УДК 550.7:551.243.4:553.98(571.56)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ГАЗОНОСНОСТИ В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Феоктистова О.В.

ООО «ИНГЕОСЕРВИС», Тюмень, e-mail: info@ingeos.info

В настоящее время в нефтегазовой геологии особое значение и актуальность приобретают последние достижения в информационно-технологической инфраструктуре, в частности появление технологических возможностей анализа огромных массивов данных («big data»). К методам и техникам анализа, применяемым к «большим данным», относят методы классификации, регрессионный анализ, искусственные нейронные сети и др. Появление современных технологических возможностей и развитие методик и техник статистического анализа привело к возникновению новых технологических решений. В данной статье приводятся результаты исследований, использующих методики комплексирования технологий AVO анализа и вероятностных нейронных сетей Байеса. Впервые опробование нового технологического решения проводилось на базе сейсмогеологической информации по участку работ, расположенному в пределах Северного Свода Западной Сибири, где, с целью наращивания ресурсной базы, исследовался промышленный потенциал газоносности надсеноманского интервала разреза. Исследуемый участок хорошо изучен бурением и сейсмическими методами на базе съемки 3D. Повторно опробование методики проводилось на площади, которая в тектоническом отношении приурочена к Центрально-Ямальскому мегавалу, расположенному в пределах Ямало-Гыданской синеклизы Западной Сибири, в нефтегазоносном отношении – в Нурминском нефтегазоносном районе (НГР) Ямальской нефтегазоносной области (НГО). Вторая площадь находится в неблагоприятных геологических условиях и имеет ограниченный набор скважинной информации. В данных условиях применение технологии AVO в комплексе с вероятностными методами классификации по Байесу позволило определить потенциал газоносности песчаных линз в отложениях верхней юры и выполнить вероятностную оценку прогноза.

Ключевые слова: Ямало-Гыданская синеклиза, Северо-Сеяхинский вал, аномалия «яркое пятно», ловушка УВ, AVO, классификация, метод Байеса

DETERMINATION OF THE POTENTIAL OF GASNESS IN COMPLEX GEOLOGICAL ENVIRONMENTS BY SEISMIC METHODS BASED ON BAYES PROBABILITY NEURAL NETWORKS

Feoktistova O.V.

LLC «INGEOSERVICE», Tyumen, e-mail: info@ingeos.info

Currently, in oil and gas geology, the latest advances in information technology infrastructure, in particular, the emergence of technological capabilities for analyzing huge data arrays («big data»), are of particular importance and relevance. The methods and techniques of analysis applied to the «big data» include classification methods, regression analysis, artificial neural networks, etc. The emergence of modern technological capabilities and the development of methods and techniques of statistical analysis led to the emergence of new technological solutions. This article presents the results of studies using the methods of integration of AVO analysis technologies and Bayes probabilistic neural networks. For the first time, testing of a new technological solution was carried out on the basis of seismic and geological information on the site of work located within the Northern Arch of Western Siberia, where, in order to increase the resource base, the industrial potential of the gas content in the Senonian section was studied. The study area is well studied by drilling and seismic methods based on 3D techniques. The technique was re-tested on an area tectonically related to the Central Yamal megaval located within the Yamalo-Gydan syneclise of Western Siberia, and in the oil and gas bearing area in the Nurminsky oil and gas bearing region (NGR) of the Yamal oil and gas bearing area (NGO). The second area is in adverse geological conditions and has a limited set of well information. Under these conditions, the use of AVO technology in combination with probabilistic Bayesian classification methods made it possible to determine the gas potential of sand lenses in upper Jurassic sediments and to perform a probabilistic assessment of the forecast.

Keywords: yamalo-gydanskaya syneclise, north-seyakhinsky shaft, anomaly «bright spot», the trap of hydrocarbons, avo, classification, the bayesian method

Опыт изучения амплитудных аномалий типа «яркое пятно» в сейсмическом волновом поле показал, что последние могут быть вызваны литологическими замещениями в разрезе горных пород, что вносит неоднозначность в интерпретацию аномалий при поисках залежей газа. Кроме этого, сложная и высокоорганизованная технология AVO (анализ зависимости амплитуды отраженной волны от величины удаления «источник – приемник») весьма чувствительна к качеству данных [1].

