие признаков симметрии и подобия в строении вещества земной коры, которое есть следствие близкой природы структурообразующих процессов, циклического их развития, получило отражение в некоторых обобщениях (М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко, Я.Б. Зельдович, Л.И. Красный, М.Л. Минц и др.) и классификациях (В.Е. Хаин, О.В. Петров, Чен Гоа, Н.П. Юшкин и др.), авторы которых признают системное подразделение геоконструкций и системную их организацию, как в пространственной иерархии, так и в их временном развитии (Н.Б. Вассоевич, С.Н. Бубнов, И.А. Вылцан, Л.П. Ботвинкина, Ю.А. Жемчужников, С.Л. Афанасьев, В.В. Вебер, Г.А. Иванов, А.В. Македонов и многие другие).

Справедливы высказывания о делимости, иерархическом соподчинении дискретных геологических объектов, однако значительно меньшее внимание в публикациях уделяется упорядоченности, соподчинённости, симметрии во взаимосвязанных дискретных составляющих вещества, являющихся «частицами» как малых геологических систем (блоков, структур), так и достаточно крупных (плит, континентов) и гигантских (включая Землю в целом, Солнечную систему, Галактику, Вселенную). Во всех мезо-, макро-, мега- и гигантских системах [9] типы сочетания структурных элементов морфомоделей имеют близкие черты и согласуются с основными типами, предложенными В.Н. Устиновой [9, 10–12].

При моделировании форм сейсмических сигналов авторы изучали циклиты разных порядков: мезо- и макроуровня, в которых отражено строение и взаимное пространственное дополнение нефтегазоносных комплексов и толщ. Представления о делимости, иерархии, симметрии в организации циклитов (элементами которых на юго-востоке плиты являются угли, песчаники, глины и их переходные разности): позволяют построить их уникальные модели дискретизации (в сейсмическом

сигнале отражается циклит мезоуровня) и прокоррелировать одновозрастные отложения, получить представления о латеральной изменчивости продуктивных отложений, об их выклинивании и пространственном распространении.

Базовой информацией о циклической структуре макрокомплексов (например, юрско-валанжинский макроциклит) в нефтегазоносных толщах были временные сейсмические разрезы. Региональные сейсмические профили (под ред. А.Э. Контровича и др.) позволили авторам изучить особенности локализации толщ с близкой формой макро- и мезоциклитов, выявить особенности формирования и пространственного распространения колебательных движений поверхности осадконакопления ЗСП в различные фазы осадкообразования, получить пространственную модель центрально-зонального распространения упругой волны [9, 10], формирующейся в каждую фазу накопления осадка в виде стоячей волны (фигуры Лиссажу [11]) и осложнённой бегущей волной по направлению основного замыкания пространственной системы, – с фронтальным распространением упругих смещений в виде равновесного «качания», с образованием структурно-вещественных систем типа «пальмового дерева».

Предложенная модель по геодинамическим параметрам согласуется с основными характеристиками иерархических моделей структурообразования В.В. Белоусова [13], по своим динамико-кине-

матическим характеристикам соотносится с моделью пульсирующего глубинного пустотного пространства, предложенной в нелинейной геодинамике [14]. Построенная модель позволяет объяснить причину многоуровневого заполнения нефтегазоносными отложениями осадочных комплексов, наличие своеобразного латерального скольжения в зональном расположении разновозрастных нефтегазоносных отложений, и латерального дополнения в углеводородном заполнении сопредельных территорий, соседних структур.

Результаты этих исследований позволили установить, что в пределах структур второго порядка юго-востока ЗСП: Каймысовский свод, Пудинский мегавал, Александровский свод, Средневазганский мегавал, дискретная модель макроциклита юрско-валанжинских отложений (сочетания мощностей вещественных комплексов) подобна и в близких чертах изменяется от подножья к сводам структур с нарастанием мощностей песчаных фаций в смежных отложениях и формированием разрастаний их мощности на склонах. Продуктивный горизонт Ю₁ верхнеюрских отложений имеет сложную пространственную структуру с изменением возраста и типа песчаной фации от подножья к своду структуры, но типизация мезоциклита надугольной пачки верхнеюрских отложений (с созданием подножносклоновой, склоновой и сводовой типов моделей для локальных структур) показала возможность наличия ограниченного числа моде-

