
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

АПРЕЛЬ № 2 2018 ИЮНЬ

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

д-р физ.-мат. наук Ю.П. Ампилов, д-р физ.-мат. наук И.О. Баяк, д-р физ.-мат. наук М.Л. Власов,
д-р геол.-мин. наук А.Ф. Глебов, д-р физ.-мат. наук В.Н. Глинских, д-р техн. наук Г.Н. Гогоненков,
д-р физ.-мат. наук М.С. Денисов, д-р техн. наук И.Н. Ельцов, д-р техн. наук А.Ф. Еманов,
д-р техн. наук А.П. Жуков, д-р техн. наук Ю.И. Колесников, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук
В.А. Конторович, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук Ю.И. Кулаков, д-р техн. наук Э.Е. Лукьянов,
чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук П.С. Мартышко, д-р физ.-мат. наук Г.М. Митрофанов, чл.-к. РАН,
д-р физ.-мат. наук И.Б. Петров, д-р геол.-мин. наук Е.В. Поспеева, д-р геол.-мин. наук В.С. Селезнев,
д-р геол.-мин. наук В.Д. Суворов, д-р техн. наук А.П. Сысоев, д-р техн. наук Г.М. Тригубович,
д-р физ.-мат. наук В.А. Чеверда, д-р техн. наук М.Б. Шнеерсон, д-р техн. наук Г.А. Шехтман

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 2	Апрель–июнь 2018
----------------	-------------------------------	-----	---------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Хемраев К.А. Использование преломленных волн в поверхностно-согласованных процедурах коррекции динамики.	4
Нефедкина Т.В., Лыхин П.А., Дугаров Г.А. Определение упругих параметров азимутально-анизотропных сред из многоволновых AVOA-данных методом нелинейной оптимизации.	14
Дучков А.Д., Соколова Л.С., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е. К вопросу о поисках месторождений гидратов метана в областях распространения криолитозоны.	27
Дугаров Г.А., Дучков А.А., Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Купер К.Э., Фокин М.И., Дробчик А.Н. Лабораторное исследование образцов, содержащих гидрат метана нецементирующего типа.	41

Founded in 2004	Quarterly	No 2	April-June 2018
-----------------	-----------	------	--------------------

CONTENTS

Khemraev K.A. The use of refracted waves in surface-consistent procedures of dynamic correction.	4
Nefedkina T.V., Lykhin P.A., Dugarov G.A. Determination of azimuthal anisotropic media elastic parameters from multiwave AVOA data by nonlinear optimization method.	14
Duchkov A.D., Sokolova L.S., Zheleznyk M.N., Ayunov L.E. To the question about the search fields of methane hydrates in the areas of permafrost distribution.	27
Dugarov G.A., Duchkov A.A., Duchkov A.D., Manakov A.Yu. Kuper K.E., Fokin M.I., Drobchik A.N. Laboratory study of sand samples containing methane hydrate of non-cementing type	41



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН В ПОВЕРХНОСТНО-СОГЛАСОВАННЫХ ПРОЦЕДУРАХ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИКИ

К.А. Хемраев

*Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Россия
e-mail: kerim.khemraev@mail.ru*

В настоящей работе с помощью лучевого моделирования рассматривается возможность трехфакторной декомпозиции поля амплитуд преломленных волн. В связи с тем, что решение, полученное на основе рассматриваемой математической модели, неустойчиво, предлагается условие его регуляризующее. Возможность применения рассматриваемой математической модели продемонстрирована в условиях рефракции и погруженных объектов.

Поверхностно-согласованная деконволюция, коррекция амплитуд, обработка, интерпретация, факторная декомпозиция

THE USE OF REFRACTED WAVES IN SURFACE-CONSISTENT PROCEDURES OF DYNAMIC CORRECTION

K.A. Khemraev

*Saint-Petersburg Mining University, 21-th line of Vasilevsky Island, 2, St Petersburg, 199106, Russia,
e-mail: kerim.khemraev@mail.ru*

In the given paper a three factor decomposition of the field of refracted waves is considered with help of ray-tracing. Due to the fact that the solution obtained on the basis of the mathematical model is unstable, a condition is proposed that regularizes the solution. The possibility of applying the considered mathematical model is demonstrated in case of refraction and buried objects.

Surface-consistent deconvolution, amplitude correction, processing, interpretation, factor decomposition

ВВЕДЕНИЕ

Стандартной процедурой коррекции динамических характеристик волнового поля является поверхностно-согласованная коррекция амплитуд (деконволюция), основанная на факторной декомпозиции поля амплитуд отраженных волн. В первую очередь, основной задачей этой процедуры является коррекция записи за неоднородность локальных условий возбуждения и приема. Если верхняя

часть разреза (ВЧР) характеризуется сильной изменчивостью мощности, литологического состава, включает погруженные объекты, то такая ВЧР может значительно искажать динамические характеристики регистрируемых волн и в этом случае целесообразно также учесть динамическое влияние ВЧР. Эта задача может решаться как с помощью отраженных, так и с помощью преломленных волн. В настоящей работе рассматривается возможность факторной декомпозиции поля амплитуд преломленных волн.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение прямой задачи

Решение прямой задачи включает следующие этапы:

- задание скоростной модели и модели коэффициентов затухания;
- выбор плана наблюдений;
- выполнение лучевого моделирования;
- расчет амплитуд зарегистрированных сигналов.

Здесь под затуханием понимается воздействие среды на амплитуду импульса пропорционально пройденному пути.

Рассматриваются три модели, изображенные на рис. 2, 7, 9. Размер сетки всех моделей составляет 5 м как по вертикали, так и по горизонтали. Выбранный план наблюдений для всех рассматриваемых в настоящей работе моделей является частным случаем плана «шестиугольник» (рис. 1). Минимальное удаление источник–приемник составляет 2500 м, максимальное удаление – 3500 м, шаг по источникам равен 50 м и равен шагу по приемникам, длина профиля – 16950 м. Всего на профиле 339 пунктов возбуждения и пунктов приема.

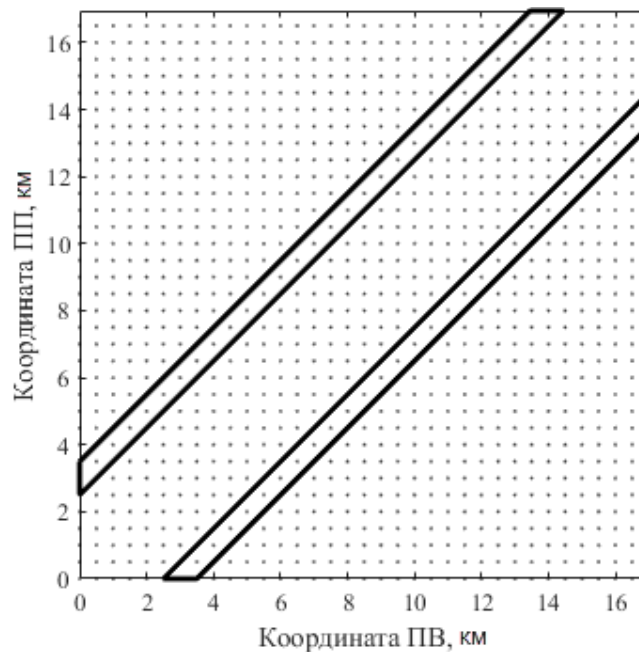


Рис. 1. Используемый план наблюдений

Лучевое моделирование первых вступлений основано на решении уравнения Эйконала для заданной скоростной модели. Затем методом градиентного спуска определяются траектории лучей, соответствующие минимальному времени пробега. Для решения этой задачи использовался набор программ (Toolbox Fast Marching), написанных французским ученым в области прикладной математики Gabriel Peyré в среде Matlab. Более подробно можно ознакомиться здесь [Peyré et al., 2010].

Вычисленные траектории лучей использовались для расчета воздействия среды на амплитуду единичного импульса, при этом, для устранения путаницы со знаками, влияние среды положительно. Геометрическое расхождение в настоящей работе не рассматривается.

Решение обратной задачи

Для описания распространения преломленных волн используется математическая модель, которая в линеаризованном виде представляется как:

$$f_{ij} = a_i + w_{\frac{i+j}{2}} \cdot |i - j| + b_j, \quad (1)$$

где f_{ij} – амплитуда импульса, зарегистрированного на j пункте приема (ПП) от i пункта возбуждения (ПВ); a_i – фактор условий возбуждения; $w_{\frac{i+j}{2}}$ – фактор удаления, относящийся к координате ОСТ $\frac{i+j}{2}$; $|i - j|$ – удаление источник–приемник; b_j – фактор условий приема.

На основе математической модели (1) составляется матрица T и решение ищется методом наименьших квадратов:

$$x = (T' \cdot T)^{-1} \cdot T' \cdot f_{ij},$$

где x – вектор искомых факторов.

В работе [Сысоев, 2012] сказано, что неединственность определения поверхностных факторов на основе математической модели (1) определяется постоянной составляющей. Данный результат подтверждается посредством определения ранга составленной матрицы T для заданного плана наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель 1. Рефракция

Цель рассмотрения первой модели – установление возможности применения математической модели (1) для факторной декомпозиции поля амплитуд преломленных волн при наличии рефракции и криволинейных границ преломления.

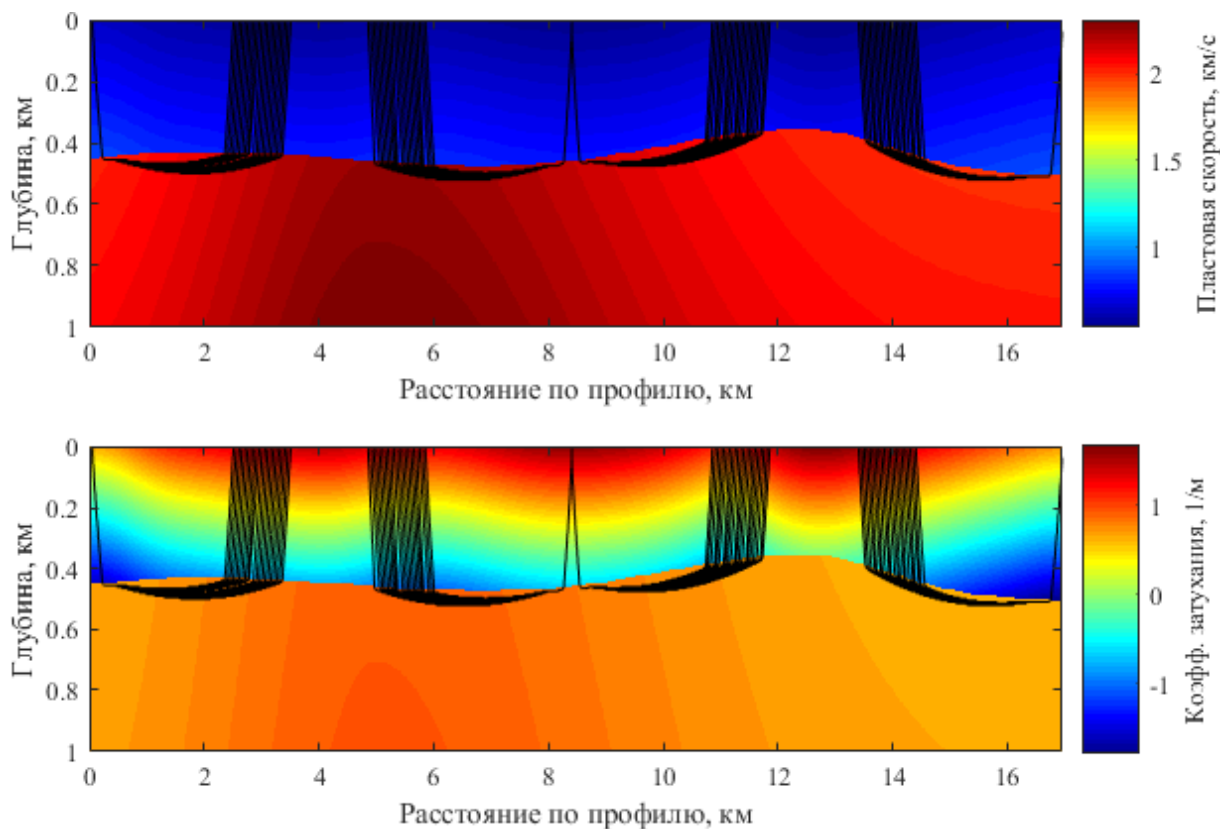


Рис. 2. Модель 1. Наличие рефракции

На рис. 2 показаны скоростная модель и соответствующая ей модель коэффициентов затухания с отображением траекторий лучей от нескольких ПВ. На рис. 3 представлен результат решения обратной задачи. Стоит пояснить, что заданные поверхностные факторы (совокупность факторов за условия возбуждения и за условия приема) в настоящей работе определялись по вертикали до преломляющей границы, а заданный фактор удаления – по кривой вблизи преломляющей границы внутри второго слоя. Также, в случаях, когда решение обратной задачи определено с точностью до постоянной составляющей, для лучшего отображения и сопоставления результатов эта постоянная составляющая искусственно добавлялась в рассчитанные факторы ПВ и ПП. В фактор удаления постоянная составляющая не добавлялась, так как у него отсутствует неединственность определения.

Очевидно (см. рис. 3), что ошибки определения поверхностных факторов имеют низкочастотные тренды. Более того, решение осложнено эффектом «дребезг» («зигзаг»). Эти проблемы связаны с плохой обусловленностью составленной СЛАУ.

Для борьбы с первой проблемой было решено использовать псевдоаприорную информацию [Митрофанов, 1988]. Предположение следующее: низкочастотные составляющие фактора ПВ и фактора ПП равны. В отсутствии неоднородности локальных условий возбуждения и приема, данное предположение вполне объективно.