Как показывает практика, с момента создания метода AVO (около 1982 г.) сейсмическая индустрия с разной степенью успеха извлекала пользу от выявления аномально-

го поведения амплитуд и время от времени испытывала разочарования и возникающие сомнения в методе.

Наш опыт говорит, что использовать анализ AVO все же выгодно, потому что в конечном счете он основан на твердых физических принципах. А для снижения неопределенности при поиске газовых залежей по технологии AVO эффективно привлекать статистические методы, что позволяет снизить геологические риски и дать оценку результирующим геологическим моделям.

Одним из таких технологических решений является методика обучения байесовых нейронных сетей (байесовых классификаторов) по сейсмическим признакам аномалий, выделенных по кроссплотам AVO.

Достоинством байесовых сетей является малое количество данных, необходимых для оценки параметров аномальности, обучения по эталонному образцу и выполнения классификации. Но несмотря на кажущуюся простоту байесовы классификаторы часто работают лучше других методов во многих сложных ситуациях.

Цель исследования: разработка методических рекомендаций по включению статистического анализа данных в технологическую цепочку AVO для снижения геологических рисков при выявлении газовых залежей и повышения достоверности результирующих сейсмогеологических моделей.

Материалы и методы исследования

В работе использовались методы математической статистики, проводился системный анализ больших массивов данных геолого-геофизической информации, применялась технология AVO-анализа, использовались профессиональные пакеты программы R-LANG для статистической обработки и интерпретации данных [2].

Исследования базировались на основе геолого-геофизических данных по продуктивным пластам нижнеберезовской, покурской и малышевской свит, расположенных в пределах Северного свода и Ямало-Гыданской синеклизы Западно-Сибирской плиты.

Результаты исследования и их обсуждение

Принципиальная технологическая схема выполнения классификации Байеса с применением кроссплотов AVO

Байесовы вероятностные нейронные сети – сети, чей принцип действия основан на теореме Байеса, позволяющей сделать выводы о распределении вероятностей на основе имеющихся данных.

Есть несколько подходов к оценке плотности вероятности по имеющимся данным. Первый заключается в том, что существует предположение о нормальном распределении модели, параметры которой оцениваются аналитически (такие параметры, как среднее, стандартное отклонение и т.д.).

Другой подход к оценке плотности вероятности основан на ядерных оценках. Где текущее наблюдение рассматривается как факт, что в данной точке пространства имеется некоторая плотность вероятности. Кластеры из близко расположенных точек указывают на то, что в этом месте плотность вероятности больше, а по мере удаления доверие убывает и стремится к нулю. В каждой точке наблюдения помещается функция распределения (чаще всего это Гауссовы функции – с формой колокола). Если обучающих наблюдений достаточно, то метод дает достаточно хорошее приближение к истинной плотности вероятности.

Наиболее важным преимуществом байесовых сетей является то, что выходное значение имеет вероятностный смысл, и то, что сеть быстро обучается. При обучении такой сети время тратится только на то, чтобы подать на вход обучающие модели, сеть работает настолько быстро, насколько это вообще возможно. Поэтому байесовы вероятностные нейронные сети (классификаторы Байеса) особенно полезны для экспресс-анализа: когда нужно решить, какие из входных переменных лучше использовать, или когда за короткий период времени нужно проделать большое количество тестов.

Ниже приводится порядок выполнения операций в методике определения потенциала газоносности, основанной на технологии AVO с последующим обучением байесовых классификаторов:

1. Корреляционный анализ, поиск эффективных связей петрофизических параметров с сейсмическими, выбор сейсмических атрибутов.
2. Построение трехмерных кроссплотов AVO («интерцепт – градиент – сейсмический атрибут»), селекция данных, соответствующих аномальным значениям, связанным с УВ.
3. Создание обучающей выборки – эталона – на основе выбранной области по кроссплотам AVO.
4. Трансформация сейсмического поля данных в поля классов и вероятности принадлежности аномалий в сейсмических данных к классу эталона.

