

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.834

А.А. НИКИТИН, С.В. ЗИНОВКИН, А.В. ПЕТРОВ, П.В. ПИСКУН

АДАПТИВНЫЕ ПРИЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Рассмотрены адаптивные процедуры выделения неоднородных геообъектов в геофизических полях, включающие адаптивную двумерную энергетическую фильтрацию по разделению полей на составляющие, самонастраивающуюся фильтрацию по обнаружению линейных аномалий, модифицированный метод Б.А. Андреева по решению обратной задачи гравиразведки, а также вейвлет-преобразование волнового поля для локализации нефтегазовых коллекторов. Приведены примеры эффективного использования адаптивных приемов при выделении неоднородностей геологического разреза, обусловленных перспективными на углеводороды объектами.

Понятие «неоднородный геологический объект» достаточно обширное и однозначное определение ему дать трудно, поскольку под неоднородным геообъектом можно понимать любую неоднородность геологической природы: рудное тело или нефтегазовая залежь (в частности, многопластовая), рудное поле или нефтегазоносная зона, рудная или нефтегазоносная провинция, зоны тектонических дислокаций и т. д.

В геофизических полях неоднородные геообъекты сопровождаются сложными аномальными эффектами, в отличие от однородных объектов, описываемых аномалиями простой формы, для которых используются достаточно простые приемы интерпретации: методы подбора, характерных точек, касательных и т. д. Неоднородные объекты обычно характеризуются изменениями физических свойств и геометрии как в плане, так и в разрезе, анизотропией проводимости и скорости. Наиболее успешное решение задач по выделению неоднородных геообъектов может быть реализовано на основе комплексных геофизических исследований с построением согласованной по физическим свойствам и геометрическим параметрам физико-геологической модели искомого объекта.

В связи с постоянным увеличением глубинности геофизических исследований объекты, залегающие на больших глубинах, становятся слабоконтрастными в физических полях. Для таких объектов актуальны задачи обнаружения и локализации в пространстве, особенно для малоразмерных и глубокозалегающих залежей углеводородов.

В настоящее время разработан достаточно широкий арсенал современных методов обработки и интерпретации геофизических данных по выделению неоднородных объектов. К таким методам относятся генетические алгоритмы [8], вейвлет-анализ [6], нейронные сети [3], устойчивые методы интерпретации потенциальных полей на основе регуляризации, комплексный анализ и комплексная интерпретация атрибутов потенциальных и волновых полей [6, 7].

Генетические алгоритмы, являются аналогами адаптивных (самонастраивающихся) фильтров, предложенных в геофизике еще в 1973 г. [1, 4]. В таких алгоритмах путем изменения размеров, формы и простираения скользящих окон осуществляется выделение сигналов различных частотных диапазонов и направлений. Наиболее эффективно применение этих фильтров при выделении линейных аномалий (сигналов). В компьютерной технологии КОСКАД-3D реализована процедура автоматического трассирования выделенных линейных сигналов (линеаментов) [7], благодаря которой осуществляется картирование тектонических дислокаций, контактов пород и других линеаментов по данным наземных, аэро- и космосъемок, а также по временным сейсмическим разрезам. Другой пример адаптивных процедур обработки геофизических полей — их разложение на составляющие (региональную и локальные разных порядков) на основе адаптивной двумерной энергетической фильтрации [6], при этом весовые коэффициенты фильтра пересчитываются при каждом смещении скользящего окна по осям X и Y , размеры и форма