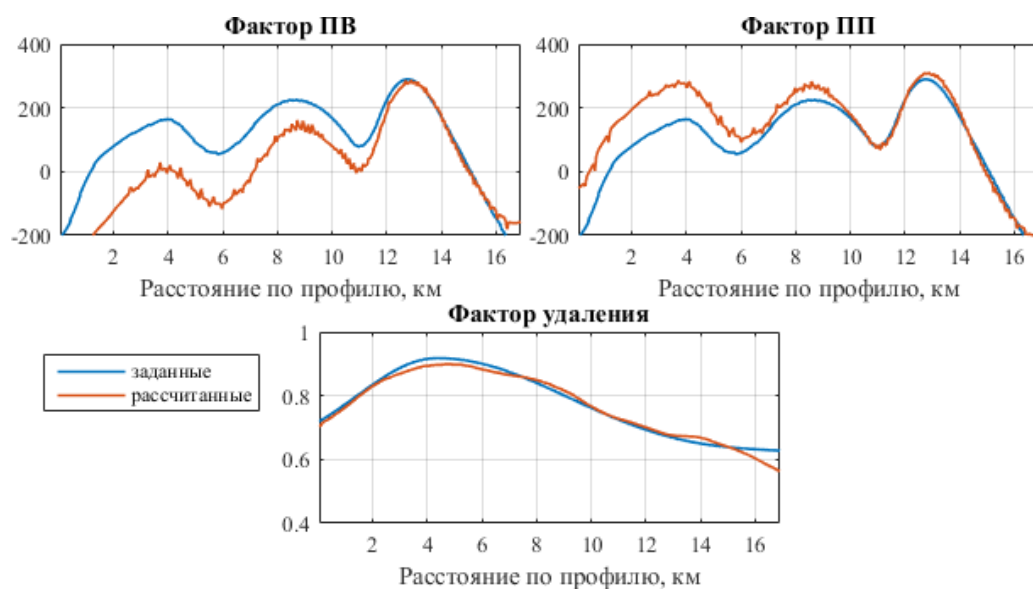


Рис. 3. Результат решения обратной задачи для модели 1

В настоящей работе низкочастотная составляющая выделяется методом скользящего среднего. Таким образом, матрица T дополняется числом уравнений, пропорциональному радиусу осреднения и длине профиля. При стремлении радиуса осреднения к единице, предположение о равенстве низкочастотных компонент вырождается в равенство факторов ПВ и ПП. Для рассматриваемых моделей радиус осреднения был установлен 100 ПВ (ПП).

Результат решения обратной задачи с применением псевдоаприорной информации изображен на рис. 4.

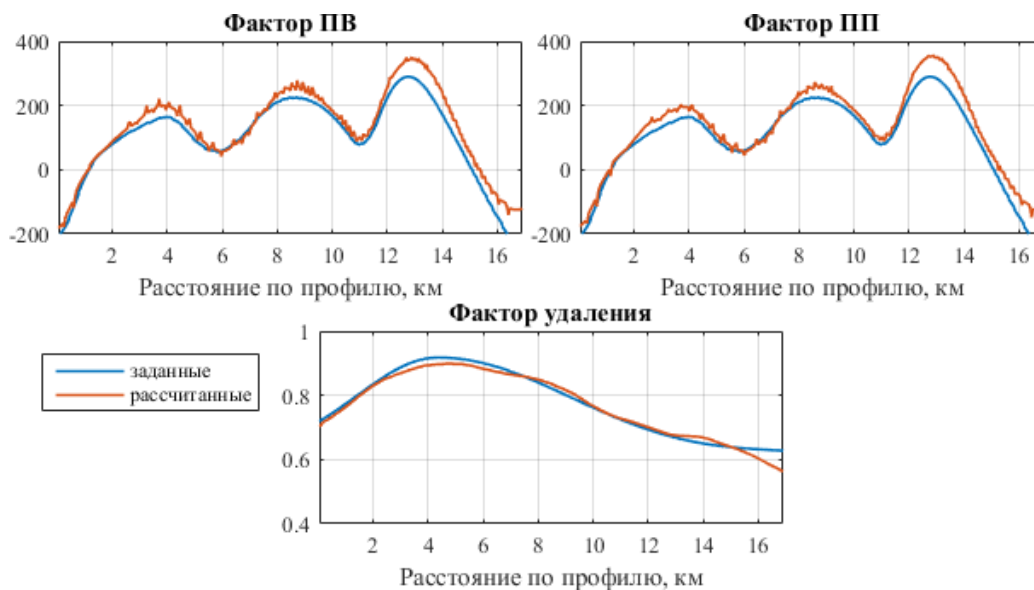


Рис. 4. Результат решения обратной задачи с применением псевдоаприорной информации

Расхождение между заданными и рассчитанными поверхностными факторами стало значительно меньше. Несмотря на то что матрица T перестала быть вырожденной, в общем случае искусственное условие о равенстве средних не позволяет «правильно» определить постоянную составляющую поверхностных факторов, а лишь в равных пропорциях распределяет ее между фактором ПВ и ПП.

В данном случае эффект «дребезг» не представляет проблемы, так как суммарное влияние поверхностных факторов может быть рассчитано через фактор удаления, который определен с достаточной точностью. Более подробно о способах борьбы с данным явлением изложено в работах [Козырев и др., 2003; Сысоев, 2005].

Модель 1. Добавление локальных условий возбуждения и регистрации

В реальном эксперименте, кроме влияния ВЧР, динамика волн зависит от локальных условий возбуждения и регистрации, которые всегда не равны между собой. Предположим, что локальные условия регистрации представлены белым шумом с нулевым средним, а локальные условия возбуждения для лучшего сравнения результатов оставим без изменения.

Результат решения, изображенный на рис. 5, подтверждает утверждение, сделанное в работе [Митрофанов, 1986], локальные условия возбуждения и регистрации могут быть объединены с характеристикой ВЧР. Кроме того, полученное решение достаточно точное.

Теперь предположим, что локальные условия регистрации представлены высокочастотной функцией с низкочастотным трендом.

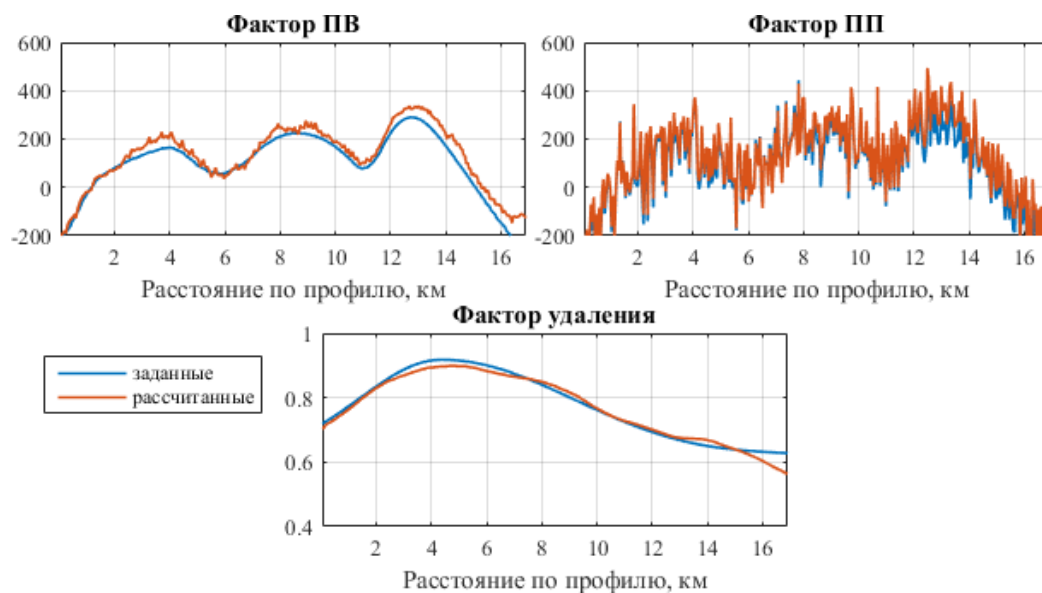


Рис. 5. Решение обратной задачи с применением псевдоаприорной информации при наличии локальных условий регистрации

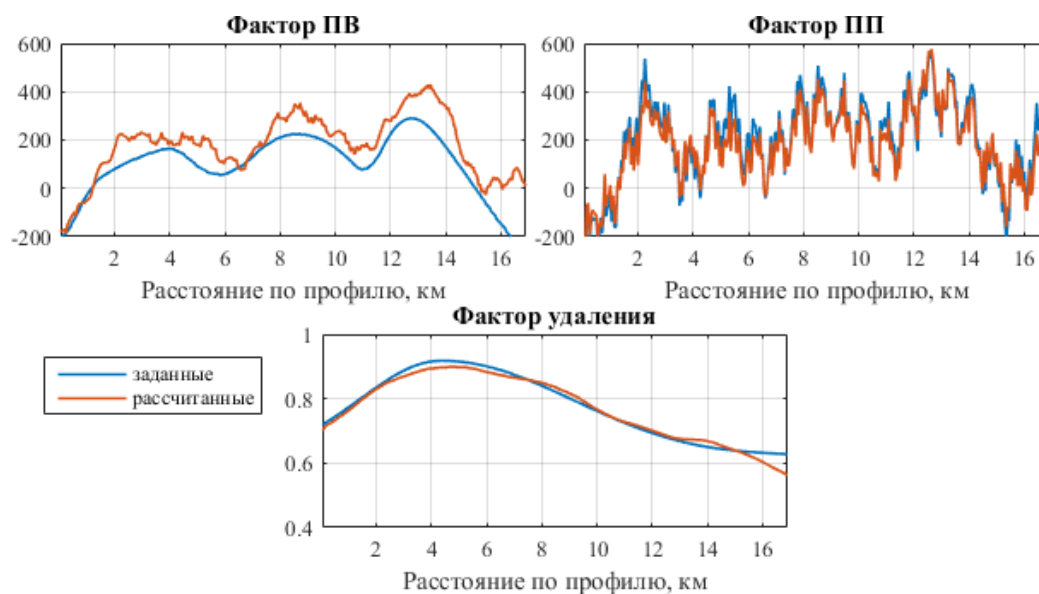


Рис. 6. Решение обратной задачи с применением псевдоаприорной информации при наличии локальных условий регистрации с низкочастотным трендом

Результат вполне ожидаемый, невыполнение искусственно наложенного условия о равенстве низкочастотных составляющих, приводит к перераспределению факторов ПВ и ПП.

Модели 2 и 3. Наличие погруженных объектов

Цель рассмотрения второй и третьей моделей – установить, как влияет наличие высокоскоростного объекта с повышенными значениями коэффициента затухания в ВЧР и во втором слое.

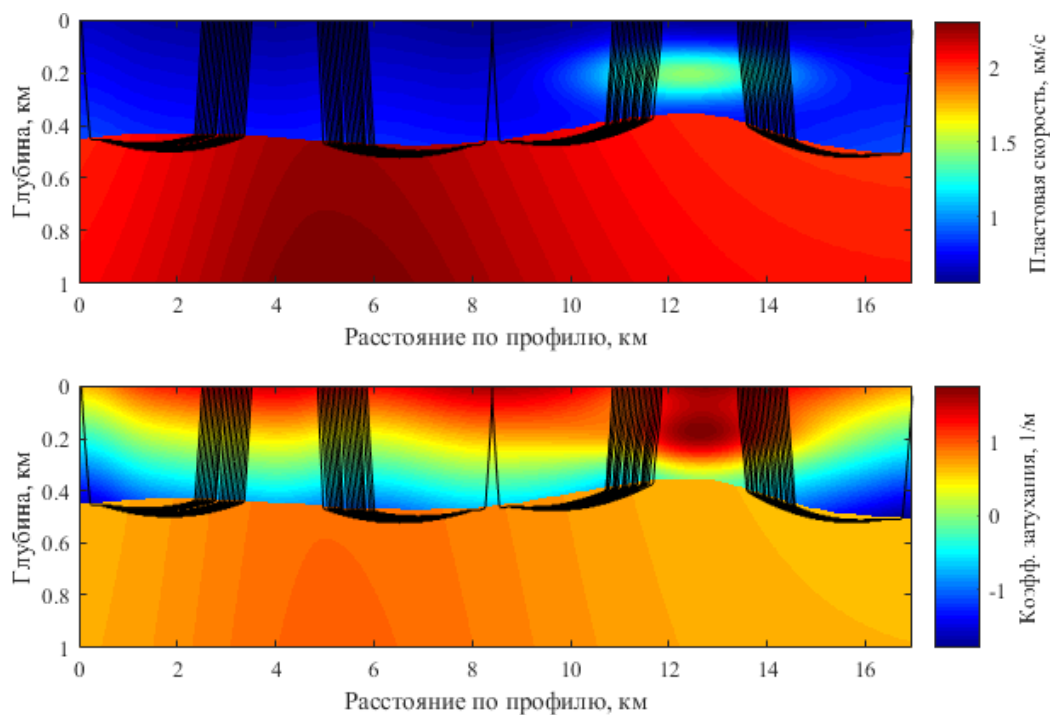


Рис. 7. Модель 2. Объект в ВЧР

Решение обратной задачи с привлечением псевдоаприорной информации показывает увеличение ошибки определения поверхностных факторов в области объекта (рис. 8). Эта ошибка, наиболее вероятно, связана с тем, что заданные поверхностные факторы определены по вертикали, а так как объект характеризуется повышенными значениями коэффициента затухания, отклонение реальной траектории лучей от вертикальной приводит к большим ошибкам по сравнению с другими участками рассматриваемого профиля.