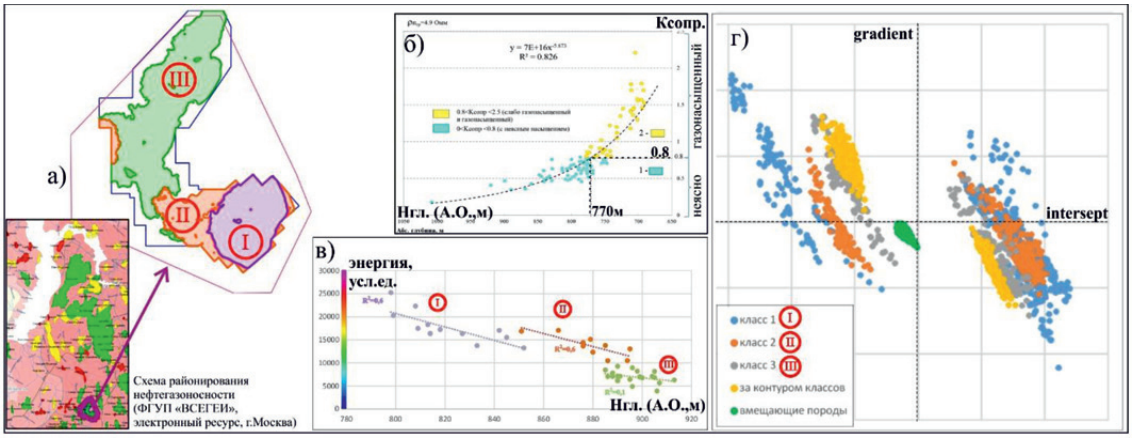

Рис. 1. Результаты интерпретации аномалий AVO: а) схема контуров классов и расположения съемки 3D; б) зависимость коэффициента удельного сопротивления от глубины залегания; в) выделение классов по двум признакам: «абсолютные отметки кровли нижнеберезовской подсвиты»; атрибут «энергия»; г) кроссплот «Intercept – Gradient»

Опробование методики классификации Байеса, выполненной на основе кроссплотов AVO в пределах районов Северного Свода Западной Сибири

Опробование методики проводилось на базе сейсмогеологической информации по участку, расположенному в пределах Северного Свода Западной Сибири, где, с целью наращивания ресурсной базы, исследовался промышленный потенциал газоносности надсеноманского интервала разреза.

В тектоническом отношении участок работ приурочен к Центральной части Северного крупного вала и северо-восточной части Пякупурской малой впадины. Отложения, сложенные опоками и кремнистыми аргиллитами, являются коллекторами с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) [3].

Ранее по данным ГИС и с учетом результатов испытания в скважинах на этой площади уже были утверждены критерии для выделения перспективных прослоев в разрезе и выделены газонасыщенные интервалы (рис. 1, а–в).

Границы распространения газовой залежи в сейсмическом волновом поле были установлены с использованием AVO-технологии и петрофизических трендов, установленных по данным ГИС и бурения [4].

С помощью корреляционно-регрессионного анализа была проведена классификация потенциальной продуктивности сенонской части разреза и установлено, что размер и емкость коллектора в сеноне зависят от таких факторов, как близость нижезалегающей сеноманской залежи и размах ее амплитуды по высоте (рис. 1, в, г).

Создание обучающей выборки выполнялось по кроссплотам AVO и сейсмическим атрибутам в окрестностях скважины 431, где по испытаниям был получен чистый газ. На рис. 2, а–г приведены форматы записи эталонных значений в табличном и графическом виде, которые содержат данные о значениях функции плотности вероятности для выбранной области, ассоциируемой с эффектом «яркого пятна» в окрестностях скв. 431, с локацией данных в сейсмическом волновом поле. Форматы данных наблюдений сохраняются в базу, с возможной последующей корректировкой, и используются в целях классификации как эталон класса, связанного с насыщением УВ.