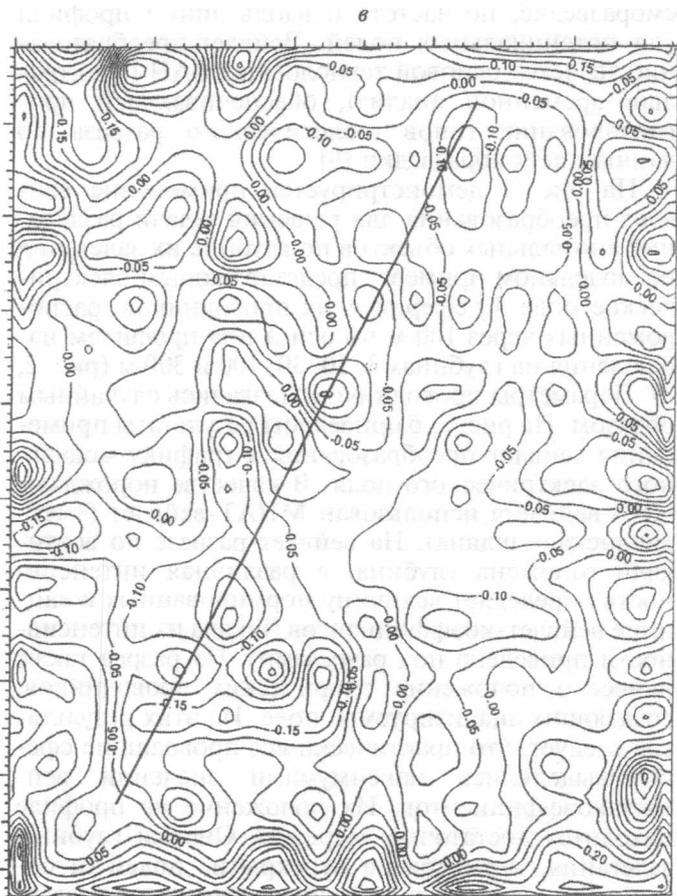
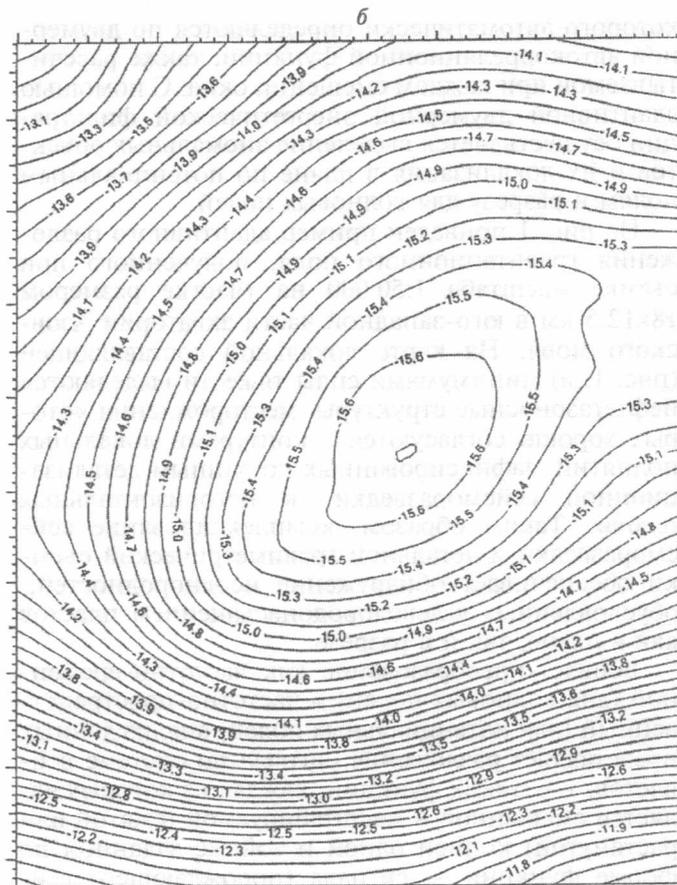
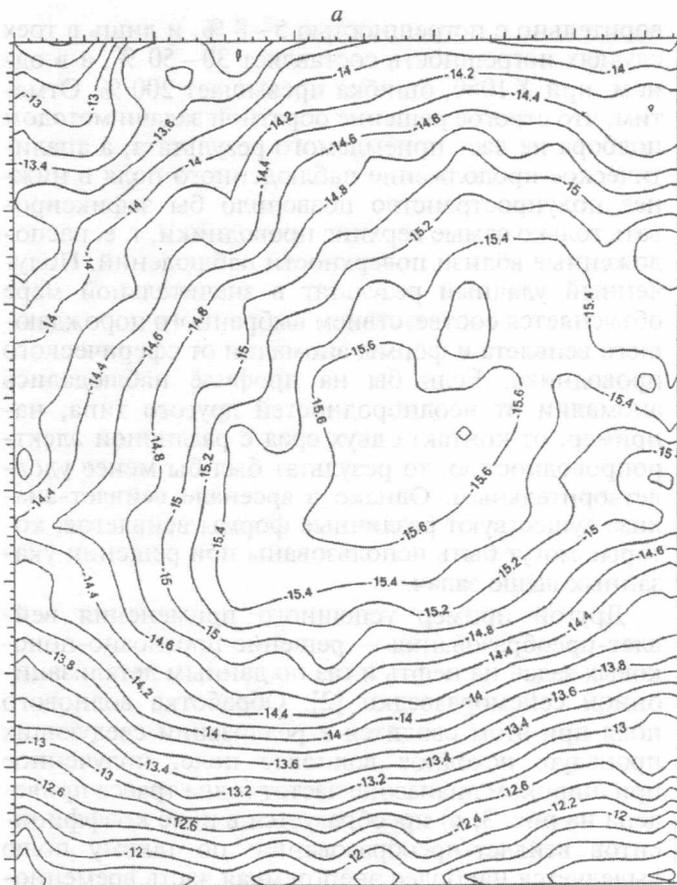