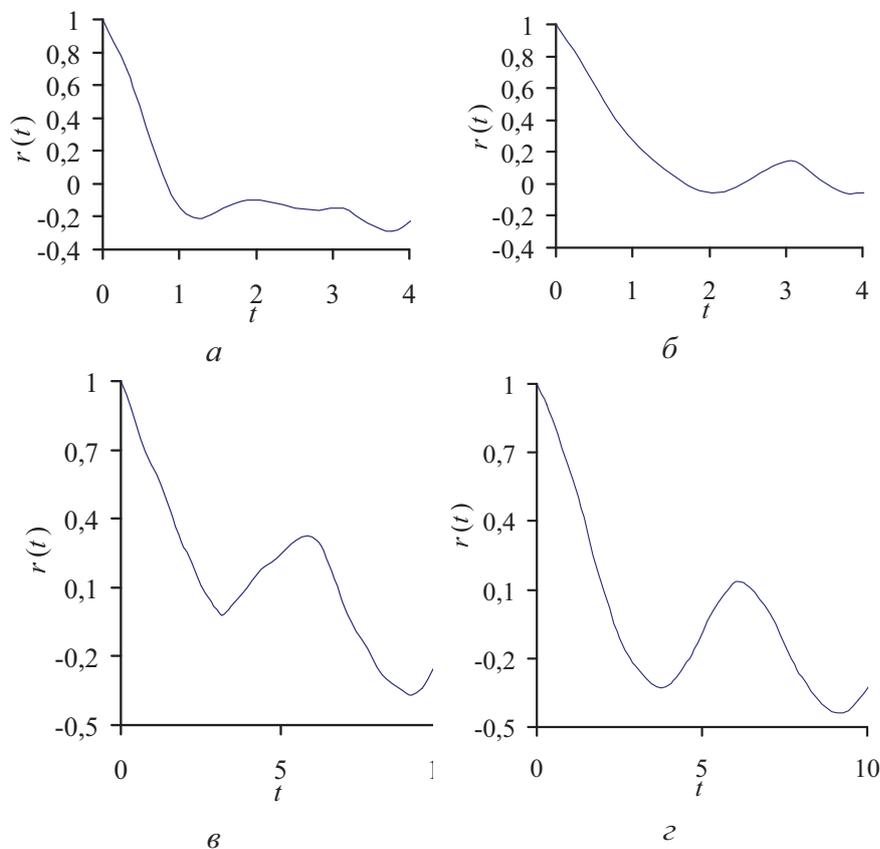


Рис. 2. АКФ сейсмических отражений, $r(t)$ (1 ед. = 10 мс), по группе отражающих горизонтов ЗСП: а) по IV; б) по III; в) по II; г) по I

лей (и моделей их АКФ) для выполнения прогнозирующей деконволюции (структура мезоциклита предопределяет форму сейсмического сигнала), что позволяет поднять точность реконструкций и определять местоположение продуктивной фации.

Изучение ритмичности осадконакопления (по дискретным моделям мезоритмитов, включающим мощности и физические свойства осадков) показывает изменчивость режима осадконакопления, накладывающегося на строгую иерархическую схему «эмерсия, первая трансгрессия, вторая трансгрессия, иннундация, дифференциация, регрессия» (по С.Н. Бубнову) и определяющего про-

странственную вариационную модель мигрирующего побережья, аккумулирующего основную группу продуктивных фаций. В каждую фазу осадконакопления изменчивость рельефа поверхности в мезоритме формирует определённый, но зависимый от влияния более крупной структуры, рельеф поверхности, в свою очередь, предопределяющий формирование конкретной фации. Восстановление формы рельефа по перекрывающим песчаный пласт отложениям, с использованием типовой модели сейсморельефа [9], предоставляет возможность определять сейсмofацию из рельефа палеоповерхности и по картам атрибутов и сейсмических параметров.