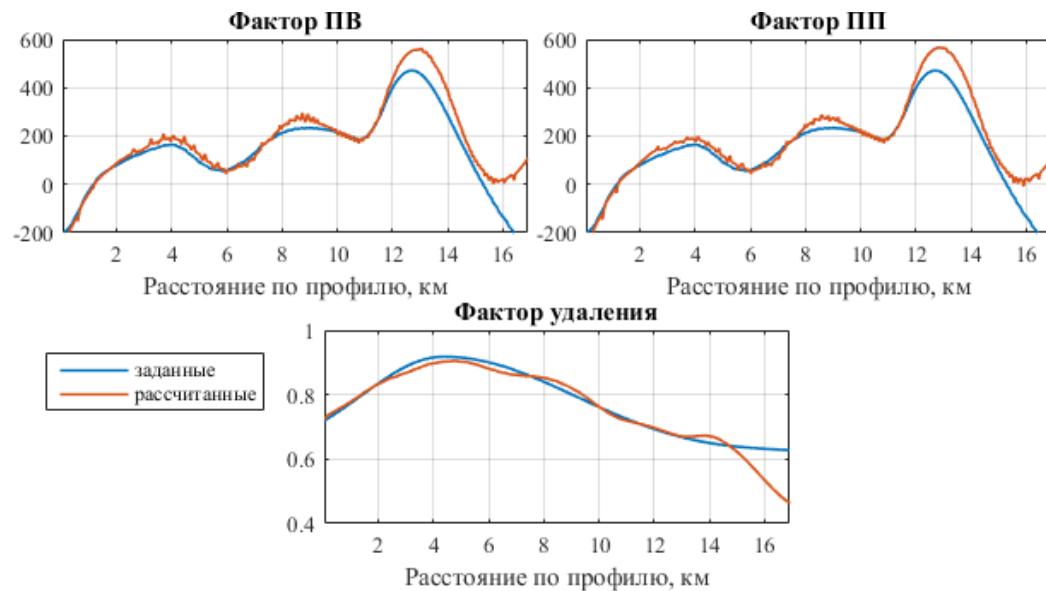


Рис. 8. Результат решения обратной задачи для модели 2

Теперь перенесем этот объект во второй слой.

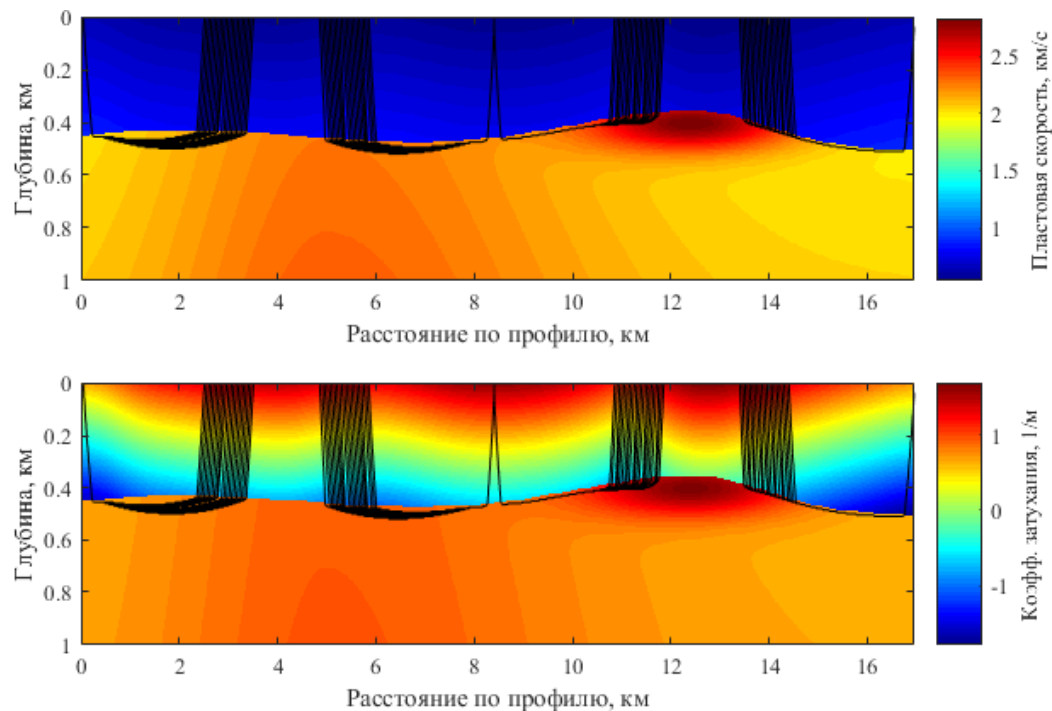


Рис. 9. Модель 3. Объект во втором слое

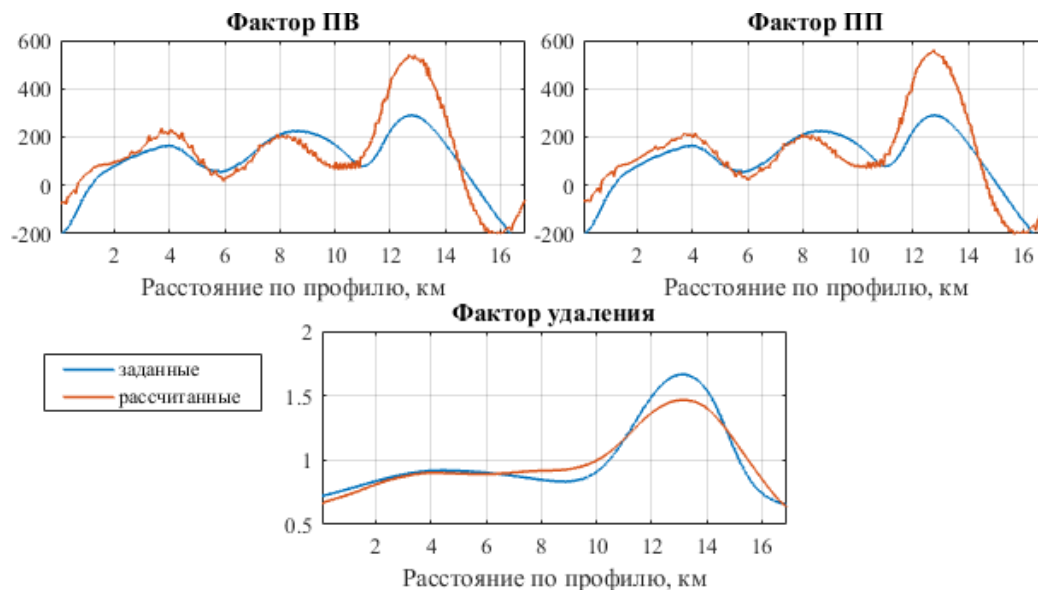


Рис. 10. Результат решения обратной задачи для модели 3

Результат решения обратной задачи для модели 3 представлен на рис. 10.

Значительное отличие решения обратной задачи модели 3 от моделей 1 и 2 заключается в том, что стала очевидна ошибка в определении фактора удаления, которая согласуется по координатам с ошибкой в поверхностных факторах. Так проявляется перераспределение факторов, вызванное «грубостью» математической модели (1), которая предполагает постоянство коэффициента затухания в пределах одной ОСТ, а на практике это условие не выполняется. Подобные результаты приведены в работе [Хемраев, 2017].

ВЫВОДЫ

Предложенная трехфакторная математическая модель, подразумевающая линейную зависимость фактора удаления от расстояния источник-приемник, может успешно использоваться при решении задачи факторной декомпозиции поля амплитуд преломленных волн, при этом рефракция и криволинейные границы слабо влияют на результат решения. Показано, что в случае резкого изменения свойств пород, определяющих затухание сигнала во втором слое, решение обратной задачи может значительно искажаться. При наличии неоднородностей в ВЧР (в верхнем слое) результат факторной декомпозиции достаточно точный. Рассчитанные поверхностные факторы могут использоваться для учета суммарного влияния ВЧР и локальных условий возбуждения и регистрации на динамические характеристики регистрируемых волн.

ЛИТЕРАТУРА

Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. – М.: Недра, 2003. – 227 с.

Митрофанов Г.М., Сергеев В.Н. Исследование линеаризованной модели для головной волны в связи с задачей обработки данных КМПВ // Геология и геофизика. – 1986. – № 8. – С. 98–108.

Митрофанов Г.М. Псевдоаприорная информация в задаче коррекции частотно-зависимой статики // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 149–168.

Сысоев А.П. Технология построения объемных сейсмогеологических моделей по данным разномасштабной сейсморазведки: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новосибирск: ОАО «Сибнефтегеофизика», 2005. – 255 с.

Сысоев А.П. Анализ неединственности решения задачи расчета оператора поверхностно-согласованной деконволюции // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 3. – С. 27–30.

Хемраев К.А. Анализ трехфакторной модели отраженных волн в задаче коррекции амплитуд // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 4. – С. 72–80.

Peyré G., Péchaud M., Keriven R., Cohen L.D. Geodesic methods in computer vision and graphics // Foundations and trends in computer graphics and vision – 2010. – Vol. 5, No. 3–4. – P. 197–397.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

ХЕМРАЕВ Керим Акмамедович – аспирант Санкт-Петербургского горного университета, научный руководитель д.г.-м.н. А.Н. Телегин. Область научных интересов: динамическая обработка сейсмических материалов.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ИЗ МНГОВОВЛНОВЫХ AVOA-ДАННЫХ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Т.В. Нефедкина, П.А. Лыхин, Г.А. Дугаров

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru, Pavel.lykhin@gmail.com, DugarovGA@ipgg.sbras.ru*

В статье исследуется оптимизационный алгоритм совместной нелинейной AVOA-инверсии PP+PS отражений в анизотропных средах. Алгоритм основан на точном решении для коэффициентов отражения PP- и PS- волн в анизотропной HTI-среде. Рассматривается случай отражения продольных и обменных волн от кровли анизотропного слоя. Тестирование алгоритма проведено на синтетических сейсмограммах, рассчитанных лучевым методом. Показано, что комплекс продольных и обменных волн повышает помехоустойчивость алгоритма и точность получаемых оценок параметров среды. Коэффициенты анизотропии могут быть определены с высокой точностью при отношении сигнал/помеха > 5 для PP-волны и > 2 для PS-волны.

Нелинейная AVOA-инверсия, обменные волны, синтетические сейсмограммы, лучевой метод, трансверсально-изотропная (HTI) среда, оптимизация, помехоустойчивость метода

DETERMINATION OF AZIMUTHAL ANISOTROPIC MEDIA ELASTIC PARAMETERS FROM MULTI-WAVE AVOA DATA BY NONLINEAR OPTIMIZATION METHOD

T.V. Nefedkina, P.A. Lykhin, G.A. Dugarov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru, Pavel.lykhin@gmail.com, DugarovGA@ipgg.sbras.ru*

In this paper, we investigate optimization algorithm of joint nonlinear AVOA inversion of PP+PS reflections in anisotropic media. Algorithm is based on the exact solution for PP and PS waves reflection coefficients in anisotropic HTI medium. The PP and PS wave's reflections from the top of the anisotropic layer are examined. We use synthetic seismograms generated by ray method for the algorithm testing. We show that joint compressional and converted wave's inversion allows increasing the robustness of the method and the accuracy of medium-parameter estimates. Coefficients of anisotropy are determined with better accuracy if signal-to-noise ratio is bigger than 5 for PP wave and bigger than 2 for PS wave.

Nonlinear AVOA inversion, converted waves, synthetic seismograms, ray method, transversely isotropic (HTI) media, optimization, robustness of the method

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения анизотропии упругих свойств связана с необходимостью получения информации о параметрах трещиноватых сред по данным наземной трехмерной сейсморазведки. Изучение анизотропии по амплитудам отраженных волн (AVOA-анализ) применяется для обнаружения зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости коллекторов углеводородов в терригенных отложениях, а также для определения их фильтрационно-емкостных свойств и преимущественного направления трещин.

В основе метода AVOA-анализа лежат линейаризованные аппроксимации уравнения Рюгера [Rüger, 2001] для плоско-волнового коэффициента отражения продольной волны на границе изотропного и анизотропного (HTI) полупространств, полученные в предположении малого контраста упругих свойств на границе и слабой анизотропии. На практике применяется преимущественно «посекторный» AVOA-анализ и линейная аппроксимация уравнения Рюгера на малых удалениях от источника. Перечисленные ограничения делают невозможным применение традиционных методов AVOA-анализа в средах с контрастными отражающими границами и сильной анизотропией [Нефедкина, Лыхин, 2016]. Примером таких сред могут служить нефтяные месторождения Восточной Сибири.

Для AVOA-инверсии продольных отраженных волн в анизотропных средах с контрастными границами был разработан нелинейный оптимизационный алгоритм, основанный на точном решении для плоско-волнового коэффициента отражения продольной волны [Лыхин, Нефедкина, 2017]. Тестирование алгоритма на модельных данных показало, что он обеспечивает удовлетворительную точность определения параметров анизотропии при высоком отношении сигнал/помеха ≥ 10 . В настоящей статье мы продолжаем эти исследования и предлагаем использовать для повышения помехоустойчивости AVOA-инверсии комплекс продольных и обменных волн. Комбинация волн (PP+PS) позволяет при использовании симметричных источников типа центра давления и регистрации вертикальной и горизонтальных компонент смещений частиц существенно увеличить объем получаемой информации. В связи с этим в последние годы во всем мире существенно увеличился интерес к трехкомпонентным наблюдениям, в том числе и на море (с приемом колебаний донными станциями).

Целесообразность совместного использования продольных и обменных волн для повышения точности и устойчивости решения обратной динамической задачи по AVO-данным была показана ранее: для изотропных сред в работах [Ursin, Tjaland, 1992; Causse et al., 1998; Нефедкина и др., 1999; Side et al., 2000]; для анизотропных сред в работах [Naugen, Ursin, 1997; Jilek, 2001; Лыхин, Нефедкина, 2018].