Рис. 1. Исходное гравитационное поле (а) и результаты его разложения на региональную (б) и локальную (в) составляющие адаптивного энергетического фильтра; прямая линия — направление интерпретационного профиля

которого автоматически определяются по двумерной автокорреляционной функции, также рассчитываемой при каждом смещении окна. С помощью адаптивной двумерной энергетической фильтрации осуществляется выделение аномальных объектов и их локализация в плане по потенциальным полям и в разрезе для волновых полей.

На рис. 1 приведен пример адаптивного разложения гравитационного поля, полученного при съемке масштаба 1:50 000 на участке размером 18×12,5 км в юго-западной части акватории Азовского моря. На карте локальной составляющей (рис. 1, *в*) минимумами силы тяжести выделяются нефтегазоносные структуры, месторождения которых хорошо согласуются с контурами локальных поднятий, зафиксированных по данным детализационной сейсморазведки, в погоризонтальных планах. Таким образом, комплексирование сейсморазведки и детальной гравиметрической съемки обеспечивает обнаружение неоднородностей, обусловленных углеводородонасыщением пластов как в плане, так и в разрезе.

Вейвлет-преобразование как частотно-временной (для волновых полей) и частотно-пространственной (для потенциальных полей) анализ данных представляет разложение сигнала по системе вейвлетов, т. е. таких функций, каждая из которых является смещенной и масштабируемой (сжатой или растянутой) копией одной и той же заданной по форме функции — сигнала (порождающего вейвлета). Вейвлет-анализ обеспечивает локализацию неоднородностей по частоте и по времени в сейсморазведке, по частоте и вдоль линии профиля для потенциальных полей. Вейвлет-преобразование является основой технологии СВАН (спектрально-временной анализ), обеспечивающей прогнозирование типов геологического разреза по данным сейсморазведки [9].

На рис. 2 демонстрируется применение вейвлет-преобразования для решения задачи разделения аномальных объектов по глубине их залегания на модельном примере, представляющем электрическое поле 30 сферических проводников, расположенных через 100 м по оси X под профилем наблюдения на глубинах 3, 10, 30, 100 и 300 м (рис. 2, *а*). Параметры проводников задавались случайным образом. На рис. 2, *б* приведены результаты применения вейвлет-преобразования к графику модельного электрического поля. В качестве порождающего вейвлета использован МНАТ-вейвлет («мексиканская» шляпа). На вейвлет-разрезе по вертикали отложена глубина, а различная интенсивность определяет величину нормированных к единице вейвлет-коэффициентов (шкала их интенсивности приведена под разрезами). На разрез также нанесено положение сферических проводников, создающих анализируемое поле. Из этих результатов следует, что практически все проводящие сферы выделились максимумами значений вейвлет-коэффициентов. Их положение на профиле находится достаточно уверенно. Оценки глубины залегания, несмотря на перекрытие полей от соседних проводников, определяются также удовлет-