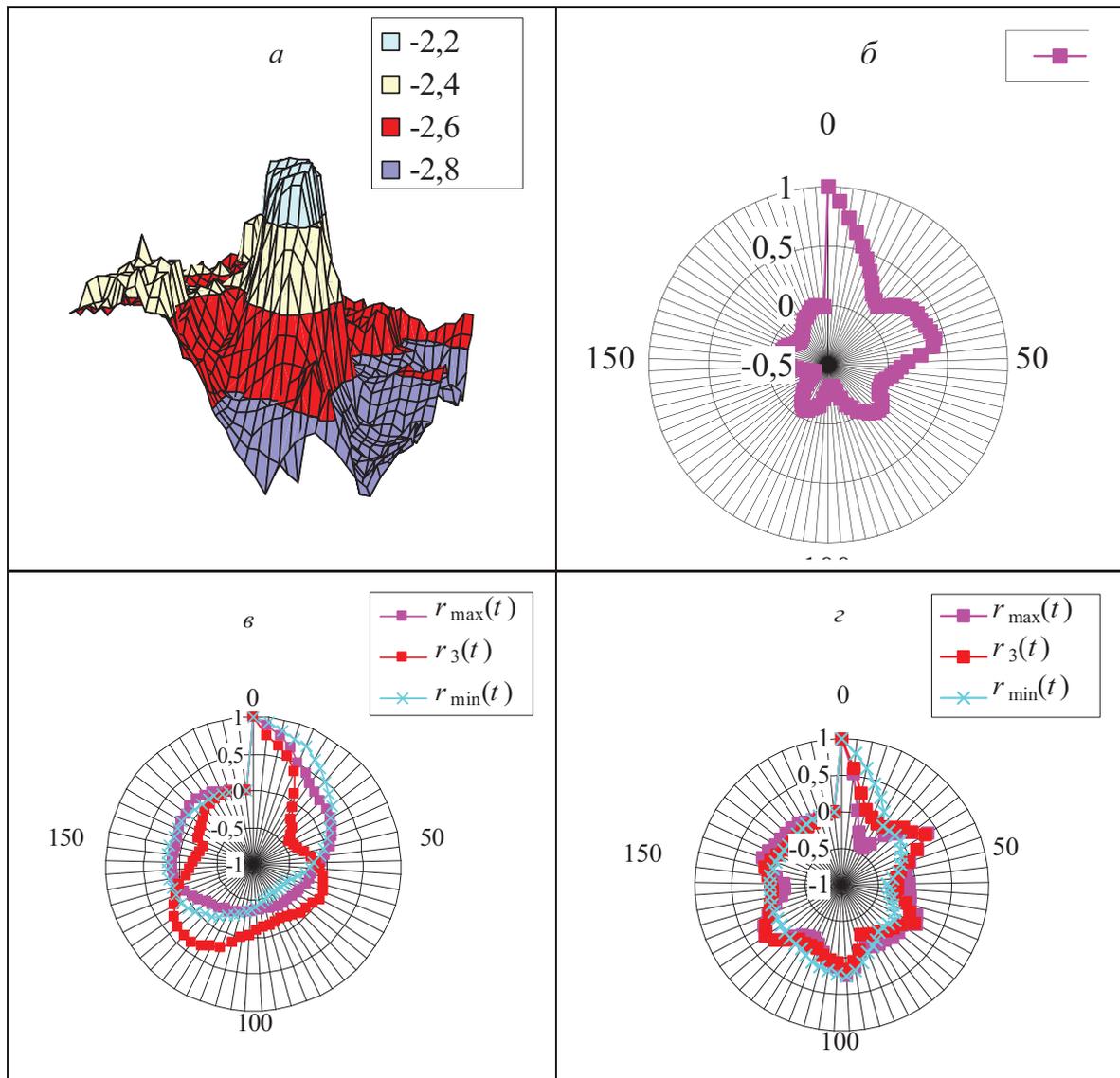


Рис. 3. Аксиометрическое изображение для структуры второго порядка по горизонту II_а юго-восточной части ЗСП: а) Мылд-жинский вал, структурная карта Г.И. Берлина, 3D модель, цветом – глубина до поверхности отражений, в км; диаграммы АКФ ($r_{\max}(t)$, t – в $5 \cdot 10^2$ м): б) вычисленная для структурной карты (а) по спирали Архимеда, $r = k\varphi$, где φ – угол наклона r к полярной оси, коэффициент $k=0,5$; в) вычисленные вдоль окружностей различных радиусов: максимальный радиус (12 км) – $r_{\max}(t)$, минимальный радиус (3 км) – $r_{\min}(t)$, средний радиус (7 км) – $r_3(t)$; г) вычисленные вдоль розы Гвида Гранди [14], $r = a \sin k\varphi$, a – константа, параметр $k=3$, a подобрана таким образом, чтобы r достигал своего наибольшего значения – $r_{\max}(t)$, наименьшего значения – $r_{\min}(t)$, среднего значения – $r_3(t)$

Структура циклитов, устойчивость ритма осадконакопления определяется жёсткой конфигурацией формирующейся поверхностной «стоячей волны», в морфологических формах которой, в соответствии с фазами перестройки, выявлено 12 устойчивых типов морфоформ [9, 10], охарактеризованных авторами типовой формой АКФ. Наличие типовых форм структур, в том числе, наличие преобладающей формы для каждой изучаемой структуры и преимущественного типа сейсмоморфорельефа — для размещения нефти и газа — даёт дополнительный критерий для статистической параметризации нефтегазоносных объектов и выделения зон наиболее перспективных для нефтегазонакопления.