В данной статье исследуется случай отражения продольных и обменных волн от кровли анизотропного слоя. В качестве модельных данных используются синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом. Тестирование разработанного алгоритма многоволновой AVOA-инверсии проведено на синтетических сейсмограммах, полученных для сейсмогеологической модели Верхнечонского нефтяного месторождения в Восточной Сибири.

МЕТОДОЛОГИЯ

Система вертикальных азимутально-ориентированных трещин может быть представлена эффективной моделью трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии (среда HTI). В случае анизотропных сред коэффициенты отражения и прохождения плоских волн через плоскую границу не могут быть выражены в явном виде и определяются из решения системы 6 линейных уравнений, полученных из условий непрерывности вектора смещений и непрерывности вектора напряжений на жесткой границе [Петрашень и др., 1984].

В компактной форме можно записать [Schoenberg, Protazio, 1992]:

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \mathbf{A}\mathbf{X}, \\ \mathbf{b} &= \left(\mathbf{I}_P^{d(1)} \quad \mathbf{t}_P^{d(1)} \right)^T, \\ \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_P^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{I}_P^{d(2)} & \mathbf{I}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{I}_{SH}^{d(2)} \\ -\mathbf{t}_P^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{t}_P^{d(2)} & \mathbf{t}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{t}_{SH}^{d(2)} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{X} &= \left(R_{PP} \quad R_{PSV} \quad R_{PSH} \quad T_{PP} \quad T_{PSV} \quad T_{PSH} \right)^T, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица смещений-напряжений для образующихся волн, $\mathbf{b}$ – это вектор-столбец смещений-напряжений для падающей волны, $\mathbf{X}$ – вектор-столбец, состоящий из коэффициентов отражения и преломления, $\mathbf{I}_P^{d(1)}$ – вектор поляризации падающей P-волны в верхнем слое, $\mathbf{I}_i^{d(2)}$ – вектор поляризации преломленной волны i -го типа в нижнем слое, $\mathbf{I}_i^{u(1)}$ – вектор поляризации отраженной волны i -го типа в верхнем слое, $\mathbf{t}_P^{d(1)}$ – вектор напряжения падающей P-волны в верхнем слое, $\mathbf{t}_i^{d(2)}$ – вектор напряжения преломленной волны i -го типа в нижнем слое, $\mathbf{t}_i^{u(1)}$ – вектор напряжения отраженной волны i -го типа в верхнем слое. Из решения системы уравнений (1) может быть получено точное значение плоско-волновых коэффициентов отражения продольной PP- и обменной PS-волн на границе изотропного и анизотропного (HTI) полупространств для заданных параметров модели.

В предлагаемом методе полноазимутальной AVOA-инверсии решение обратной задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе на малых удалениях от источника используется линейная аппроксимация Рюгера для коэффициента отражения PP-волны [Rüger, 2001] и методом наименьших квадратов определяется азимут оси симметрии φ_0 в первом приближении [Нефедкина, Лыхин, 2016]. На втором этапе на полной базе наблюдений оптимизационным методом Нелдера-Мида рассчитываются упругие параметры V_P , V_S и ρ , а также параметры анизотропии Томсена $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ и уточненный азимут оси симметрии φ_0 для анизотропного слоя.

Известно, что при отражении PS-волны от границы изотропного и анизотропного полупространств образуются две поперечные волны SV и SH со своей поляризацией и амплитудой. В случае отражения от

кровли анизотропного слоя обе поперечные волны сливаются в одну волну PS, распространяющуюся в верхней изотропной среде, с амплитудой равной векторной сумме модулей коэффициентов отражения $R_{P\,SV}$ и $R_{P\,SH}$ и вектором поляризации, равным векторной сумме векторов поляризации образовавшихся волн квазипоперечной SV и поперечной SH. При отражении от подошвы анизотропного слоя образовавшиеся квазипоперечные волны распространяются в анизотропной среде с разными скоростями и регистрируются на поверхности наблюдений на основной и побочной компонентах в виде суммы колебаний с различными временными задержками. В этом случае возможно разделение волн методами поляризационного анализа при наличии трехкомпонентных наблюдений [Alford, 1986; Горшкалев и др., 2014].

В данной работе мы рассматриваем только отражение от кровли анизотропного слоя. В этом случае в оптимизационном алгоритме осуществляется минимизация функционала невязки, состоящего из суммы квадратичных невязок между наблюдаемыми и теоретическими данными по продольной и обменной волнам:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (App_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - App_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}))^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n (Aps_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - Aps_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}))^2} \rightarrow \min,$$

где n – число наблюдений, l_i – расстояние от источника до i -го приемника, $\mathbf{v}$ – вектор неизвестных параметров модели, $\mathbf{m}$ – вектор материальных параметров модели, $App_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m})$ и $Aps_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m})$ – наблюдаемые амплитуды PP и PS отражений, исправленные за геометрическое расхождение, $App_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$ и $Aps_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$ – теоретическое описание коэффициентов PP и PS отражений, рассчитываемое с помощью системы (1).

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Тестирование алгоритмов проводилось на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения. Целевым объектом исследований для этого месторождения является карбонатный комплекс, состоящий из трещиноватых доломитов осинского горизонта (низы усольской свиты) и подсолевых карбонатных отложений вендского возраста. С кровлей осинского горизонта связано устойчивое отражение, являющееся региональным репером, ОГ А. Ниже карбонатного комплекса залегают терригенные отложения непской свиты. С их кровлей связан опорный отражающий горизонт ОГ М2.

Обобщенная сейсмогеологическая модель месторождения (рис. 1) была составлена по данным вертикального сейсмического профилирования и акустического каротажа в скважинах № 73 и № 78. В качестве модели рассматривается трехслойная горизонтально слоистая среда. Второй слой задан

трансверсально-изотропным с горизонтальной осью симметрии, азимут оси составляет 60° с осью X и имитирует трещиноватые отложения осинского горизонта и подсолевого карбонатного комплекса. Скважины № 73 и № 78 находятся вдали от промыслового участка месторождения и по ним нельзя судить о степени анизотропии, вызванной упорядоченной вертикальной трещиноватостью отложений в целевом интервале разреза. В связи с этим значения параметров анизотропии второго слоя были взяты из петрофизических данных, приведенных в работе [Литтау и др., 2017]. Относительные перепады скоростей на кровле анизотропного слоя составляют 20–25 %.

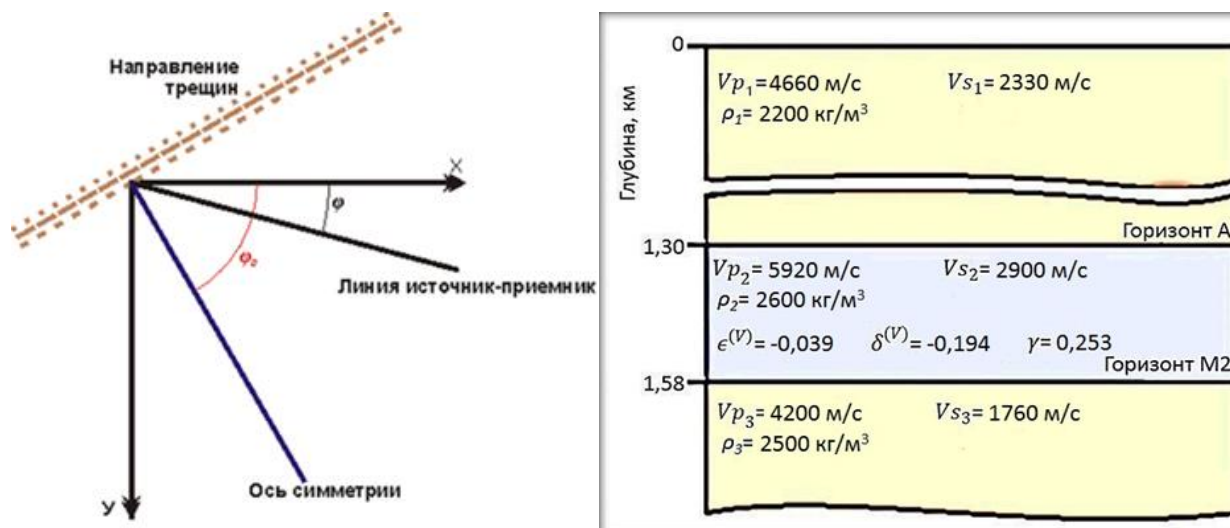


Рис. 1. Обобщенная сейсмогеологическая модель Верхнечонского месторождения (слева – в плане, справа – в разрезе). Анизотропный слой выделен сиреневым цветом

Модельными данными являлись синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом. Расчеты времен пробега, коэффициентов отражения PP- и PS-волн от кровли (горизонт А) трещиноватого анизотропного слоя, векторов поляризации отраженных и проходящих волн выполнены на основе теории лучевого метода в анизотропных средах [Петрашень и др., 1984] по программам, составленным Г.А. Дугаровым, и реализующим алгоритм, описанный в работе [Оболенцева, Гречка, 1989]. Для расчета синтетических сейсмограмм использовался импульс Риккера с несущей частотой 25 Гц, источник колебаний (типа центр давлений) помещался на поверхности изотропного слоя.

Для изучения помехоустойчивости алгоритмов AVOA-инверсии на теоретические сейсмограммы X, Y и Z компонент накладывался реальный случайный шум, зарегистрированный вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками при проведении опытно-методических работ по мониторингу локальной и региональной сейсмичности в Забайкальском крае [Дергач, 2018]. Пример записи шумов приводится на рис. 2.

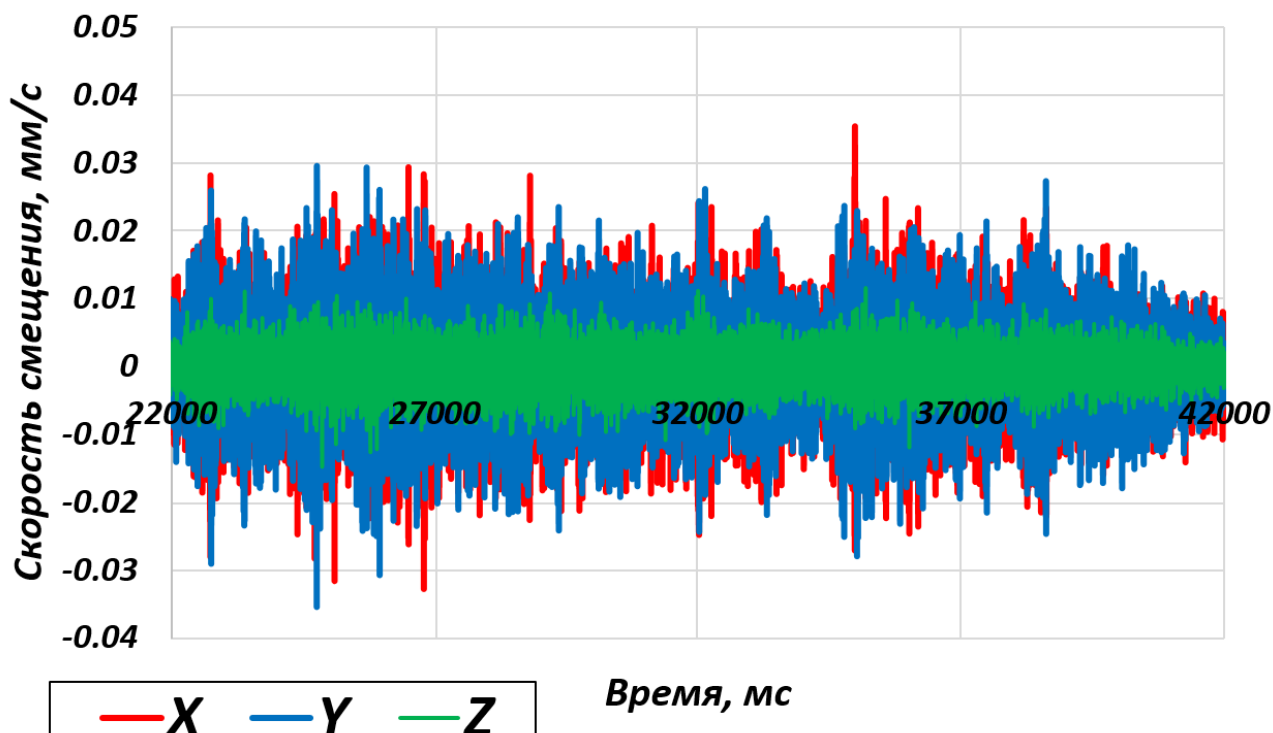


Рис. 2. Запись реальных шумов, зарегистрированных в Забайкальском крае

Отношение сигнал/помеха рассчитывалось по отношению энергий отраженной продольной волны и шума во временном окне полезного сигнала. Энергия с разных компонент складывалась. В первой серии экспериментов интенсивность шума составляла 10 % от среднего уровня энергии отраженной РР-волны на сумме компонент для профиля с азимутом 150° , что в среднем соответствовало отношению сигнал/помеха = 10 по продольной волне и 2–4 по обменной волне. Во второй серии экспериментов интенсивность шума была увеличена до 20 %, что в среднем соответствовало отношению сигнал/помеха = 5 по продольной волне и 1–2 по обменной волне. Затем путем извлечения квадратного корня из энергии переходили к среднеквадратичным амплитудам отражений, которые подавались на вход алгоритма решения обратной задачи. Вся процедура повторялась 10 раз для получения среднестатистических оценок параметров среды.