ворительно с погрешностью 5–8 %, и лишь в трех случаях погрешность составляет 30–50 %, а в одном, при X 1050, ошибка превышает 200 %. Отметим, что строгое решение обратной задачи методом подбора не дает приемлемого результата, а аналитическое продолжение наблюдаемого поля в нижнее полупространство позволило бы зафиксировать только самые верхние проводники, т. е. расположенные вблизи поверхности наблюдений. Полученный удачный результат в значительной мере объясняется соответствием выбранного порождающего вейвлета и формы аномалии от сферического проводника. Если бы на профиле наблюдались аномалии от неоднородностей другого типа, например, от контакта двух сред с различной электропроводностью, то результат был бы менее удовлетворительным. Однако в арсенале вейвлет-анализа существуют различные формы вейвлетов, которые могут быть использованы при решении указанных выше задач.

Другой пример успешного применения вейвлет-преобразования — решение прогнозно-поисковых задач на нефть и газ по данным детализационной сейсморазведки [2]. Обработка волнового поля при этом сводится к реализации следующих процедур: исходное волновое поле, полученное при широком диапазоне частот (одна трасса приведена на рис. 3, *а*) преобразуется в поле коэффициентов вейвлет-преобразования; по такому полю выделяется наиболее энергоемкая часть временного разреза (рис. 3, *б*), отражающая ассоциацию тонкослоистых неоднородных пачек; в пределах такой неоднородной ассоциации рассчитывается дисперсия мгновенных амплитуд временного разреза в скользящем окне «живой» формы, которая изменяется в соответствии с изменением корреляционных характеристик поля; дисперсия мгновенных амплитуд подвергается разложению на составляющие, что обеспечивает локализацию энергии амплитуд в частотно-временной области.

Энергетический спектр вейвлет-коэффициентов локальной составляющей поля дисперсии приведен на рис. 3, *в*. При этом для продуктивной скважины характер флюидонасыщения подчеркивается повышенными значениями вейвлет-коэффициентов энергии, а для непродуктивной скважины подобные значения отсутствуют, что следует из сравнения результатов проверенного анализа на рис. 3, *в*.

Методы интерпретации потенциальных полей с определением местоположения источников аномалиеобразующих объектов также должны включать адаптивные процедуры при выделении неоднородностей геологического разреза.

К таким методам относится модификация метода Б.А. Андреева [1], предложенная А.В. Петровым. Согласно этому методу, вычисляются вариации (остаточные поля) аномалий:

$$\delta \Delta g(x_i, L) = \Delta g(x_i) - \frac{\Delta g(x_i + L) + \Delta g(x_i - L)}{2},$$

где $\Delta g(x_i)$ — значения поля Δg от 0 (центральная точка) до x_i , L — шаг преобразования.