Создание статистических моделей сейсмических сигналов, их АКФ важно как для восстановления тонких особенностей строения нефтегазоносных толщ, так и для повышения точности обработки сейсмоданных. Модели АКФ для сейсмических сигналов перекрывающихся отложений позволяют корректно их восстановить, повысить точность реконструкций горизонтов перекрывающихся отложений, что в свою очередь обеспечивает повышение точности структурных построений по продуктивным отложениям и надёжность инверсионных процедур при оценке эффективных сейсмических параметров продуктивных резервуаров. Оценка АКФ волнового поля разноглубинных частей сейсмического разреза для ряда нефтегазовых месторождений юго-востока ЗСП (Крапивинское, Лонтынь-Яхское, Первомайское и др.) показывает возможность создания статистических моделей разновозрастных отложений. В результате расчётов АКФ: для палеогеновых отложений характерны узкие АКФ со слабоинтенсивными вторичными экстремумами и быстрым затуханием боковых осцилляций (рис. 2, а), для верхнемеловых отложений — узкие АКФ со значительным вторичным всплеском (рис. 2, б), для нижнемеловых — более широкие АКФ со слабоинтенсивными вторичными экстремумами (рис. 2, в) и для юрских — широкие АКФ осложнённые среднеинтенсивными вторичными всплесками (рис. 2, г).

Систематизация сейсмических структур, морфоформ аномальных полей по геометрическому облику (типу сочетаний элементов) позволяет выполнять фрактальную параметризацию типов структур, оценку их энтропии и размерности Хаусдорфа [12]. Структурные морфоформы грубо подразделяются на 4 основных типа: линейно-вытянутые, овальные, изометричные и сложной формы. Авторами выполнено и более детальное ранжирование [9, 10, 12], но уже такое подразделение позволяет классифицировать морфоформы, определить для них АКФ. Эти параметры помогают в оценке перспектив нефтегазоносности локальных поднятий, в прогнозе по морфорельефу песчаной фации [12]. Так, в указанной последовательности, для этих четырёх морфоформ будут близки АКФ на рис. 2, и наиболее благоприятной для нефтегазонакопления можно признать (из опыта исследований) — овальную форму структуры и тип АКФ для ранжирования, представленный на рис. 2, б.

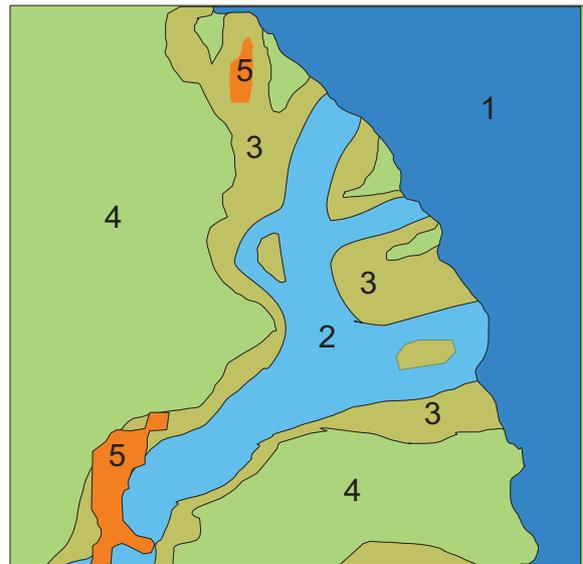


Рис. 4. Сейсмоморфофациальная реконструкция обстановки формирования песчаных пластов надугольных отложений верхневасюганской подсвиты — продуктивный пласт Ю, Мылдзинского месторождения (рис. 3, а), фации: 1) устьевых баров; 2) русла реки; 3) дельтового типа; 4) речной поймы; 5) барьерных островов; фациальный комплекс характеризуется как эстуариевый тип дельты (по В.Л. Фишеру). Сейсмоморфофациальная модель для сводовой части Мылдзинской структуры

