

УДК 550.7:551.243.4:553.98(571.56)

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА AVO НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ АМПЛИТУД И АМПЛИТУД СПЕКТРА СИГНАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ

Феоктистова О.В., Захарова Г.А.

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

Анализ изменения амплитуды сейсмического сигнала с удалением (amplitude versus offset – AVO) является традиционной технологией, используемой для выявления в сейсмическом волновом поле аномалий, связанных с УВ. Сложная и высокоорганизованная технология AVO не всегда дает однозначное толкование амплитудных аномалий и часто нуждается в комплексировании с другими методами сейсмического анализа. Одной из проблем, возникающих на пути толкования сейсмических аномалий, является отсутствие четких границ их локализации на кроссплотах «интерцепт – градиент». Эта неопределенность затрудняет выделение объекта в волновом поле или интерпретацию о его связи с углеводородами. Методика совместного анализа AVO и амплитуд спектра сигнала в зависимости от частоты позволяет определить полосу частот, в которой эффекты AVO выделяются более надежно. Расчет амплитуд спектра сигнала по частичным суммарным сейсмическим разрезам для разных углов падения отраженных волн (ближних 0° – 9° и дальних 19° – 27°) и расчет диаграмм их распределений выполнялся с использованием новых технологий анализа данных, способных в интерактивном режиме выполнять статистические оценки и использовать возможности графического анализа данных в общем цикле технологии AVO. Применение комплексного подхода с использованием новых методик и инструментов анализа позволяет повысить эффективность метода AVO. Эффективность заключается в более четком выделении и оконтуривании амплитудных аномалий на сейсмических разрезах и кроссплотах AVO и возможном обнаружении новых, которые не проявлялись в записи при регистрации в широкой полосе частот.

Ключевые слова: сейсмическая аномалия, «яркое пятно», AVO, преобразование Фурье, анализ распределений, «big data»

NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF AVO TECHNOLOGY BASED ON INTEGRATED ANALYSIS OF SEISMIC AMPLITUDES AND AMPLITUDES OF THE SPECTRUM DEPENDING ON THE FREQUENCY

Feoktistova O.V., Zakharova G.A.

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

The analysis of the amplitude versus offset (AVO) variation of the amplitude of a seismic signal is a traditional technology used to detect anomalies associated with a shock wave in a seismic wave field. The sophisticated and highly organized AVO technology does not always provide an unambiguous interpretation of amplitude anomalies and often needs to be combined with other methods of seismic analysis. One of the problems that arise in the interpretation of seismic anomalies is the lack of clear boundaries for their localization on intercept-gradient cross-plots. This uncertainty makes it difficult to isolate an object in a wave field or to interpret its relationship with hydrocarbons. The technique of joint analysis of AVO and amplitudes of the signal spectrum depending on the frequency allows us to determine the frequency band in which AVO effects are more reliably distinguished. The calculation of the amplitudes of the signal spectrum from partial total seismic sections for different angles of incidence of the reflected waves (near 0° – 9° and far 19° – 27°) and calculation of their distribution diagrams, was performed using new data analysis technologies, that can interactively perform statistical estimates and use the capabilities of graphical data analysis in the general cycle of AVO technology. The application of an integrated approach using new techniques and analysis tools can increase the efficiency of the AVO method. Efficiency consists in clearer identification and contouring of amplitude anomalies in seismic sections and cross-slots of AVO and the possible detection of new ones that did not appear in the recording during registration in a wide frequency band.

Keywords: seismic anomaly, bright spot, AVO, Fourier transform, distribution analysis, «big data»

В сейсмическом волновом поле самую высокую чувствительность к флюиду обнаруживают низкие частоты. Этот эффект был продемонстрирован еще в 2000-х гг. на основе сейсмических данных и исследований, включающих лабораторные испытания и скважинные измерения. Несколько исследователей также показали, что углеводородные резервуары имеют частотную зависимость от смещений амплитуд (AVO) [1]. С использованием методов моделирования эффектов AVO для разных частот были получены результаты,

свидетельствующие о наличии различий в спектральном содержании сейсмических данных, которые могут быть использованы для улучшения идентификации AVO. Данную информацию авторы использовали для интерпретации аномалий, наблюдаемых на участках iso-частот.