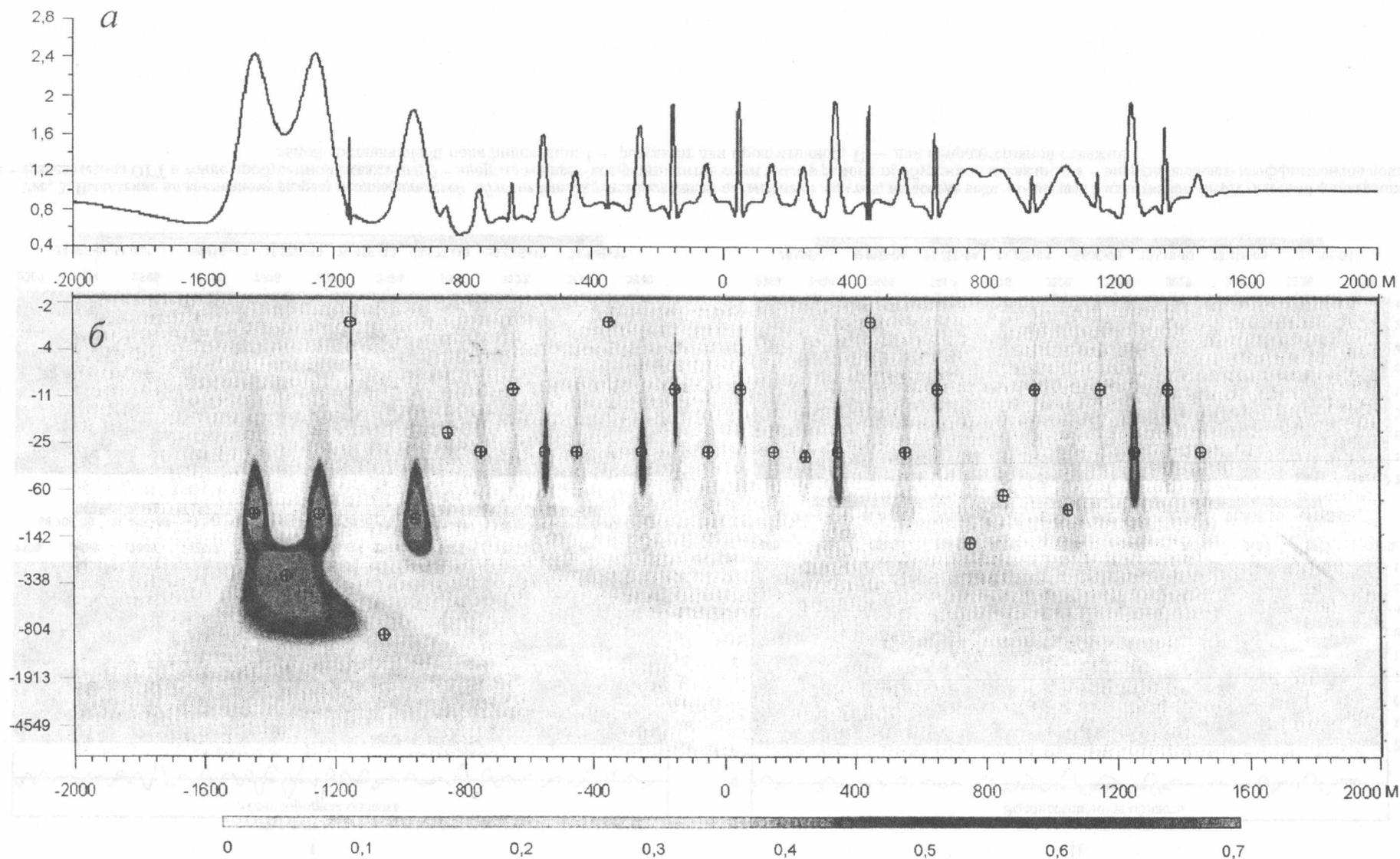


Рис. 2. Результат пространственного вейвлет-анализа электрического поля, смодулированного над серией сферических проводников [9]: а – электрическое поле проводников; б – распределение вейвлет-коэффициентов по глубине