Важные сведения о морфологических свойствах аномалий и форме структурных поверхностей можно получить по АКФ $r(t)$; в случае расчёта их по заданным направлениям (геометрическим фигурам), наилучшим образом соответствующим геометрическому образу поверхности. АКФ, вычисленные для структурной поверхности Мылдзинского вала по окружностям, спирали Архимеда и розам Гвидо Гранди, представлены на рис. 3. Полученные АКФ, в свою очередь, несут информацию о пространственных свойствах геофизических объектов, могут использоваться для фильтрации трёхмерных полей. АКФ Мылдзинской структуры по поверхности Π_a (рис. 3, а) в образе радиального скручивания наилучшим образом описывает литолого-фациальную модель коллекторов верхнеюрских отложений, песчаные осадки которого генетически характеризуются, как осадки дельтового комплекса (рис. 4). АКФ информативны при оценке типа морфоформы и предполагаемого генезиса песчаников продуктивного горизонта нефтегазоносной структуры. Для таких объектов в качестве моделей АКФ характерны более сложные формы, например, представленные на рис. 2, в, г. Усложнение формы АКФ при расчёте её по окружностям разных радиусов (рис. 3, з) показывает, что морфоформа изменяет свои свойства от центра на периферию, фрактальна.

При оценке пространственных характеристик изучаемых объектов информативным оказывается также спектр мощности $W(\omega)$, характеризующий энергетический и частотный состав поля. Различие

в спектрах мощностей для типовых структур геофизических полей, описывающих морфологические особенности структур центрального типа, позволяет разработать для фильтрации объектов заданной формы оптимальные фильтры. Полученные в результате фильтрации карты типов структур или карты энтропии характеризуют для нефтегазонасыщенных территорий локальные поднятия наиболее благоприятные для нефтегазонакопления.

Выводы

Выполнена типизация морфоформ структур и сейсмических сигналов, предложены вероятностно-статистические модели одно- и многомер-

ных объектов для продуктивных отложений Западно-Сибирской плиты. Типизация морфоформ позволила разработать подходы для формирования эффективных моделей автокорреляционной функции при выполнении деконволюции в графе обработки дискретных данных сейсморазведки, создать схемы обработки сейсмоданных, позволяющие повысить точность структурных построений, модели автокорреляционной функции сейсмических отражений. Типизация и иерархизация форм структур стала основой для сейсмоморфофациальной интерпретации, позволила разработать методику локализации сейсмофаций при морфоструктурном анализе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 1999. – 346 с.
2. Ласточкин А.Н. Методика и результаты конструирования общей теории геосистем. I. Универсальная элементная база для геоявлений разной природы // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2001. – Вып. 1. – Сер. 7. – С. 48–57.
3. Гарбар Д.И. Регмагенез древних платформ // Общая и региональная геология, геологическое картирование. – М.: ВИЭМС, 1991. – 45 с.
4. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость. – М.: Недра, 1973. – 656 с.
5. Красный Л.И. Разномасштабная делимость // Вестник РАН. – 2002. – Т. 72. – № 6. – С. 988–997.
6. 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.
7. Соловьёв В.В. Структуры центрального типа территории СССР по геолого-геоморфологическим данным. – Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. – 110 с.
8. Устинова В.Н., Вылцан И.А. Циклы в геологии // Известия вузов. Сер. Геология и разведка. – 2004. – № 3. – С. 58–63.
9. Устинова В.Н., Устинов В.Г., Вылцан И.А. О пространственном и временном развитии циклически протекающих событий на Земле // Геофизика. – 2005. – № 5. – С. 43–48.
10. Экология: Структура и морфология / Локтюшин А.А.; Томск. гос. ун-т. – Томск, 1999. – 314 с. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 22.7.1999, № 2410 – В99.
11. Устинова В.Н. Сейсмогеологические модели нефтегазовых месторождений юго-востока Западно-Сибирской плиты: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Санкт-Петербург, 2009. – 46 с.
12. Белоусов В.В. Основы геотектоники. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
13. Пушаровский Ю.М., Меланхолина Е.Н., Моссаковский А.А., Руженцев С.В. Глубинная тектоника Земли: Строение, структурная асимметрия, геодинамика геосфер // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 366. – № 1. – С. 88–96.
14. Устинова В.Н., Устинова И.Г. Статистическая параметризация симметричных геофизических объектов // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 36–41.

Поступила 26.09.2011 г.