Заслуживают внимания также результаты интерпретации, представленные в одной из публикаций, где автор продемонстрировал пользу фильтрации, выделив амплитудные аномалии, которые на атрибутивных сейсмических данных полного спектра выделить

затруднительно [2]. Исходя из опубликованных материалов представляется, что частота 20–25 Гц является лучшей для выявления эффектов AVO, в то время как высокие частоты, по-видимому, не способствуют выявлению эффектов AVO, и их присутствие в полном спектре данных потенциально ухудшает результат данных полного спектра.

Эти идеи сформировали предпосылку для изучения опыта, где комбинация методов SD (спектрального разложения) и AVO применялась для идентификации амплитудных аномалий на разных частотах.

Цель исследования: поиск приемов комплексирования методов SD (спектрального разложения) и AVO для идентификации амплитудных аномалий, связанных с УВ.

Материалы и методы исследования

Данная работа проводилась на базе материалов, систематизированных и обработанных в ООО «ИНГЕОСЕРВИС» (г. Тюмень).

Проведенные исследования базировались на основе сейсмической информации и данных ГИС. Выбор методов основывался на теории и опыте, изложенном в предшествующих трудах [1, 2]. Для исследовательских задач использовались программные комплексы: Hampson Russel, OpendTect, RStudio, Office.

Теоретические основы

Анализ изменения амплитуды сейсмического сигнала с удалением (amplitude versus offset – AVO) является традиционной технологией, используемой для выявления в сейсмическом волновом поле аномалий, связанных с УВ. Сложная и высокоорганизованная технология AVO не всегда дает однозначное толкование амплитудных аномалий и часто нуждается в комплексировании с другими методами сейсмического анализа.

Одной из проблем, возникающих на пути толкования сейсмических аномалий, является отсутствие четких границ их локализации на кроссплотах «интерцепт-градиент». Эта неопределенность затрудняет выделение объекта в волновом поле или интерпретацию о его связи с углеводородами.

Анализ амплитуд спектра сигнала в зависимости от частоты и удалений позволяет определить интервал частот, в котором эффекты AVO выделяются более надежно. В основе данного подхода лежит связь амплитуды сигнала с амплитудой спектра в зависимости от частоты, установленная на основе преобразования Фурье.

Спектральные функции в сейсморазведке применяются для оценки вклада энергии

гармонических составляющих с определенным диапазоном частот в общую энергию изучаемого колебательного процесса.

Спектр сигнала – упорядоченный набор коэффициентов разложения сигнала:

$$C_n = 2/T * U_1(jn\Omega),$$

где C_n – коэффициент разложения сигнала; T – период колебаний; $U_1(jn\Omega)$ – спектральная плотность сигнала в зависимости от частоты; n – номер гармоники; Ω – круговая частота первой гармоники ($2\pi/T$).

Спектральная плотность – это коэффициент пропорциональности вклада в сигнал каждой гармоники, разделенного на предельно малый интервал частот ($\Delta\omega$), в пределах которого вклад можно считать постоянным, рассчитывается по формуле

$$S(j\omega) = \int S(t) * e^{-j\omega t} * dt$$

(прямое преобразование Фурье),

где $S(j\omega)$ – спектральная плотность в зависимости от частоты; $S(t)$ – сигнал; $e^{-j\omega t}$ – сдвиг гармоники относительно периода колебаний.

Вклад в сигнал гармоник зависит от их амплитуд и сдвигов относительно периода сигнала и рассчитывается как

$$S(j\omega) * e^{j\omega t},$$

где $S(j\omega)$ – амплитуда гармоники на частоте ω ; $e^{j\omega t}$ – сдвиг гармоники относительно периода колебаний.

С учетом выполнения условия порога частоты дискретизации (частоты Найквиста) в рамках сейсморазведки можно получить дискретный спектр при использовании дискретного преобразования Фурье, в котором частоту остроконечного пика с некоторым приближением можно отождествить с частотой максимальной амплитуды сигнала.