Сейсмограммы для азимутов профиля 60° (направление оси симметрии) и 150° (направление плоскости изотропии) с наложенными шумами 10 % показаны на рис. 3 и 4 (первой приходит отраженная продольная РР-волна, второй – отраженная обменная PS-волна). Сейсмограммы для профиля с азимутом 105° (45° от оси симметрии) даны на рис. 5. Из приведенных рисунков видно, что отношение сигнал/помеха на профилях с различными азимутами изменяется, поскольку амплитуды полезных волн зависят от азимута профиля, а уровень помех остается примерно постоянным, что соответствует условиям полевых наблюдений.

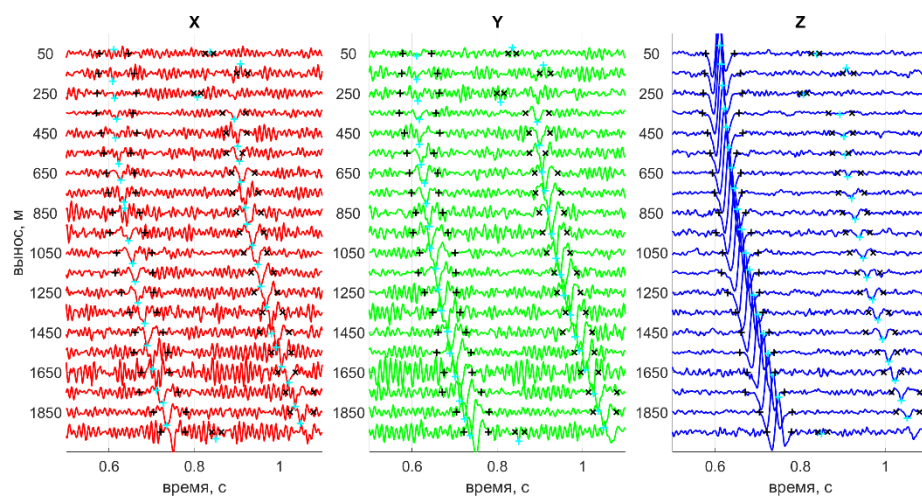


Рис. 3. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 60°. Шум 10 %

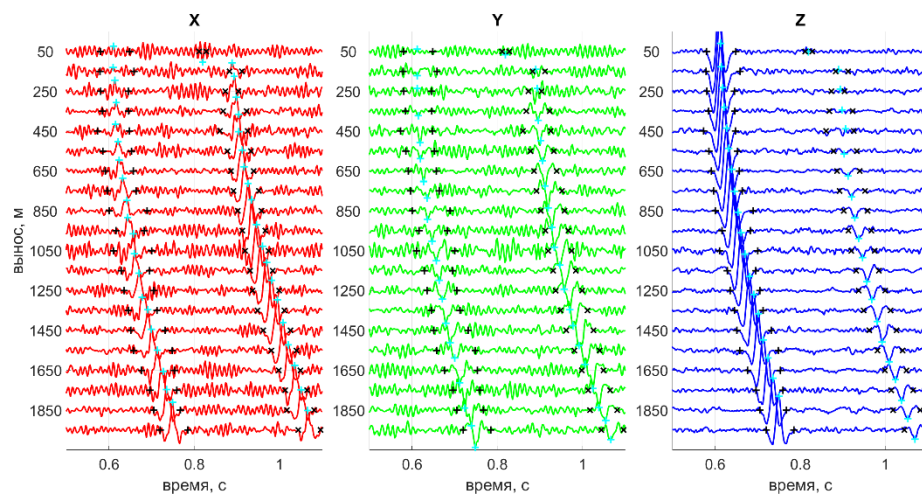


Рис. 4. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 150°. Шум 10 %

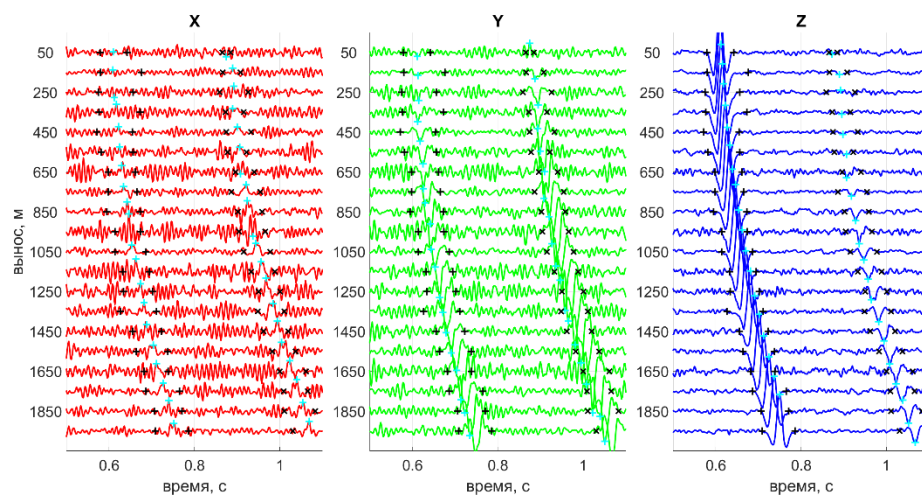


Рис. 5. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 105°. Шум 10 %

Для решения обратной задачи использовались среднеквадратичные амплитуды PP- и PS-волн для 7 азимутов радиальных профилей наблюдений 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, относящихся к одному источнику. Расстояние между приемниками 50 м. Среднеквадратичные амплитуды вычислялись во временном окне, равном 1.5 периодам отраженной волны. Входными данными программы AVOA-инверсии служила совокупность всех значений амплитуд и углов падений волн для всех азимутов и удалений (для PS-волны исключались амплитуды для углов падения < 10°).

Теоретические коэффициенты отражения продольных и обменных волн и их амплитуды, снятые с сейсмограмм с уровнем шума 10 %, для различных азимутов профилей показаны на рис. 6 и 7.

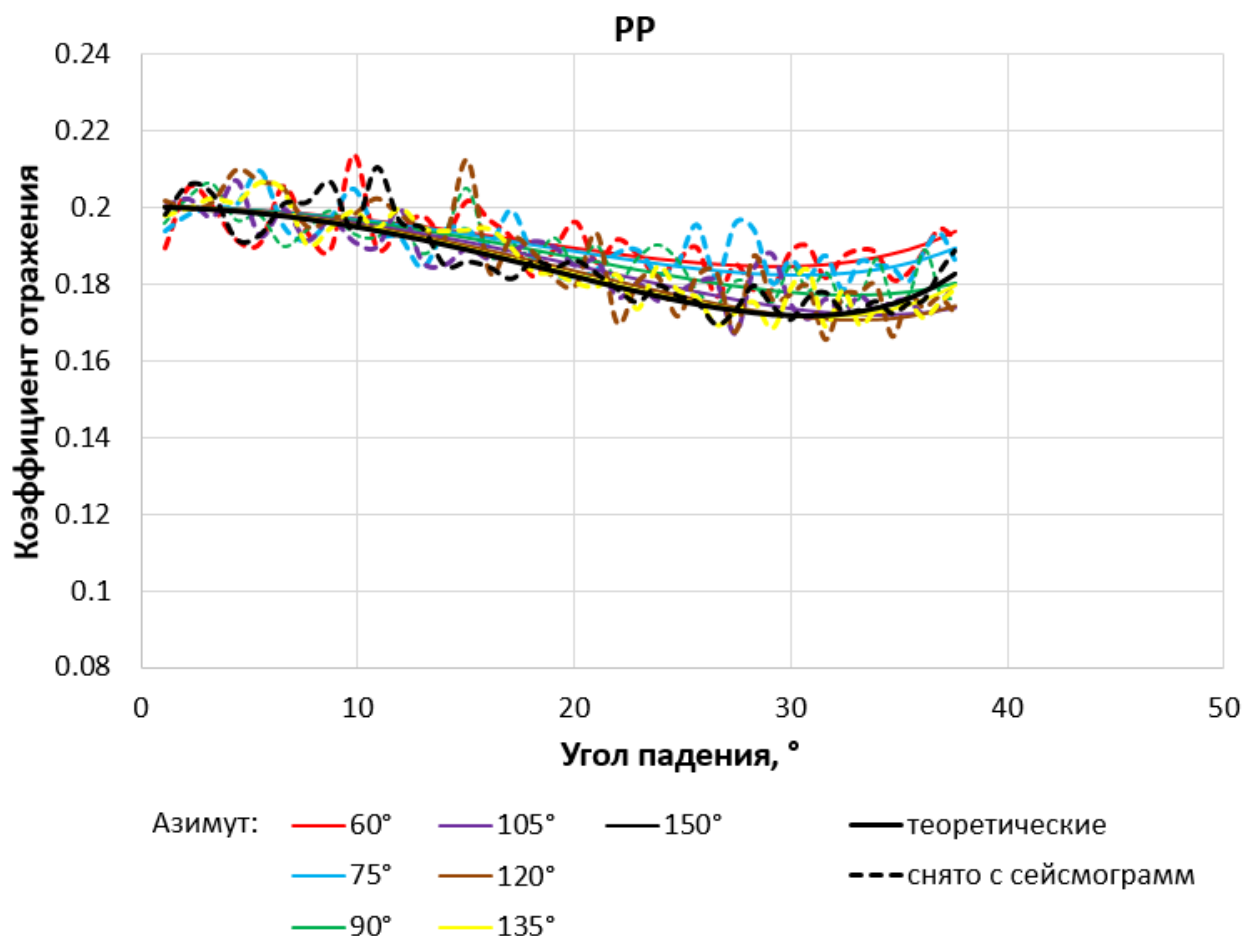


Рис. 6. Теоретические коэффициенты отражения продольных волн (сплошными линиями) и рассчитанные по амплитудам PP-волн с зашумленных сейсмограмм (пунктирными линиями), для различных азимутов профилей. Шум 10 %

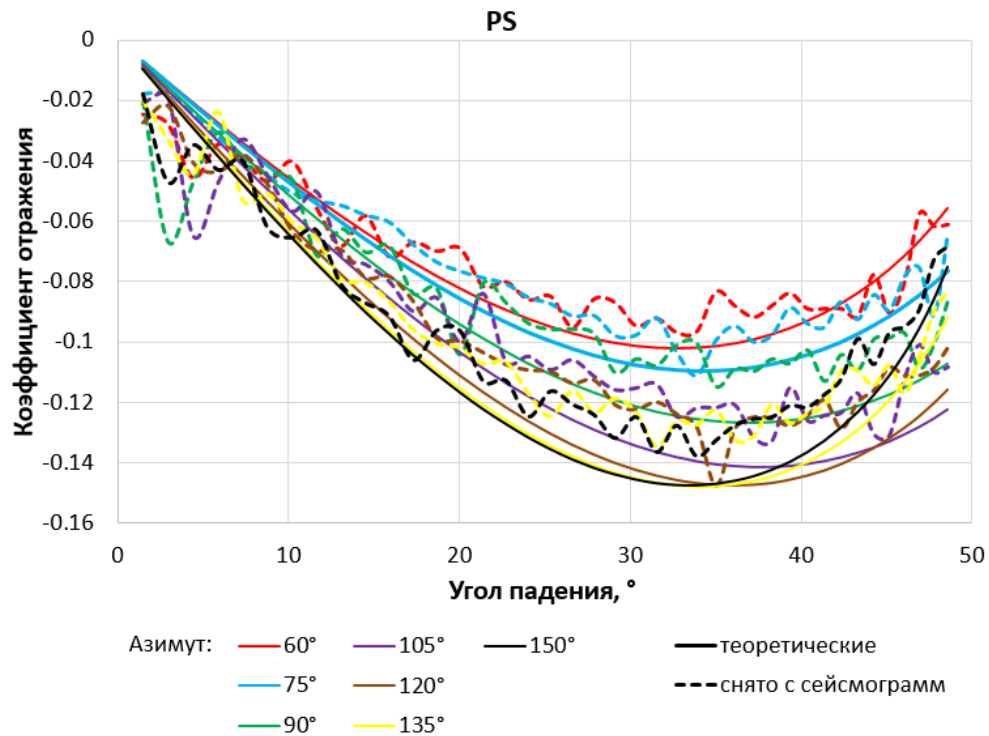


Рис. 7. Теоретические коэффициенты отражения обменных волн (сплошные линии) и рассчитанные по амплитудам PS-волн с зашумленных сейсмограмм (пунктирные линии), для различных азимутов профилей. Шум 10 % для PP-волны и 30 % для PS-волны

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нелинейная AVOA-инверсия выполнена оптимизационным методом Нелдера-Мида. Известно, что устойчивость и точность решения обратной задачи оптимизационными методами зависит от числа определяемых неизвестных параметров. При большом числе неизвестных параметров процесс вычислений часто становится неустойчивым. В реальности такой параметр, как плотность слоя, изменяется в незначительных пределах и его можно считать известным. Первое приближение азимута оси симметрии было определено на первом этапе методом наименьших квадратов с использованием линеаризованной аппроксимации Рюгера [Rüger, 2001]. В связи с этим определялись следующие параметры анизотропного слоя 2 (см. рис. 1): V_P , V_S и коэффициенты анизотропии $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ , а также уточнялся азимут оси симметрии. Параметры слоев 1 и 3 считались известными. Рассматривались удаления до 2000 м, что соответствует углам падения волны до 40° . Не использовались амплитуды обменной PS-волны на малых удалениях, для которых угол падения был $< 10^\circ$. Погрешность начального приближения для скоростных параметров составляла 15 % ($V_{P2,0} = 5.0$ км/с, $V_{S2,0} = 2.5$ км/с), для коэффициентов анизотропии начальное приближение принималось равным 0.01 (слабая анизотропия).

В табл. 1 представлены результаты решения обратной задачи по данным продольных волн, в табл. 2 – по комплексу продольных и обменных волн. Приведены средние оценки параметров, полученные по 10 наборам данных.