Теорема Байеса позволяет рассчитать апостериорную вероятность принадлежности к классу «аномалия УВ» для всего объема сейсмических данных по формуле, которую в общем виде можно записать как

$$P(c\,|\,x) = \frac{P(x\,|\,c) * P(c)}{P(x)},$$

$$P(c\,|\,x) = P(x_1\,|\,c) * P(x_2\,|\,c) * \ldots * P(x_m\,|\,c) * P(c),$$

где $P(c|x)$ – апостериорная вероятность класса «*аномалия УВ*» (т.е. искомая вероятность принадлежности изучаемой сейсмической аномалии к тому же классу, что и залежь в пределах скв. 3.

$P(c)$ – априорная вероятность класса «*аномалия УВ*» (залежь в пределах скв. 3).

$P(x|c)$ – априорная вероятность для признака атрибут *«энергия»* для класса «*аномалия УВ*» (выборка в пределах залежи в р-не скв. 3).

$P(x)$ – априорная вероятность признака атрибут *«энергия»* для всей генеральной совокупности (вся выборка значений в анализе).

Как видно из приведенной формулы, байесовский алгоритм позволяет рассчитывать классы по одному или нескольким атрибутам. В данном примере классификация проводилась на основе следующих объемов сейсмических данных: атрибутов «интерцепт», «градиент», «энергия отраженной волны» в ограниченном по времени диапазоне – в пределах от C_1+100 мс до C_1-100 мс. По алгоритму Байеса они трансформировались в объемы сейсмических классов и вероятности принадлежности аномалий в сейсмических данных к классу эталона.

Оценка результирующих моделей проводилась по известным критериям: в пределах данного месторождения газонасыщенной части пласта соответствуют Ксопр. ≥ 0,8 и Нгл(а.о.) ≤ 770 м (рис. 2, д, е). Вероятность наличия УВ в данном интервале составила Р ≥ 0,8.

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о возможности применения методики обучения байесовых нейронных сетей (байесовских классификаторов) по признакам сейсмических аномалий, выделенных по кроссплотам AVO, для новых территорий или площадей, имеющих дефицит скважинной информации.

Определение потенциала газоносности в районе Центрально-Ямальского мегавала по методике классификации Байеса, выполненной на основе кроссплотов AVO

Краткая характеристика участка работ

Второй исследуемый участок мало и неравномерно изучен бурением – одна скважина пробурена на восточной границе съемки 3D и 3 скважины в центральной части, из которых только одна вскрыла изучаемый интервал – верхнеюрские пласты $ЮЯ_{2-4}$.

Площадь работ относится к ЯНАО Тюменской области, в тектоническом отношении она приурочена к Центрально-Ямальскому мегавалу, расположенному в пределах Ямало-Гыданской синеклизы. В нефтегазоносном отношении – в Нурминском нефтегазоносном районе (НГР) Ямальской нефтегазоносной области (НГО).

В пределах данного района стратиграфический диапазон нефтегазоносности очень широк – от палеозоя до сеномана и включает в себя следующие нефтегазоносные комплексы (НГК) с доказанной продуктивностью: доюрский, нижне-средне-верхнеюрский, неокомский, аптский и альб-сеноманский. Опробование новой методики проводилось в интервале верхнеюрских отложений, для пластов группы $ЮЯ_{2-4}$ (малышевская свита).

Анализ скважинных данных

Поисковая скважина 3 заложена с целью изучения геологического строения и поисков УВ в меловых и юрских отложениях. При достижении скважиной проектной глубины был выполнен полный комплекс промыслово-геофизических исследований. По данным каротажа отложения малышевской свиты вскрыты на глубине 3632 м. Мощность ее составляет 130 м. По результатам газового каротажа отложения интерпретируются как продуктивные. По описанию керна (интервал 3639–3651 м) отложения представлены песчаником светло-серым, мелкозернистым, крепко сцементированным (цемент глинистый), слабослюдистый с включениями углистого детрита, с прослойками аргиллита черного и алевролита тёмно-серого, залегание наклонно волнистое, участками линзовидное. Отмечается тонко ритмичное чередование глинистых и песчано-алевролитовых образований с низкими ФЕС.