Разложение сигнала по гармоническим функциям описывается уравнением

$$S(t) = 1/2\pi \int S(j\omega) * e^{j\omega t} d\omega$$

(обратное преобразование Фурье),

где $S(\omega)$ – амплитуда гармоники на конкретной частоте; $e^{j\omega t}$ – смещение ее начальной фазы относительно периода сигнала.

Таким образом, прямое и обратное преобразование Фурье служит для адекватного представления одного и того же процесса в пространстве времени и пространстве частоты.

Связь сигнала со спектром демонстрируется ниже:

$$S(t) = \sum C_n e^{jn\Omega t},$$

где $C_n e^{jn\Omega t}$ – коэффициенты разложения сигнала, умноженные на фазовые множители, зависящие от частоты и сдвига.

Это уравнение позволяет по спектру определить частоту сигнала, при которой сумма его гармоник будет максимальной.

Основные принципы методики комплексирования AVO и CD (спектрального разложения) могут быть выбраны только путем моделирования и экспериментальных исследований на разбуренных площадях ввиду многообразия моделей залежей, нетрадиционности подхода, базирующегося на предположении о соответствии величины затухания в зависимости от угла падения луча подлинным эффектам AVO, и сложности самих методов.

Таким образом, возможность получения максимальной амплитуды сигнала путем его регистрации в узкой полосе частот, подобранной по исходному спектру предполагаемой ловушки, может существенно повысить эффективность AVO-анализа за счет улучшения отношения сигнал/помеха. Более яркая динамическая выразительность сигнала на ближних и дальних расстановках повысит надежность расчетных атрибутов «интерцепт» и «градиент», а также качество их графических преобразований. Возможно обнаружить новые, которые не проявлялись при регистрации записи в широкой полосе частот [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Опробование эффективности комплексирования AVO и спектрального разложения проводилось на фактическом материале в интервалах, где наличие газа было ранее подтверждено бурением в скважинах. Па-

раметры упругих свойств моделей залежей были получены осреднением замеренных значений каротажных диаграмм полноволнового акустического каротажа в исследуемых интервалах. Исследование эффектов AVO проводилось на профилях 3D, проходящих через тестовые скважины.

Определение интервала полосы частот, позволяющего учесть расхождение в спектрах ближних и дальних расстановок, выполнялось на основе анализа диаграмм их распределений. Эффективность полосы частот, выбранной в результате совместного анализа сейсмических амплитуд и амплитуд спектра сигнала, оценивалась по кроссплотам «интерцепт-градиент», временным сейсмическим разрезам и разрезам атрибутов. Сравнивалась яркость свечения амплитуд, разброс значений на графиках «интерцепт-градиент» и четкость контуров аномалий.

Исходя из результатов опробования по имеющемуся фактическому материалу удалось установить эффективность применения фильтрации в определенном диапазоне частот для III класса аномалий, а также выявить перспективные направления для дальнейшей разработки данного способа комплексирования. Ниже приводятся результаты экспериментальных работ.

Эффект аномального усиления амплитуд на сейсмических разрезах наблюдался в интервале, соответствующем терригенным отложениям яронгской свиты (пласты XM₆₋₇) в окрестностях скв. 3. Сейсмостратиграфическая привязка в целевом интервале газоносных пластов XM₆₋₇ яронгской свиты по скв. 3 приведена на рис. 1.