Таблица 1

Результаты решения обратной задачи для кровли анизотропного слоя по продольным волнам

Параметры среды. Модель Верхнечонского нефтяного месторождения		Решение обратной задачи для кровли (PP)		
		Шум 0 %	Шум 10 %	Шум 20 %
$V_{P1}=4.66$	$V_{P2}=5.92$	$V_{P2}=5.92$	$V_{P2}=5.91$	$V_{P2}=5.89$
$V_{S1}=2.33$	$V_{S2}=2.9$	$V_{S2}=2.9$	$V_{S2}=2.85$	$V_{S2}=2.84$
$\rho_1=2.2$	$\rho_2=2,6$	ρ_2 – известна	ρ_2 – известна	ρ_2 – известна
$\epsilon_1^{(v)}=0$	$\epsilon_2^{(v)}=-0.039$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.039$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.056$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.070$
$\delta_1^{(v)}=0$	$\delta_2^{(v)}=-0.194$	$\delta^{(v)}_2=-0.194$	$\delta^{(v)}_2=-0.175$	$\delta^{(v)}_2=-0.172$
$\gamma_1=0$	$\gamma_2=0.253$	$\gamma_2=0.253$	$\gamma_2=0.230$	$\gamma_2=0.221$
–	$\varphi_0=60^\circ$	$\varphi_0=60^\circ$	$\varphi_0=58.8^\circ$	$\varphi_0=57.1^\circ$

Таблица 2

Результаты решения обратной задачи для кровли анизотропного слоя по комплексу продольных и обменных волн

Параметры среды. Модель Верхнечонского нефтяного месторождения		Решение обратной задачи для кровли (PP+PS)		
		Шум 0 %	Шум 10 % (PP) – 30 % (PS)	Шум 20 % (PP) – 60% (PS)
$V_{P1}=4.66$	$V_{P2}=5.92$	$V_{P2}=5.92$	$V_{P2}=5.92$	$V_{P2}=5.90$
$V_{S1}=2.33$	$V_{S2}=2.9$	$V_{S2}=2.9$	$V_{S2}=2.86$	$V_{S2}=2.88$
$\rho_1=2.2$	$\rho_2=2,6$	ρ_2 – известна	ρ_2 – известна	ρ_2 – известна
$\epsilon_1^{(v)}=0$	$\epsilon_2^{(v)}=-0.039$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.039$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.035$	$\epsilon^{(v)}_2=-0.033$
$\delta_1^{(v)}=0$	$\delta_2^{(v)}=-0.194$	$\delta^{(v)}_2=-0.194$	$\delta^{(v)}_2=-0.184$	$\delta^{(v)}_2=-0.181$
$\gamma_1=0$	$\gamma_2=0.253$	$\gamma_2=0.253$	$\gamma_2=0.235$	$\gamma_2=0.225$
–	$\varphi_0=60^\circ$	$\varphi_0=60^\circ$	$\varphi_0=59.2^\circ$	$\varphi_0=58.1^\circ$

Из табл. 1 следует, что при решении обратной задачи по данным продольных волн в случае 10 % шума (отношение сигнал/помеха 10) скорости продольных и поперечных волн, а также азимут оси симметрии анизотропного слоя определяются с большой точностью (погрешности по скоростям не превышают 1 %, а в азимуте – 1°). Оценки коэффициентов анизотропии вычисляются с погрешностями около 0.02. С увеличением уровня помехи до 20 % результаты решения обратной задачи по данным продольных волн ухудшаются. При такой помехе плохо подбирается начальное приближение азимута оси симметрии по продольной волне с использованием линеаризованной аппроксимации Рюгера. Алгоритм оптимизации уточняет значение φ_0 , но при отдельных реализациях помехи ошибка может достигать 10° и более. В среднем точность определения азимута оси симметрии составляет около 3°. Погрешность определения коэффициентов анизотропии возрастает до 0.03.

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что решение обратной задачи по комплексу PP- и PS-волн дает большую точность оценок всех параметров анизотропного слоя. В случае 10 % шума погрешности определения коэффициентов анизотропии колеблются в пределах 0.004–0.020. При этом отношение сигнал/помеха по обменной волне изменяется от 1.8 до 4.3 в зависимости от азимута профиля. С увеличением уровня помехи до 20 % точность решения обратной задачи по комплексу PP+PS волн уменьшается незначительно. Это связано с тем, что коэффициенты отражения обменной PS-волны значительно более чувствительны к азимуту профиля, зависимости R_{PS} от угла падения лучше разрешены по азимуту, чем R_{PP} . Поэтому алгоритм оптимизации по 6 параметрам при работе по данным PS-волн хорошо уточняет оценку азимута оси симметрии φ_0 практически при всех реализациях помехи. Следует сказать, что в оптимизационных процедурах существенную роль играет структура функционала невязки, который может иметь как глобальный, так и локальные минимумы, что приводит к неоднозначности решения обратной задачи. При выбранных нами значениях начального приближения параметров мы не сталкивались с попаданием алгоритма в локальные минимумы. Однако изучение работы оптимизационного алгоритма при разных значениях начального приближения является важной задачей, которой планируется заняться в дальнейшем.

Таким образом, совместная инверсия амплитуд продольных и обменных волн в анизотропных средах значительно повышает точность получаемых оценок среды по сравнению с продольными волнами при отношении сигнал/помеха > 5 по продольной волне и > 2 по обменной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая методика AVOA-инверсии, позволяющая изучать анизотропные свойства среды по отражениям продольных и обменных волн от контрастных границ. Упругие параметры анизотропного слоя определяются методом нелинейной оптимизации. В оптимизационном алгоритме используется точное решение для коэффициентов отражения PP- и PS-волн. Использование комплекса продольных и обменных волн позволяет повысить помехоустойчивость алгоритма и увеличить точность определения параметров анизотропной среды. Тестирование алгоритма на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения показало, что при хорошем качестве полевых материалов (отношение сигнал/помеха > 5 по продольной волне и > 2 по обменной) упругие параметры анизотропного слоя определяются с высокой точностью. В дальнейшем предполагается опробовать разработанные алгоритмы на полевых материалах. При отсутствии данных по горизонтальным компонентам (в случае проведения однокомпонентной 3D съемки) алгоритм AVOA-инверсии может работать по Z-компоненте продольных волн.

ЛИТЕРАТУРА

Горшкалев С.Б., Афонина Е.В., Карстен В.В. Поляризационный анализ отраженных PS-волн в неоднородных азимутально-анизотропных средах // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.) – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 6–11.

Дергач П.А. Расширение полосы рабочих частот записей короткопериодных сейсмометров методом низкочастотной деконволюции для задач локального сейсмического мониторинга // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: Тезисы докладов Международной Юбилейной научной конференции (г. Бишкек, 3-7 июля 2018 г.) – Бишкек: НС РАН, 2018. – С. 41.

Литтау О.А., Новокрецин А.В., Баяк И.О. Изучение амплитуд отраженных волн в лучевом приближении для анизотропных сред с высококонтрастными границами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 12. – С. 40–47.

Лыхин П.А., Нефедкина Т.В. Потенциал нелинейной AVOA-инверсии отраженных продольных волн для изучения трещиноватых карбонатных коллекторов нефти и газа // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 2. – С. 59–68.

Лыхин П.А., Нефедкина Т.В. Нелинейная AVOA-инверсия отраженных продольных и обменных волн в азимутально-анизотропных средах // XIV Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018»: Сб. материалов в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 3. – С. 248.

Нефедкина Т.В., Курдюкова Т.В., Бузлуков В.В. Обратная динамическая задача сейсмики по AVO-данным продольных и обменных волн // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 7. – С. 1109–1115.

Нефедкина Т.В., Лыхин П.А. Применимость линеаризованных аппроксимаций коэффициента отражения продольных волн для азимутального анализа амплитуд РР отражений в анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 21–32.

Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю. Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы) – Новосибирск: ИГиГ, 1989. – 225 с.

Петрашень Г.И., Каштан Б.М., Ковтун А.А. Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Сборник научных трудов под ред. Г.И. Петрашеня. – Л.: Наука, 1984. – 282 с.

Alford R. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley, Texas // 56th Ann. Intern. Mtg., Soc. Explor. Geophys: Expanded Abstracts. – 1986. – P. 476-479.

Causse E., Sollie R., Haugen G. AVO attributes from multicomponent ocean bottom seismic data // 60th EAGE Conference & Technical Exhibition, Leipzig: Extended abstracts, Geophysical Division. – 1998. – Vol. 1. – 13 p.

Haugen G.U., Ursin B. Analytic insight into PP and PS azimuthal AVO response for a vertically fractured reservoir // 59th EAGE Conf. and Techn. Exhib. – Geneva: Extended abstracts. – 1997. – Vol. 1. – P. BO55.

Jilek P. Modeling and inversion of converted-wave reflection coefficients in anisotropic media: a tool for quantitative AVO analysis: Ph.D. thesis. – Golden: Colorado School of Mines, 2001. – 154 p.

Rüger A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. – Society of Exploration Geophysics, 2001. – 185 p.

Schoenberg M., Protazio J. “Zoeppritz” rationalized and generalized to anisotropy // Journal of seismic exploration. – 1992. – No. 1. – P. 125–144.

Side J., Cambois G., Vuillermoz C. Shear-wave velocity and density estimation from PS-wave AVO analysis: Application to an OBS dataset from the North Sea // Geophysics. – 2000. – Vol. 65, No. 5. – P. 1446–1454.

Ursin B., Tjaland E. Seismic amplitude analysis // Russ.-Norw. Oil Explor. Workshop II, Voss (Bergen): Abstr. Pap. – 1992. – No. 36. – P. 1–8.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕФЕДКИНА Татьяна Викторовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: многоволновая сейсморастворка, обменные отраженные волны, AVO-анализ и инверсия.

ЛЫХИН Павел Александрович – магистр геологии, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: азимутальный AVO-анализ и инверсия в анизотропных средах.

ДУГАРОВ Гэсэр Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: теория распространения сейсмических волн в анизотропных и поглощающих средах, эффективные модели.



К ВОПРОСУ О ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ОБЛАСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

А.Д. Дучков¹, Л.С. Соколова¹, М.Н. Железняк², Д.Е. Аюнов¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия,
e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, fe1956@mail.ru*

Поиски скоплений гидратов метана ведутся в северных районах Сибири уже более 50 лет. За это время не удалось достоверно (с извлечением гидратосодержащего керна) выявить ни одного месторождения метангидратов даже в породах хорошо изученного бурением Западно-Сибирского осадочного бассейна. На примере открытия двух месторождений гидратов метана в Канаде и Китае показано, что для решения проблемы необходимо проведение специально организованных и технически обеспеченных буровых работ на предварительно выделенных перспективных участках. Впервые выполнена оценка параметров зоны стабильности гидратов метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы.

Западно-Сибирский бассейн, Вилюйская синеклиза, криолитозона, гидраты метана, зоны стабильности гидратов метана, месторождения гидратов метана в Канаде и Китае

TO THE QUESTION ABOUT THE SEARCH FIELDS OF METHANE HYDRATES IN THE AREAS OF PERMAFROST DISTRIBUTION

A.D. Duchkov¹, L.S. Sokolova¹, M.N. Zheleznyk², D.E. Ayunov¹

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya St., 36, Yakutsk, 677010, Russia,
e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, fe1956@mail.ru*

The search for methane hydrate accumulations has been conducted in the Northern regions of Siberia for more than 50 years. During this time, it failed reliably (with the rise of hydrate-containing core) taken from the borehole to discover any deposits of methane hydrates even in the rocks of the Western Siberian basin, which has been well studied by drilling. On the example of the discovery of two methane hydrates deposits in Canada and China, it is shown that to solve the problem it is necessary to conduct specially organized and technically secured drilling operations on the pre-selected promising areas. For the first time, the parameters of the methane hydrates stability zone in the sedimentary cover of the Vilyuysk syncline were estimated.

The West Siberian basin, the Vilyuy syncline, permafrost, methane hydrates, stability zone of methane hydrates, deposits of methane hydrates in Canada and China

ВВЕДЕНИЕ

Гидраты углеводородных газов (в основном метана, CH_4) широко распространены в природе. Необходимым условием образования и сохранности природных газогидратов является наличие подходящих давления и температуры (Т), а также достаточного количества воды и свободного (или растворенного в воде) газа – гидратообразователя. Такие условия реализуются в осадочных породах, охлажденных криолитозоной (далее – вечная мерзлота, многолетнемерзлые породы), и в донных осадках глубоких акваторий [Истомин, Якушев, 1992]. Интерес к скоплениям природных гидратов связан в основном с их потенциальным энергетическим ресурсом [Makogon et al., 2007]. Так, в недавнем сообщении ТАСС говорится, что «по оценкам некоторых организаций, прежде всего Газпром ВНИИГАЗ, ресурсы метана в газогидратах на территории РФ составляют от 100 до 1000 трлн кубометров, в арктической зоне, в том числе морях, – до 600–700 трлн кубометров, но это очень приблизительно» [Горючий лед..., 2018]. Действительно, этот прогноз (как и многие другие) является весьма приблизительным, так как пока даже в пределах хорошо изученной бурением северной части Западно-Сибирской плиты выявлены только отдельные косвенные признаки присутствия газогидратов в верхних горизонтах мезозойских отложений (что справедливо и для Мессояхского газового месторождения). Эти признаки нигде в Сибири не подтверждены поднятием при бурении гидратосодержащего керна. Кстати, подобная ситуация характерна и для других областей развития криолитозоны. К настоящему времени открыто всего несколько месторождений гидратов метана в арктической части Северо-Американского континента (прибрежные районы Канады и США), а также в высокогорном Тибете [Scientific results..., 2005; Song et al., 2014]. Более продуктивными оказались поиски скоплений гидратов метана в донных отложениях морей и глубоких озер. Посредством бурения и отбора керна грунтовыми трубками уже выявлено более 200 скоплений гидратов в поддонных и более глубоких осадках, в том числе и в Сибирском регионе (Охотское море, оз. Байкал) [Mazurenko, Soloviev, 2003]. В данной статье обсуждается сложившаяся ситуация с прогнозированием скоплений гидратов метана в областях распространения криолитозоны.

ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ

В геологических разрезах природные газовые гидраты и их скопления могут образовываться только в определенных слоях горных пород, в которых существуют необходимые для формирования газовых гидратов условия (низкие температуры и высокие давления). Эти слои называются зонами стабильности гидратов (ЗСГ). Современные ЗСГ в континентальных породах Северного полушария сформировались при похолодании климата в плейстоцене и возникновении в связи с этим криолитозоны. Образование и развитие зон стабильности гидратов на континентах в целом повторяют эволюцию криолитозоны, при изменении контура мерзлого слоя изменяются и параметры ЗСГ. Эти зоны не имеют четких литологических границ. ЗСГ образуются во всех охлажденных разрезах, однако, с точки зрения прогноза, интерес представляют только расположенные в водонасыщенных осадочных бассейнах (например, в мезозойских впадинах Сибирского региона). Поисковое значение зон стабильности гидратов весьма велико, так как только в их пределах могут находиться значительные запасы газа в гидратной форме.

Из вышесказанного следует, что для прогнозирования скоплений газогидратов в осадочных бассейнах необходимо, в первую очередь, выяснить расположение в их разрезах современных границ ЗСГ соответствующего газа. Для этого надо иметь геотермическую информацию (термограммы или площадные распределения температуры на глубинах до 2–3 км) и фазовые диаграммы для систем «газ-вода». В наших расчетах границ зон стабильности гидратов метана и углекислого газа в породах Западно-Сибирского бассейна и Вилуйской синеклизы мы использовали диаграммы из работ [Sloan, 1998; Истомин, Якушев, 1992; Scientific results..., 2005; Якуцени, 2013], на основании которых были составлены сводные графики фазовых диаграмм, представленные на рис. 1.

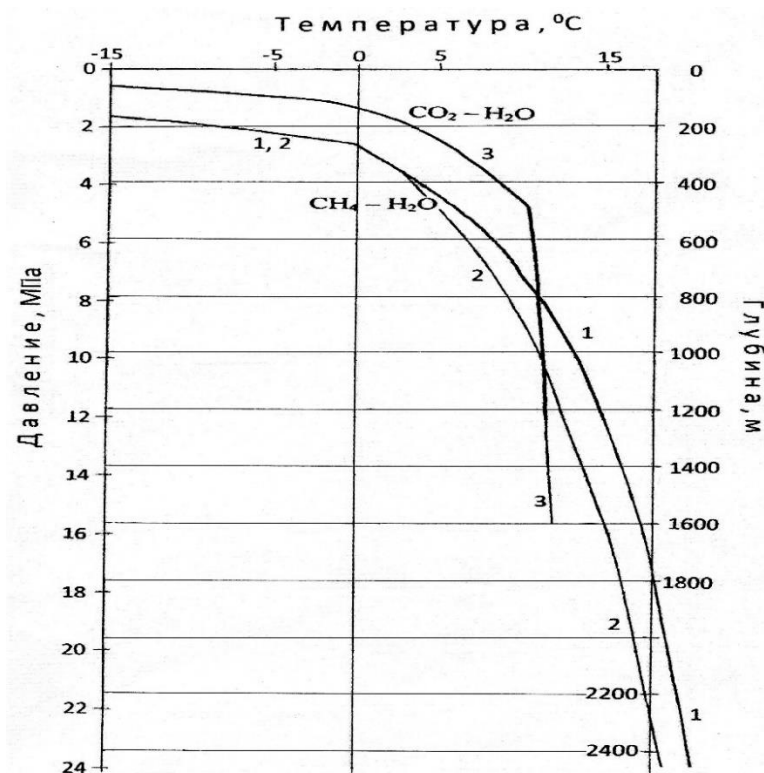


Рис. 1. Сводные фазовые диаграммы для систем $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$ (графики 1, 2) и $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (график 3) по данным из работ [Sloan, 1998; Истомин, Якушев, 1992; Scientific results..., 2005; Якуцени, 2013]. 1, 3 – вода пресная, 2 – вода морская (минерализация ~35 г/л). Эквивалентная глубина рассчитана по гидростатической модели распределения давления. Газовые гидраты формируются в областях, расположенных слева от диаграмм

При глубине менее 0.4 км диаграммы для метана практически совпадают. Увеличение минерализации приводит к сдвигу фазовой диаграммы в сторону более низких температур. Влияние минерализации на процесс гидратообразования хорошо иллюстрирует также и рис. 2 из работы [Scientific results..., 2005].

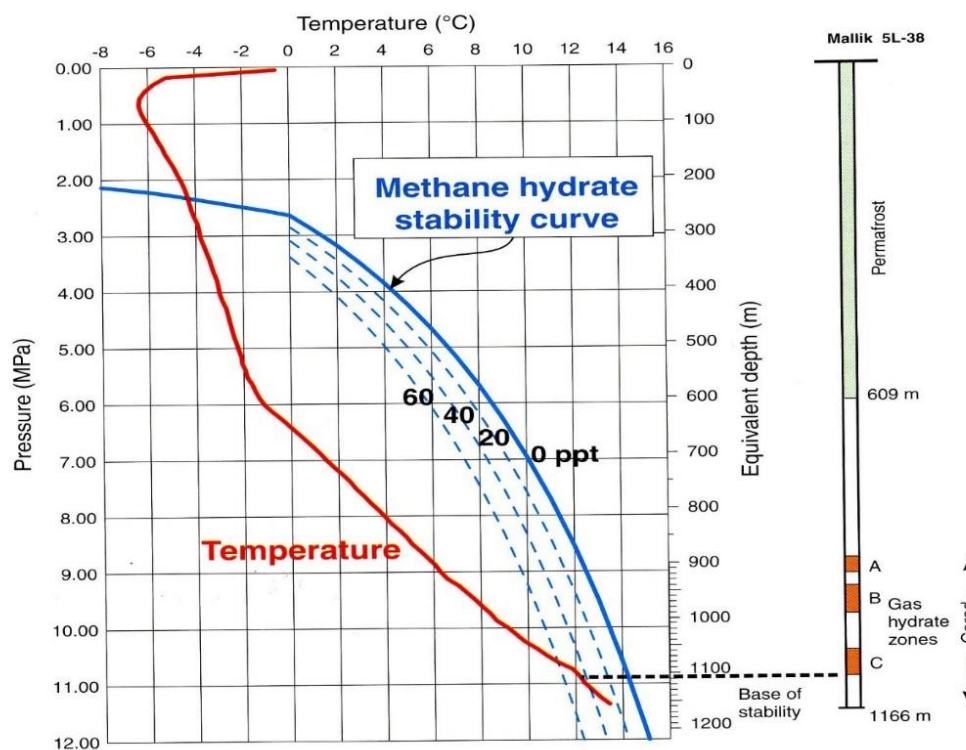


Рис. 2. Пример определения границ ЗСГ по скважине Mallik 5L-38 (Арктическое побережье Канады) [Scientific results..., 2005]. Красный график – термограмма по скважине; синие графики – фазовые диаграммы для системы «метан-вода» при разной минерализации подземных вод: 0, 20, 40, 60 ppt. Справа показана упрощенная геологическая колонка по той же скважине: А, В, С – интервалы, содержащие гидраты метана

Границы ЗСГ определяются по точкам (верхней и нижней) пересечения термограмм и фазовых диаграмм при их сопоставлении по температуре и глубине (давлению). Пример такого графического метода определения расположения границ ЗСГ показан на рис. 2. Верхняя точка пересечения графиков (и соответственно верхняя граница ЗСГ) располагается в пределах криолитозоны на глубине 240–250 м. Нижняя граница ЗСГ располагается в талых породах на глубине 1100 м. Она определяется по пересечению термограммы с фазовой диаграммой для воды с минерализацией 40 ppt, заполняющей околоскважинные породы. Судя по геологической колонке на глубине 1100 м завершается и гидратообразование.

Схемы зон стабильности газовых гидратов (в основном метана и углекислого газа) для отдельных осадочных бассейнов и Сибири в целом строятся достаточно давно [Истомин, Якушев, 1992]. Их детальность определяется количеством геотермических данных. Сравнительно недавно авторы оценили параметры ЗСГ углекислого газа и метана в осадочном чехле Западно-Сибирского бассейна [Дучков и др., 2009]. В данной статье дается оценка расположения границ ЗСГ метана в осадочном чехле Вилуйской синеклизы. Кратко рассмотрим полученные при этом результаты.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ПОРОДАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

Подробно этот материал, как отмечено выше, изложен в работе [Дучков и др., 2009]. Здесь мы отметим только основные черты распределений криолитозоны и ЗСГ метана.

Многолетнемерзлые породы присутствуют в осадочном чехле этого региона вплоть до широтного течения р. Оби (до 60-61° с.ш.). На крайнем севере верхняя граница криолитозоны совпадает с поверхностью. К югу она постепенно перекрывается слоем талых пород и опускается на юге до 0.12–0.14 км. Мощность мерзлоты максимальна (0.5–0.6 км) в арктической части плиты. Южнее нижняя граница мерзлоты постепенно поднимается до 0.3 км на широтах 64–62° и затем выклинивается. В этих условиях верхняя граница зоны стабильности гидратов метана располагается в криолитозоне на глубинах 0.2–0.25 км. Нижняя граница ЗСГ повсеместно опускается ниже подошвы мерзлоты. Наибольшую мощность ЗСГ имеет в северо-восточной части плиты, где ее нижняя граница располагается на глубинах 0.7–0.9 км. К юго-западу и югу эта граница поднимается до 0.3 км и затем постепенно смыкается с верхней. В зону стабильности гидратов метана Западно-Сибирской плиты входят в основном отложения палеогена и частично верхнего мела. На севере региона в непосредственной близости от подошвы ЗСГ находятся газовые залежи сеноманского и туронского горизонтов. В целом зона стабильности гидратов метана занимает огромный объем как мерзлых, так и талых осадочных пород.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОГИДРАТОВ В ПОРОДАХ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Вилюйский мезозойский бассейн, расположенный в восточной части Сибирской платформы, относится к числу важнейших регионов России по концентрации углеводородных природных ресурсов [Погодаев, 2016; Ситников и др., 2017]. Верхняя часть осадочного чехла Вилюйской синеклизы мощностью 1–2 км сложена терригенными породами верхнеюрского и мелового возраста с преобладанием песчано-алевритистых фаций. В регионе открыт целый ряд многоэтажных газовых и газоконденсатных месторождений. Самая верхняя газовая залежь (глубина 1 км) зафиксирована на Средне-Вилюйской площади. В пределах синеклизы подмерзлотные горные породы мелового и верхнеюрского возраста содержат в основном пресную воду. С глубиной (отложения нижней юры, триаса, перми) минерализация подземных вод резко увеличивается до 35–100 г/л. Вся гидрогеологическая система синеклизы насыщена водорастворенным газом, в основном метаном. Для Вилюйской синеклизы в целом характерен низкоактивный режим пластовых вод, однако по изменениям газового состава фиксируются признаки межрезервуарных перетоков пластовых жидкостей (в основном по трещинам и зонам разломов). Это способствует формированию новых месторождений газа (и газогидратов) в благоприятных условиях, в том числе и в верхнеюрско-меловых толщах, «залегающих непосредственно под криолитозоной ... над ранее выявленными традиционными залежами газов» [Ситников и др., 2017]. Именно в этих толщах должны существовать необходимые условия и для формирования газогидратов метана, и их скоплений. Для проверки этого предположения необходимо в первую очередь выяснить расположение ЗСГ метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы.

Температурный режим верхней части осадочного чехла Вилюйской синеклизы в большой степени определяется криолитозоной, которая изучена достаточно детально в результате многолетних геотермических исследований, проведенных в этом регионе сотрудниками ИМЗ СО РАН [Семенов, Железняк, 2013]. Ее нижняя граница определяется по расположению нулевой изотермы. Результаты высокоточных температурных измерений, стандартного термокаротажа, а также косвенные данные позволили оценить глубину расположения нулевой изотермы, а соответственно и мощность криолитозоны, на 46 участках (Таблица). Средние значения мощности мерзлого слоя на изученных участках изменяются от 0.06 до 0.82 км, отмечается ее возрастание в северном и западном направлениях, выявлены значительные (до 0.1 км) изменения мощности мерзлоты в пределах отдельных участков.