Для отложений юрского возраста северных месторождений Западной Сибири граничные значения УЭС (удельного электрического сопротивления) для продуктивных коллекторов составляют от 8 до 10 Ом·м. Проницаемые пропластки пластов группы $ЮЯ_{2-4}$ характеризуются УЭС от 14,4 до 17,8 Ом·м. Характер насыщенности по ГИС – продукт. При испытании получен приток газа и газоконденсата (14,54 $м^3$/сут, 10,26 $м^3$/сут соответственно).

Упругие свойства пород в данном интервале характеризуются сложным и малоконтрастным характером изменения. На рис. 3, а, приведены гистограммы распределения интервальной скорости, построенные для анализа контрастности между проницаемыми и непроницаемыми разностями. Построение гистограмм проводилось в режиме попластовых отсчетов.

Как видно из рисунка, диапазоны изменения исследуемого параметра практически не отличаются в коллекторах от непроницаемых разностей, что определяет невозможность выделения коллекторов путем прямого литологического толкования сейсмических аномалий.

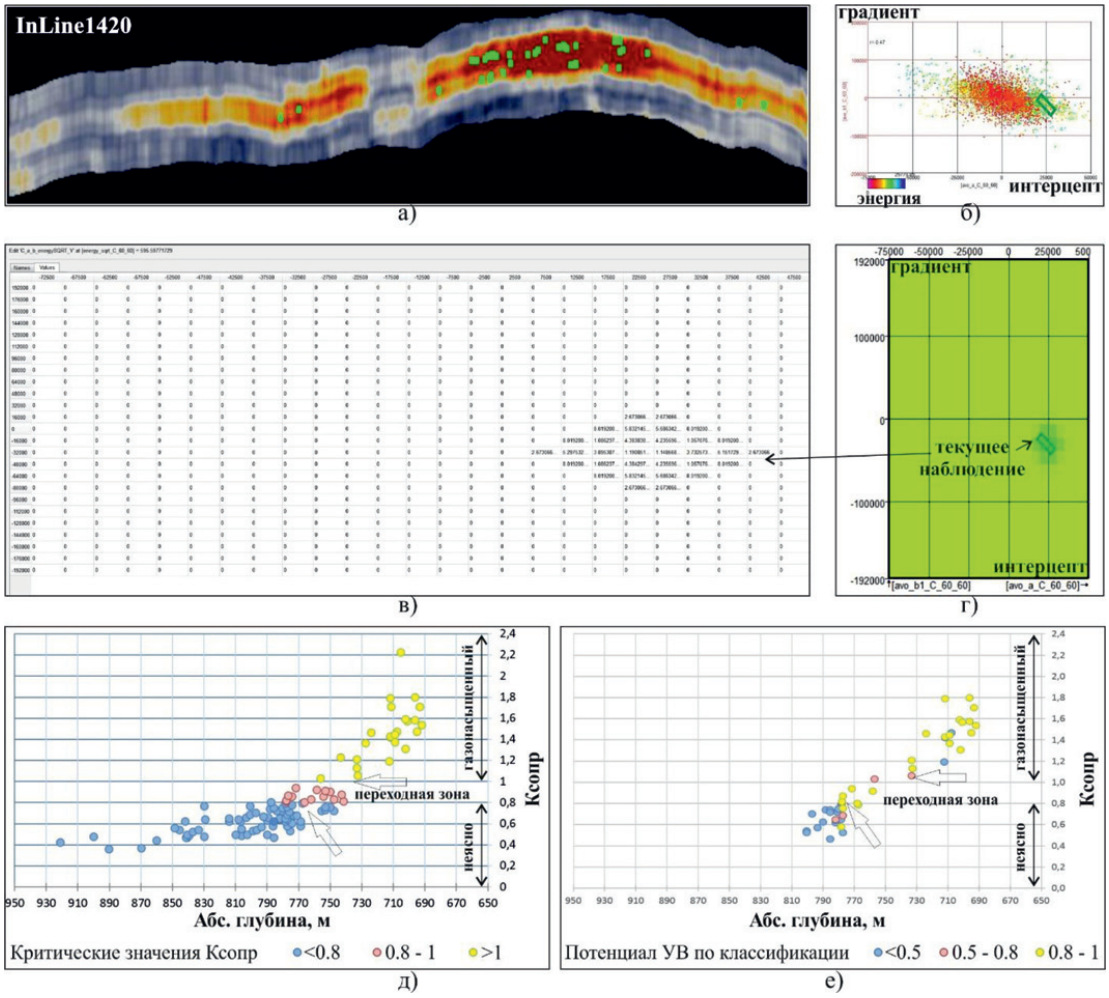

Рис. 2. Оценка результатов проведения классификации: а) вертикальный срез куба вероятности (InLine1420); б) кроссплот «интерцепт – градиент»; в) табличный формат записи эталона в значениях функции плотности вероятности; г) графический формат записи эталона в значениях функции плотности вероятности; д) критические значения, соответствующие газонасыщенной части пласта в пределах данного месторождения; е) результирующая модель потенциала УВ по проведенной классификации

Анализ сейсмических данных

На временных сейсмических разрезах в интервале отложений малышевской свиты в окрестностях скв. 3 наблюдается аномалия типа «яркое пятно» (рис. 3, б–г).

Визуальный анализ временных сейсмических разрезов показывает, что в пределах исследуемой площади в данном интервале есть еще подобные аномалии, связь которых с продуктивностью не установлена по данным бурения.

Для исследования потенциала газоносности выявленных аномалий проводился анализ вариаций амплитуд с удалением (AVO) по сейсмограммам. Способность выявлять газоносность пород сделала данный вид сейсмической интерпретации стандартом при изучении потенциально перспективных отложений.

В основу данной методики положено уравнение Цеппритца о том, что ближние сейсмические трассы несут информацию об акустических импедансах (акустической жесткости среды), дальние – о контрасте коэффициента Пуассона [5].

В окрестностях скважины 3 (на пересечении InLine 1830 и CrossLine 1757) по сейсмограммам с ВСА был проведен анализ изменения амплитуд с удалением, построены кроссплоты «интерцепт – градиент» (рис. 3, б–г) и определен тип аномалий – по принятой в AVO классификации наблюдаемое поведение амплитуд соответствует 2 типу.