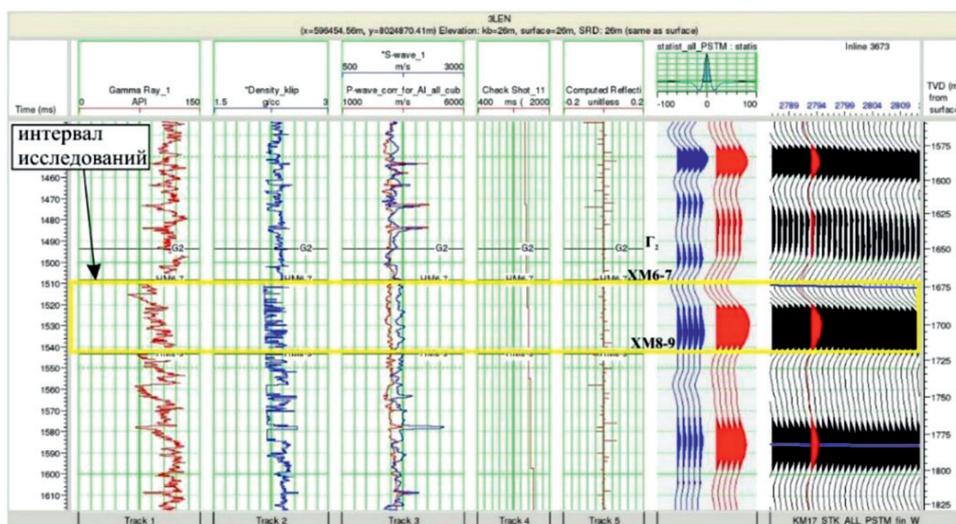


Рис. 1. Сейсмостратиграфическая привязка по скв. 3

Особенности строения продуктивных пластов яронгской свиты и их характеристики по отношению к вмещающим породам – упругие параметры и параметры ФЕС – изучались по данным каротажных диаграмм и результатам интерпретации ГИС. Из анализа каротажных данных следует, что литотипы яронгской свиты достаточно контрастны по параметрам AI (акустический импеданс) и V_p/V_s (отношение скоростей продольной и поперечной волн) и есть все основания для проведения AVO-анализа [3, 4]. По данным интерпретации коллекторы рассматриваемых свит характеризуются хорошими фильтрационно-емкостными свойствами.

По имеющимся замерам интервального времени пробега продольной и поперечной волн акустического каротажа (АКШ) были рассчитаны осредненные значения V_p , V_s , AI для схематичного представления модели продуктивного интервала газоносных пластов XM_{6-7} во вмещающих породах (модель 1, рис. 2).

Анализ изменений амплитуд с удалением по сейсмограммам с ВСА показывает тренд, соответствующий тренду кривых коэффициентов отражения III класса [5].

Для определения полосы частот, в которой эффект изменения амплитуд проявляется максимально, был проведен анализ амплитуд спектра сигнала в зависимости от частоты и удалений. Из приведенной диаграммы (рис. 3) следует, что максимальный эффект AVO следует ожидать на резонансной частоте 18–20 Гц. На представленных кроссплотах «интерцент – градиент» (рис. 4) видно, что по сейсмическим данным с фильтрацией на частоте 18–20 Гц более четко проявляются признаки наличия УВ в данном интервале разреза, в то время как высокочастотная часть данных не несет полезной информации для выявления УВ.

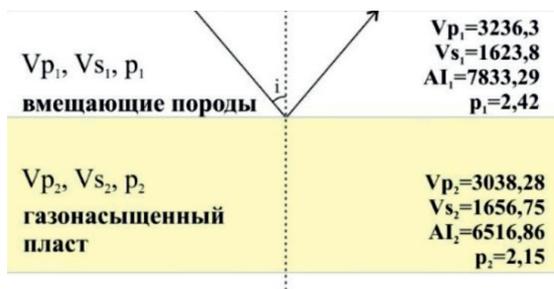


Рис. 2. Двухслойная модель среды (модель 1)