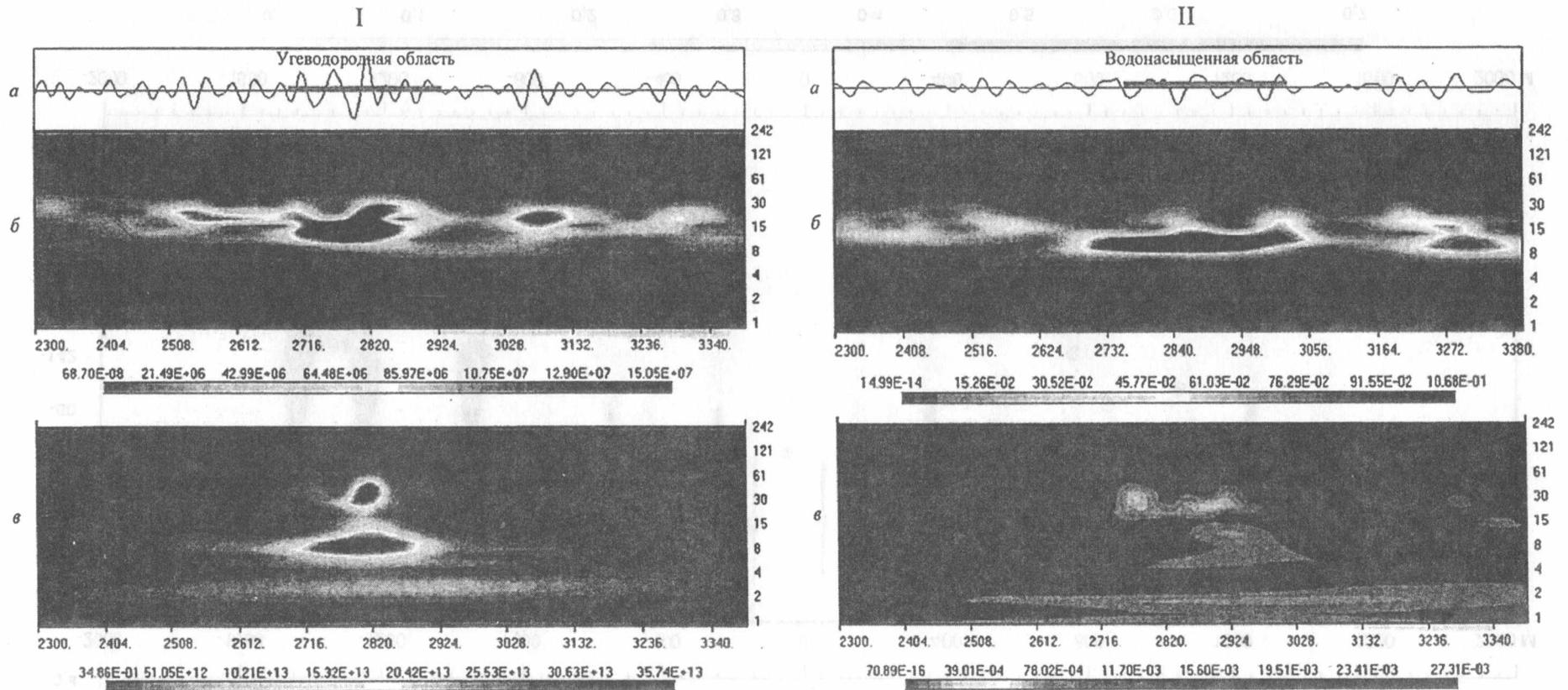


Рис. 3. Выделение по временному разрезу неоднородностей, обусловленных углеводородным насыщением пластов, на основе вейвлет-анализа и адаптивной энергетической фильтрации: *a* – трасса метода ОГТ в точке пробуренной скважины; *б* – энергия вейвлет-коэффициентов семи трасс в районе пробуренной скважины; *в* – энергия вейвлет-коэффициентов локальной составляющей поля дисперсии: I – результат для продуктивной, II – для непродуктивной скважин

При любом значении L остаются неизменными аномалии с интервалом автокорреляции меньше L , и исключаются аномалии с интервалом автокорреляции больше L . Величина L обычно равна 0,5 км для съемок масштаба 1:50 000 и 1–2 км для масштаба 1:200 000. При этом выделяются аномалии, соизмеримые с шагом наблюдений: при масштабе 1:50 000 протяженностью 250 м, при масштабе 1:200 000 протяженностью 2 км. Для отнесения получаемых по приведенной выше формуле локальных аномалий к определенной глубине используется свойство вариаций, при котором влияние объектов, расположенных в интервале глубин от 0 до $0,7 L$ остается неизменным. Для каждого последующего пересчета с большим интервалом автокорреляции используются данные $\Delta g' = \Delta g_H - \delta \Delta g_1$, $\Delta g'' = \Delta g' - \delta \Delta g_2$ и т. д.

Значения остаточных аномалий наносятся для всех точек вдоль профиля на каждом уровне пересчета и по ним строятся карты изолиний в вертикальной плоскости (по разрезу). Интенсивные отраженные волны, как правило, приурочены к резким изменениям изолиний $\delta \Delta g$ в вертикальной плоскости, поскольку коэффициенты отражений определяются через акустическую жесткость, определяемую произведением плотности на скорость.

Качественные результаты по методу Б.А. Андреева [1] получаются при длине профиля, превышающем в 3–4 раза глубину аномалиеобразующих объектов.