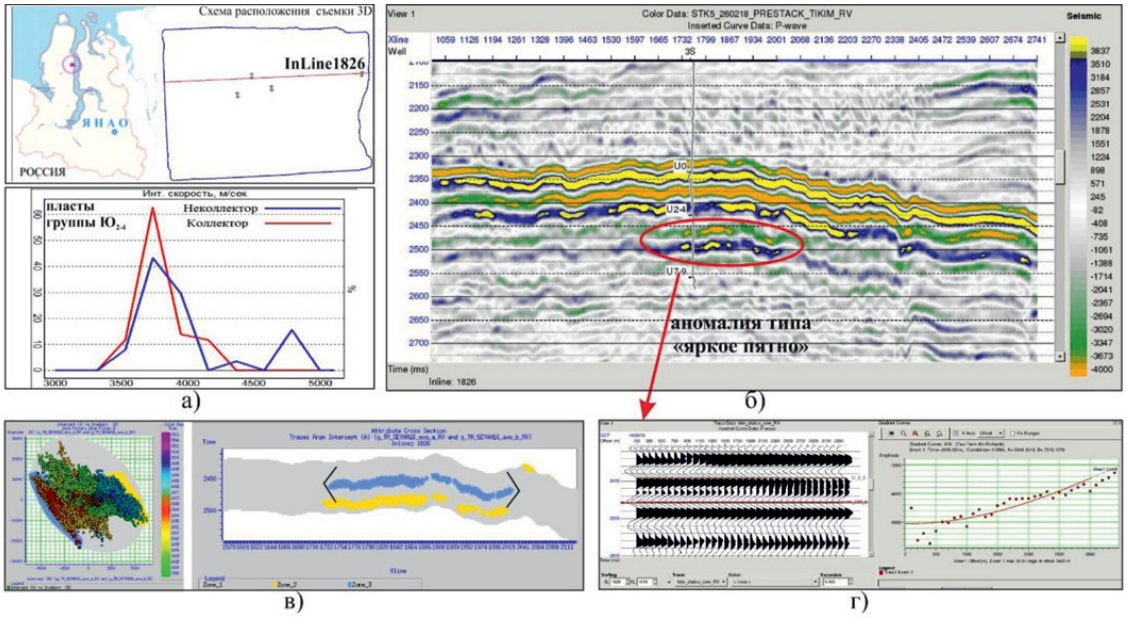

Рис. 3. Анализ сейсмогеологической информации в интервале верхней юры:
а) гистограммы распределения упругих характеристик по данным ГИС;
б) AVO-интерцепт по InLine 1826; в) кроссплот зависимости AVO-атрибутов;
г) анализ изменения амплитуд в окрестностях скв. 3 по сейсмограммам (InLine 1826, CrLine 1815)

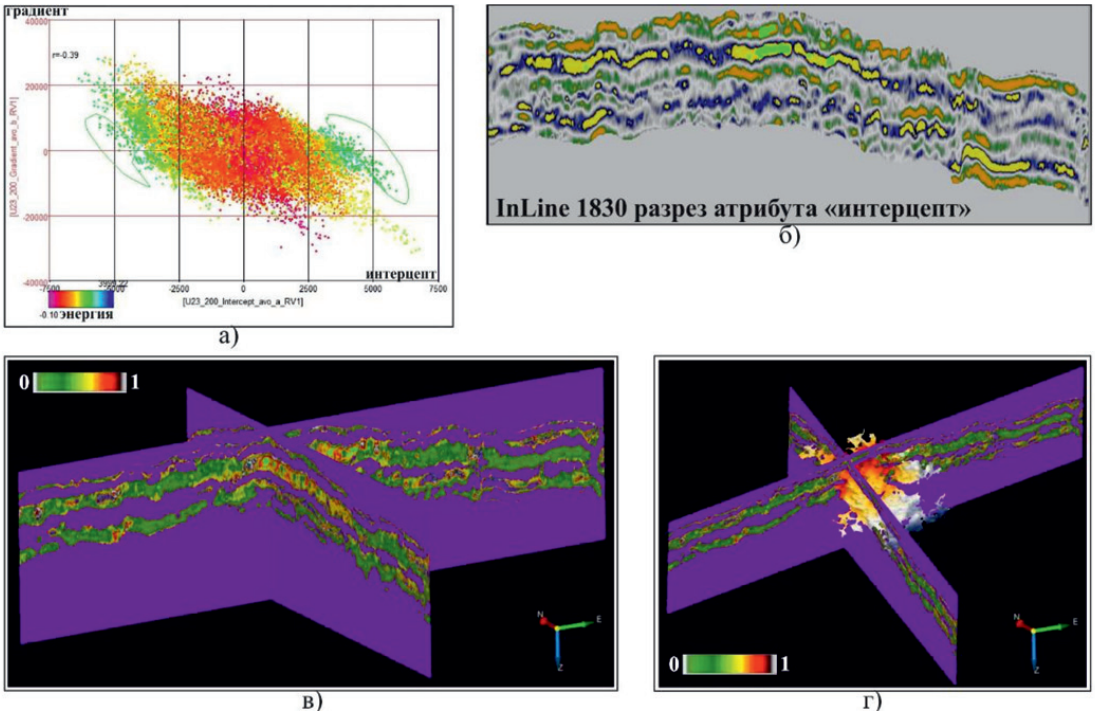

Рис. 4. Определение потенциала газоносности по методике классификации Байеса, выполненной на основе кроссплотов AVO: а) селекция области, ассоциируемой с эффектом «яркого пятна» на кроссплоте «интерцепт – градиент»; б) селекция области, ассоциируемой с эффектом «яркого пятна» на разрезе «интерцепта»; в) вертикальные срезы куба вероятности; г) вертикальные срезы куба вероятности в сопоставлении с аномалией, выделенной по сейсмическим данным

Потенциал газоносности данного интервала оценивался по методике классификации Байеса, выполненной на основе кроссплотов AVO.