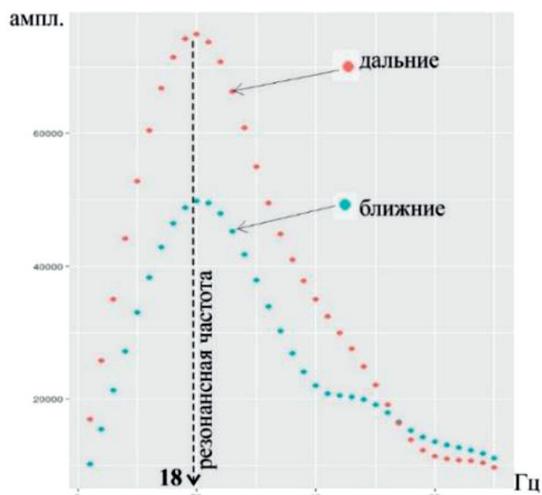


Рис. 3. Диаграмма распределения амплитуды спектра

На данной площади проводился также анализ возможности проведения эффективного комплексного подхода в интервале отложений пластов ТП. Анализ каротажных диаграмм в продуктивном интервале танопчинской свиты по скважинам рассматриваемого месторождения показал, что флюид в данных отложениях сосредоточен в тонких пропластках (в среднем 1–3 м), переслаивающихся с тонкими пропластками углей и плотных пород, которые, по отношению к вмещающим породам, характеризуются высокой акустической контрастностью. Оценка влияния затухания в тонких пластах танопчинской свиты на эффекты AVO и моделирование данного эффекта в сейсмическом волновом поле является специальной темой исследований, включающей в себя изучение влияния суммарной мощности газовых пропластков, суммарной мощности переслаивающихся пород, их отношения. Эти соотношения, судя по данным ГИС скважин изучаемого месторождения, меняются существенно, создавая в сейсмическом волновом поле динамически неустойчивую картину.

В таком случае необходимо определить тот порог, за пределами которого интерпретация AVO становится невозможной для прогноза УВ. Поэтому для выявления объектов в танопчинской свите по данной методике требуется проведение дальнейших экспериментов, включающих в себя моделирование волнового поля и набор статистики по этой и другим площадям.