Модификация этого метода сводится к реализации следующих процедур:

1) осуществляется последовательная двумерная адаптивная энергетическая фильтрация поля в окне «живой формы» при размерах окна 3×3 , 5×5 , 7×7 и т. д. до величины $0,3L$, где L — максимальный размер по X или по Y ; а цифра соответствует числу точек и профилей в окне;

2) вычисление разностных значений между полученными результатами фильтрации, т. е. из результатов фильтрации для окна 3×3 вычитается результат фильтрации для окна 5×5 . Чем больше ширина окна, тем меньшая доля высоких частот содержится на выходе фильтра;

3) оценка глубины залегания H , которая связана с шириной окна фильтрации соотношением $H = 0,33L$. Эта оценка следует из известного факта, что чем больше глубина залегания аномалиеобразующего объекта, тем меньше частота, которая соответствует данному объекту в спектре исходного поля, а оценка глубины залегания цилиндра бесконечного простираения, расположенного перпендикулярно к плоскости разреза равна $H = r/\pi$, где r — интервал корреляции, $r \approx L$.

Модифицированный метод Б.А. Андреева [1] был реализован А.В. Петровым в технологии КОСКАД-3D. Его использование позволяет оценивать распределение и относительную плотность источников аномалий по глубине. Дополнение к полученным результатам продолжения поля в нижнее полупространство вычислений градиентов

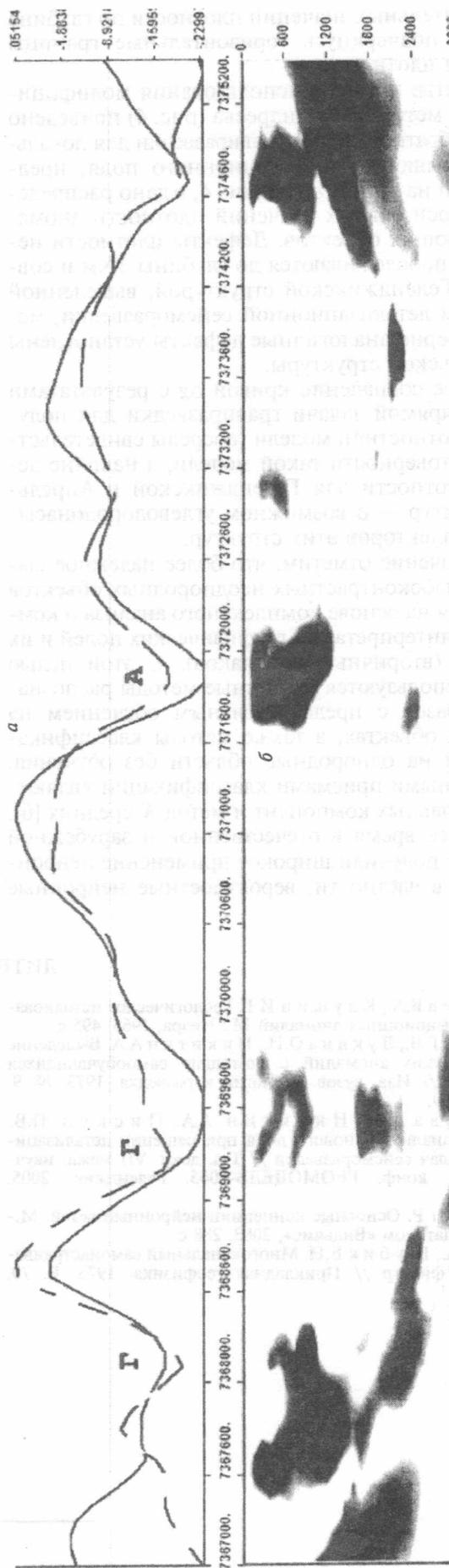


Рис. 4. Результаты решения обратной задачи гравиметрии на основе модифицированного метода Б.А. Андреева [1]: а — локальная составляющая гравитационного поля (см. рис. 1, в с указанием направления интерпретационного профиля), пунктир — теоретически рассчитанная для найденного распределения плотности источников; Г — Геленджикская, А — Апрельская структуры; б — распределение относительных значений плотности аномалиеобразующих объектов по глубине

для относительных значений плотности по глубине позволяет подчеркнуть горизонтальные границы изменения плотности.