Интерпретация результатов кроссплотов AVO и классификации по Байесу

Выбор информативных для классификации атрибутов осуществлялся по трехмерным кроссплотам AVO – в окрестностях скважины 3 (InLine 1830) эффективными являются энергия и частота. На рис. 4, а, б, показан расчет кроссплотов «интерцепт – градиент» с использованием третьего информативного параметра (атрибут «энергия») в цветовой кодировке и селекция области, ассоциируемой с эффектом «яркого пятна». Расчет функции плотности вероятности для выбранной области значений сохранялся в виде графика «интерцепт – градиент» – атрибут «энергия».

По алгоритму условной вероятности Байеса на основе атрибутов «интерцепт», «градиент» и «энергия отраженной волны» была проведена классификация. Сейсмические аномалии, выявленные и отнесенные ко 2 типу AVO-аномалий, отождествляются с потенциально перспективными участками в объеме куба классификации (рис. 4, в, г).

Выводы

1. Разработанная методика классификации Байеса на основе кроссплотов AVO может использоваться для экспресс-анализа сейсмических данных в случаях, когда необходимо оценить вероятность потенциала перспектив изучаемых аномалий в сейсмическом волновом поле по эталонным образцам.

2. Существует определенный потенциал в отношении совершенствования методики – например, на основе матрицы функции плотности вероятности можно получить матрицу коэффициентов корреляции атрибутов, для того, чтобы перейти к факторному анализу данных.

3. В связи с тем, что классификация проводилась по суммарным разрезам, можно ожидать, что существует определенный потенциал в отношении чистоты и устойчивости эксперимента посредством целевой предобработки сейсмических данных.

Данная работа проводилась на базе материалов, систематизированных и обработанных в ООО «ИНГЕОСЕРВИС» (г. Тюмень). Автор выражает свою благодарность руководству компании за предоставленные материалы.

Список литературы / References

1. John P. Castagna. Recent advances in seismic lithologic analysis. Geophysics. 2001. Vol. 66. No. 1. P. 42–46.

2. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R.M. / пер. с англ. П.А. Волкова. ДМК Пресс. 2014. 588 с.

Kabakoff R.I. R in action. Data analysis and graphics R. Original English language edition published by Manning Publications Co., Rights and Contracts Special Sales Department, 20 Baldwin Road, PO Box 261, Shelter Island, NY 11964 ©2012 by Manning Publications Co.. Russian-language edition copyright © 2013 by DMK Press. All rights reserved.

3. Черепанов В.В., Пятницкий Ю.И., Хабибулин Д.Я., Ситдиков Н.Р., Варягов С.А., Нерсесов С.В., Оглодков Д.Ю. Разработка технологии освоения нетрадиционных коллекторов надсеноманских отложений на этапе геологоразведочных работ с целью вовлечения ресурсной базы газовых месторождений ОАО «Газпром» в Ямало-Ненецком автономном округе // Георесурсы. 2014. № 4. С. 59–64.

Cherepanov V.V., Pyatniskiy Yu.I., Khabibulin D.YA., Sitdikov N.R., Varyagov S.A., Nersesov S.V., Oglodkov D.Yu. Development of Above-Cenomanian Unconventional Reservoirs during Exploration Stage. Involvement of Resource Base of Gazprom Gas Fields in Yamal- Nenets Autonomous District // Georesursy. 2014. № 4. P. 59–64 (in Russia).

4. Феоктистова О.В. Определение классов потенциальной продуктивности сенонских отложений Севера Западной Сибири на основе корреляционных связей сейсмических атрибутов по технологии AVO-анализа с использованием трехмерных кроссплотов // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 160–166.

Feoktistova O.V. The Definition of Classes of Potential Productivity Senensky Sediments Based on Corelation of Seismic Attributes for Conditions of West Siberian North // Advances in current natural sciences. 2018. № 4. P. 160–166 (in Russia).

5. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. Published in the United States of America by Cambridge University Press. N.Y., 2009 [Electronic resource]. URL: www.cambridge.org/9780521861366 (date of access: 18.02.2018).