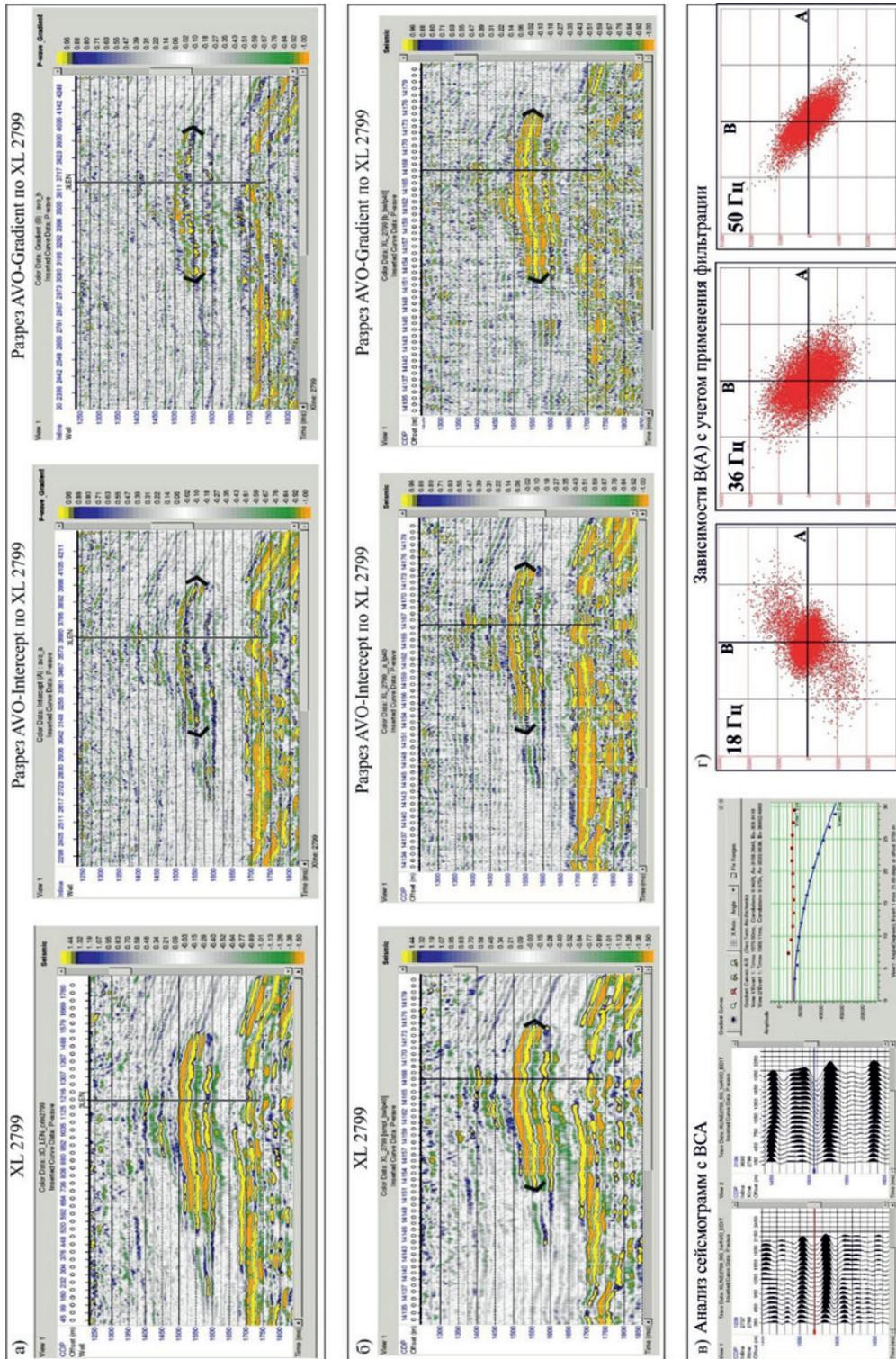


Рис. 4. Результаты AVO-анализа: а) по исходным сейсмическим данным в широкой полосе частот; б) по данным с полосовой фильтрацией; в) анализ изменений амплитуд с удалением по сейсмограммам с ВСА в окрестностях аномалии (синий) и за ее пределами (красный); г) кроссплоты «интерцепт – градиент» с учетом применения фильтрации

Выводы

Таким образом, экспериментальными работами установлено повышение эффективности технологии AVO посредством спектрального разложения. Данная методика использовалась в качестве дополнительной для более надежной классификации эффектов AVO. Эффективность методики заключается в более четком выделении и оконтуривании амплитудных аномалий на сейсмических разрезах и кроссплотах AVO и возможном обнаружении новых, которые не проявлялись в записи при регистрации в широкой полосе частот.

Экспериментальные работы с целью оценки эффективности комплексирования AVO и CD (спектрального разложения) необходимо продолжить в других сейсмогеологических условиях. Тестирование на разнообразных сейсмогеологических моделях с привлечением моделирования волнового поля позволит оценить эффективность методики в зависимости от меняющихся параметров временной мощности резервуара, слоистости отложений и ме-

няющихся параметров ФЕС предполагаемой ловушки и вмещающих пород. Набор и обобщение результатов экспериментов позволит выработать детальные рекомендации по выбору интервалов для расчета AVO-атрибутов и подбору параметров полосового фильтра, а также позволит более четко обозначить ограничения использования метода.

Список литературы / References

1. Ren H., Goloshubin G., Hilterman F. Spectra crossplot. *Leading Edge*. 2007. vol. 26. № 12. P. 1562–1566. DOI: 10.1190/1.2821943.
2. Han C. Spectral Decomposition AVO attributes for identifying potential hydrocarbon-related frequency anomalies. *First Break*. 2019. vol. 37. № 5. P. 89–97.
3. Avseth P. Seismic Screening for Hydrocarbon Prospects Using Rock. EAGE E-Lecture. 2015. [Electronic resource]. URL: <https://yandex.ru/video/preview?filmId=4484431675505921355&text=Per%20Avseth&noreask=1&path=wizard> (date of access: 20.08.2019).
4. Avseth P. Rock Physics and Seismic Reservoir Prediction by Per Avseth. EAGE E-Lecture. 2013. [Electronic resource]. URL: <https://yandex.ru/video/preview?filmId=15341126205829082727&text=Per%20Avseth&noreask=1&path=wizard> (date of access: 20.08.2019).
5. Chopra S., John P. Castagna. AVO. *Investigations in Geophysics Series*. 2014. № 16. 287 p.