В качестве примера использования модифицированного метода Б.А. Андреева (рис. 4) приведено решение обратной задачи гравиразведки для локальной составляющей гравитационного поля, представленной на рис. 1, в, на рис. 4, б дано распределение относительных значений плотности аномалиеобразующих объектов. Дефекты плотности непрерывно прослеживаются до глубины 3 км и совпадают с Геленджикской структурой, выделенной по данным детализационной сейсморазведки, менее достоверно аналогичные дефекты установлены для Апрельской структуры.

Хорошее совпадение кривой Δg с результатами решения прямой задачи гравиразведки для полученной плотностной модели геосреды свидетельствует о достоверности такой модели, а наличие дефектов плотности для Геленджикской и Апрельской структур — о возможном углеводородонасыщении коллекторов этих структур.

В заключение отметим, что более надежное выделение слабоконтрастных неоднородных объектов реализуется на основе комплексного анализа и комплексной интерпретации геофизических полей и их атрибутов (вторичных признаков). С этой целью широко используются различные методы распознавания образов с предварительным обучением на эталонных объектах, а также методы классификации полей на однородные области без обучения. Эффективными приемами классификации являются метод главных компонент и метод K -средних [6]. В последнее время в отечественной и зарубежной литературе получили широкое применение нейронные сети, в частности, вероятностные нейронные

сети [3]. Однако новая терминология по-прежнему ничего принципиально нового в решении задач выделения объектов по комплексу данных, в частности, в решении задач прогноза, не привносит.

Выделение трех слоев нейронной сети: входного — комплекс исходных полей и (или) атрибутов полей; промежуточного — информативная совокупность атрибутов, определяемая на эталонных объектах; выходного — результат комплексного анализа в виде комплексного параметра, представляет собой известную процедуру распознавания образов по комплексу атрибутов (признаков) при наличии эталонных объектов. Кроме того, проведенное нами сравнение результатов применения вероятностных нейронных сетей с широко применяемым в практике комплексного анализа геоданных методом K -средних показало их полную идентичность при решении задач классификации. Наконец, специалисты по разработке нейронных сетей признают, что они в точности до деталей отражают статистический подход в распознавании образов [3].

Адаптивность при решении задач классификации в методе K -средних в принципе реализуется путем задания различного числа K -классов, при этом качество классификации оценивается с учетом минимизации внутриклассовой и максимизации межклассовой дисперсий по формуле $W = 100 - \sigma_1/\sigma_2$, где σ_1 — внутриклассовая и σ_2 — межклассовая дисперсии.

Адаптивные процедуры комплексного анализа и комплексной интерпретации наряду с приведенными выше адаптивными приемами обработки и интерпретации монометодных данных являются перспективным направлением с целью выделения неоднородных геологических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б.А., Клущин И.Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий М.: Недра, 1965. 495 с.
2. Демура Г.В., Лукина О.П., Никитин А.А. Выделение геологических аномалий с помощью самообучающихся фильтров // Изв. вузов. Геология и разведка. 1973. № 9. С. 103–109.
3. Земцова Д.П., Никитин А.А., Пискун П.В. Вейвлет-анализ волнового поля при решении детализационных задач сейсморазведки // Тез. докл. VII межд. научно-практ. конф. ГЕОМОДЕЛЬ-2005. Геленджик, 2005. С. 68–69.
4. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.-СПб.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 288 с.
5. Кац С.А., Шубик Б.Н. Многоканальный самонастраивающийся фильтр // Прикладная геофизика. 1973. В. 70. С. 54–64.
6. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
7. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 341 с.
8. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации КОСКАД-3D // Геофизика. 2000. №4. С. 29–33.
9. Пилинский М., Рудковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-телеком, 2004. 452 с.
10. Светов Б.С., Пискун П.В. Спектрально-пространственный анализ (СПАН) электроразведочных данных // Геофизика. 2005. № 4. С. 43–48.

Российский государственный
геологоразведочный университет
Рецензент — В.И. Пахомов.