Таблица

Значения мощности криолитозоны, температуры на глубинах 1 и 2 км, верхних (H_1) и нижних ($H_{2п}$ и $H_{2м}$) границ зоны стабильности гидратов (ЗСГ) метана для разведочных площадей Вилюйской синеклизы

N	Площадь	Расположение нижней границы криолитозоны (нулевой изотермы), км	Т, °С на глубине: 1 км 2 км		Границы ЗСГ метана, км H_1 $H_{2п}$ $H_{2м}$		
			1 км	2 км	H_1	$H_{2п}$	$H_{2м}$
1	23 км Вилюйс. тракта	0.36	11.4	29.6	0.24	1.2	1.02
2	40 км Вилюйс. тракта	0.36	11.4	29.6	0.24	1.2	1.02
3	Андреевская	0.48	11.1	32.4	0.21	1.16	1.01
4	Андылахская	0.72	6.8	31.2	0.18	1.4	1.25
5	Бадаранская	0.53	18	39	0.18	0.84	0.76
6	Балагачинская	0.7	9.5	41.2	0.16	1.14	1.05
7	Баппагайская	0.46	10.3	29.3	0.23	1.26	1.06
8	Барыканская	0.47	11.7	33.7	0.2	1.1	0.96
9	Бахынайская	0.64	7.7	29.1	0.19	1.42	1.25
10	Бергеинская	0.37	13.3	34.4	0.24	1.05	0.82
11	Борулахская	0.6	—	—	—	—	—
12	Верхне-Линденская	0.7	7	34	0.18	1.35	1.22
13	Верхне-Синская	0.5	8.3	24.3	0.23	1.51	1.27
14	Вилюйская	0.57	10.2	34.9	0.2	1.18	1.04
15	Кенкеменская	0.39	11.4	29.6	0.24	1.17	0.97
16	Китчанская	0	20	—	0	0	0
17	Кэдэпчинская	0.29	13.3	32.1	0.25	0.99	0.75
18	Кэдэргинская	0.17	8.8	19.4	0.31	1.9	1.58
19	Линденская	0.7	9.3	40.4	0.16	1.16	1.06
20	Мастахская	0.57	17.1	53.1	0.16	0.85	0.79
21	Меикская	0.69	4.5	19	0.2	1.84	1.68
22	Намская	0.48	11.3	33.7	0.21	1.14	0.99
23	Нюрбинская	0.48	9.8	28.6	0.23	1.32	1.12
24	Неджелинская	0.46	17	42.8	0.2	0.84	0.74
25	Нижне-Вилюйская	0.56	22.5	48	0.16	0.77	0.72
26	Нижне-Тюкянская	0.47	9.2	26.2	0.23	1.4	1.18
27	Олойская	0.38	15.2	39.7	0.23	0.86	0.72
28	пос. Магарас	0.4	14.4	30	0.23	0.92	0.78
29	пос. Орто-Сурт	0.48	11.4	33.3	0.21	1.09	0.94
30	Сабо-Хаинская	0.06	29	61.3	0	0	0
31	Сангарская	0.07	25.6	53.1	0	0	0
32	Северо-Линденская	0.7	6.2	26.5	0.18	1.45	1.31

33	Северо-Тюнгская	0.7	5.8	25.2	0.18	1.56	1.4
34	Синская	0.44	8.3	24.3	0.24	1.6	1.34
35	Средне-Вилуйская	0.55	15.3	49.1	0.18	0.9	0.83
36	Средне-Мархинская	0.82	2	11.5	0.2	2.84	2.6
37	Средне-Тюнгская	0.6	11.6	43.7	0.18	1.09	0.99
38	Сунтарская	0.28	8	19.4	0.26	1.96	1.68
39	Толонская	0.56	15	45	0.18	0.93	0.85
40	Уорангская	0.62	10	35	0.18	1.15	1.03
41	Уордахская	0.4	11.4	33	0.24	1.16	0.97
42	Усть-Вилуйская	0.15	28.3	62.1	0	0	0
43	Усть-Мархинская	0.49	9.5	27.4	0.22	1.34	1.14
44	Усть-Меикская	0.7	3.6	15.8	0.21	2.32	2.1
45	Хайлахская	0.6	11.7	33.7	0.18	1.08	0.98
46	Эксеняхская	0.29	15	36	0.26	0.84	0.62

Примечание к таблице. Геотермические данные (глубина нулевой изотермы, значения температуры на глубине 1 и 2 км) подготовлены сотрудниками ИМЗ СО РАН; H_1 – глубина залегания верхней границы ЗСГ при любой минерализации воды в породе, $H_{2п}$, $H_{2м}$ – глубина расположения нижней границы ЗСГ при насыщении пород пресной или минерализованной (35 г/л) водой. Борулахская площадь (№ 11) – нет данных для оценки ЗСГ; Китчанская, Сабо-Хаинская, Сангарская площади (№№ 16, 30, 31) – нет ЗСГ из-за отсутствия или незначительности криолитозоны.

На данном этапе оценки параметров ЗСГ можно принять, что для всех участков характерен примерно одинаковый вид термограмм. От поверхности до нижней границы мерзлоты температура горных пород повсеместно отрицательная. Ее минимальные значения, порядка $-(3-5)^{\circ}\text{C}$, фиксируются примерно на глубине 0.1 км. Глубже температура увеличивается до 0°C на нижней границе криолитозоны. В подмерзлотной толще пород температура нарастает с глубиной со скоростью, определяемой геотермическим градиентом, изменяющимся на отдельных участках от 10 до 36 мК/м. В первом приближении изменения температуры с глубиной на отдельных участках можно охарактеризовать средними значениями T на глубинах 1 (T_1) и 2 (T_2) км. Большая часть участков характеризуется средними значениями T_1 и T_2 в пределах $(15-20)^{\circ}\text{C}$ и $(25-45)^{\circ}\text{C}$, соответственно (см. табл.). Для сравнения можно отметить, что в северных районах Западно-Сибирской плиты температуры нарастают в подмерзлотном слое значительно быстрее: $T_1 = (20-30)^{\circ}\text{C}$ и $T_2 = (50-70)^{\circ}\text{C}$. Именно эти различия в темпе увеличения T приводят к формированию более мощной ЗСГ в осадочном чехле Вилуйской синеклизы.

Обзор геотермических данных позволяет заключить, что распределение температуры с глубиной в пределах каждого изученного участка Вилуйской синеклизы можно охарактеризовать средними термограммами, построенными по четырем точкам: 1) $T = -5^{\circ}\text{C}$ на глубине 0.1 км для всех площадей; 2) $T = 0^{\circ}\text{C}$ на нижней границе мерзлоты (см. табл.); 3-4) средние для участка значения T_1 и T_2 (см. табл.). Для определения границ ЗСГ такие термограммы по каждому из изученных площадей Вилуйской синеклизы сравнивались с фазовыми диаграммами $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ (рис. 1, графики 1 и 2).

В результате для каждого участка определены глубины расположения верхней и двух нижних (для пород, содержащих пресную и минерализованную воду) границ ЗСГ метана. Эти данные указаны в

таблице. Верхняя граница ЗСГ (H_1) располагается в криолитозоне на глубинах 0.16–0.31 км (в среднем ~ 0.2 км), нижние границы – в подмерзлотном слое. При заполнении пород пресной водой глубина расположения нижней границы ($H_{2п}$) составляет 0.77–2.84 км в зависимости от мощности криолитозоны и величины внутриземного теплового потока, при среднем $H_{2п} = 1.2$ км. В случае минерализованной воды нижняя граница ($H_{2м}$) располагается примерно на 150 м выше, на глубинах 0.62–2.6 км, при среднем $H_{2м} = 1.1$ км. В целом, границы $H_{2п}$ и $H_{2м}$ в пределах Вилюйской синеклизы имеют одинаковые очертания. Для их характеристики на рис. 3 приведено распределение $H_{2п}$.

Наиболее высоко (0.8–0.9 км) нижняя граница ЗСГ расположена в центральной части Вилюйской синеклизы, в пределах Хапчагайского мегавала. Именно здесь ЗСГ имеет минимальную мощность порядка 0.6–0.7 км. На большей части территории за пределами Хапчагайского мегавала $H_{2п}$ опускается до 1.2–1.4 км. К сожалению, отсутствие геотермических данных восточнее р. Лены не позволяет замкнуть или расширить на восток наметившиеся контуры нижней границы ЗСГ. Максимальные значения мощности ЗСГ прогнозируются в западной части синеклизы, где $H_{2п}$ располагается на глубинах более 1.6–2 км.

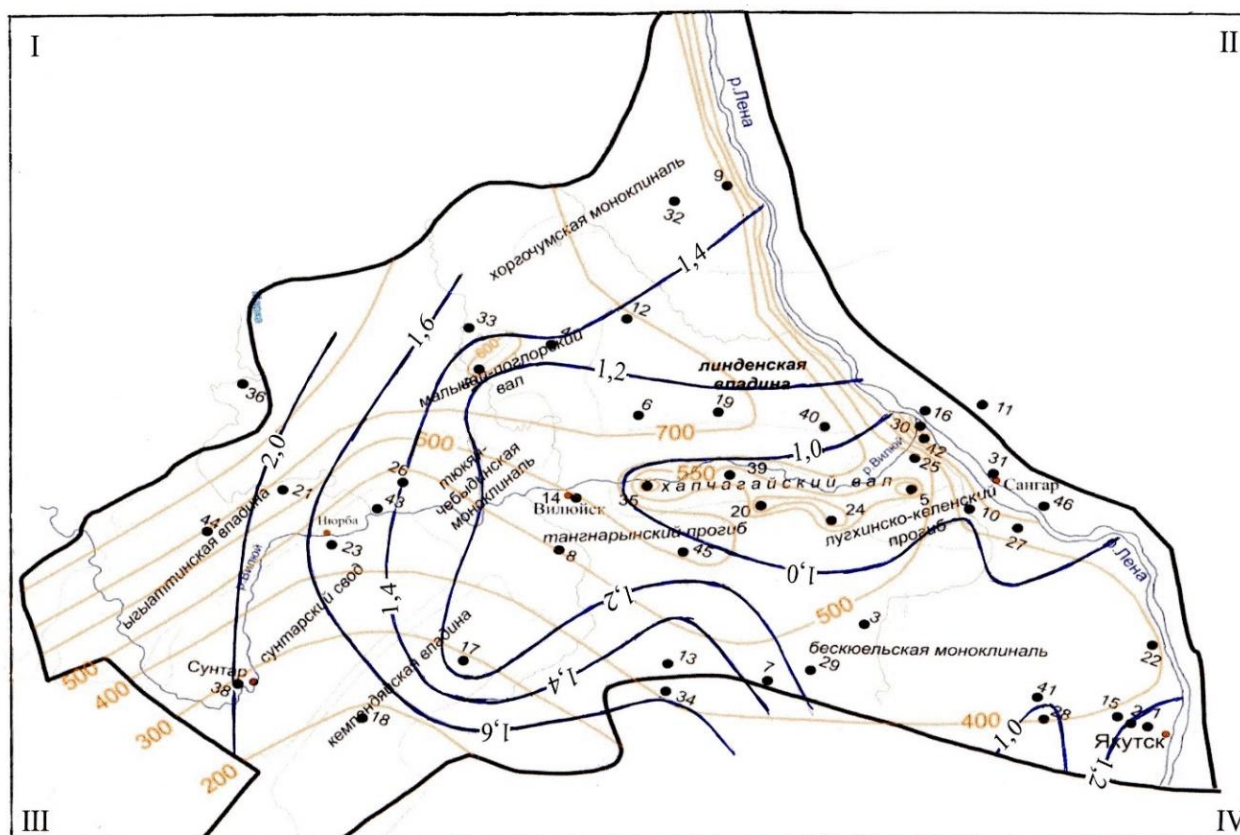


Рис. 3. Схемы расположения в осадочном чехле Вилюйской синеклизы нижних границ ЗСГ ($H_{2п}$, черные изолинии, оцифровка в км) и криолитозоны (желтые изолинии, оцифровка в метрах; схема построена сотрудниками ИМЗ СО РАН). Точками с номерами отмечены изученные разведочные площади; они также перечислены в таблице. Черный контур – граница синеклизы. Цифрами I, II, III, IV обозначены угловые точки рамки рисунка. Координаты угловых точек: I – 66,8° с.ш., 112,4° в.д., II – 67,3° с.ш., 131,4° в.д., III – 60,8° с.ш., 115° в.д., IV – 61,2° с.ш., 131° в.д.

В целом распределение нижней границы ЗСГ метана в осадочном чехле Вилюйской синеклизы хорошо согласуется с латеральным изменением теплового потока [Семенов, Железняк, 2014] и заметно отличается от расположения подошвы криолитозоны (рис. 3). На наш взгляд, это связано с тем, что параметры ЗСГ зависят не только от мощности криолитозоны, но и от величины геотермического градиента (теплового потока) в подмерзлотном слое, причем последний фактор в данном случае имеет основное значение. В качестве примера можно указать на данные по Сунтарской (№ 38) и Эксеньяхской (№ 46) площадям (см. табл.). Средние мощности криолитозоны на этих площадях одинаковы и составляют в среднем 0.28–0.29 км. Однако температуры в подмерзлотном слое на этих площадях существенно различаются, что приводит к разным оценкам расположения нижней границы ЗСГ метана. На Эксеньяхской площади $T_2 = 36^\circ \text{C}$ и $H_{2n} = 0.84 \text{ км}$, а на Сунтарской площади при $T_2 = 19.4^\circ \text{C}$, нижняя граница ЗСГ, по нашей оценке, опускается почти на 2 км ($H_{2n} = 1.96 \text{ км}$).

Необходимо отметить, что на рис. 3 показан первый вариант схемы глубины залегания нижней границы ЗСГ метана в породах Вилюйской синеклизы, насыщенных пресной водой. Чтобы проверить выполненные расчеты, необходимо дальнейшее уточнение средних оценок мощности криолитозоны, распределения подмерзлотных температур, минерализации подземных вод. Другой задачей является более детальное изучение параметров ЗСГ метана в пределах отдельных, хорошо разбуренных площадей. Выполненные в этом случае уже по реальным термограммам оценки глубин расположения границ ЗСГ позволят уточнить их расположение относительно верхних этажей газовых месторождений. Пока еще раз отметим, что самая близкая к земной поверхности ($\sim 1 \text{ км}$) газовая залежь зафиксирована на Средне-Вилюйском месторождении, где $H_{2n} = 0.9 \text{ км}$.

Оценка параметров ЗСГ является первоочередной и необходимой, но не самой важной процедурой при прогнозировании и поисках газогидратов. После ее завершения мы получаем представление о расположении слоя пород, в котором имеются необходимые для формирования гидратов метана температура, давление и вода. Для образования в этом слое скоплений газогидратов необходимо поступление в него в течение длительного времени значительного количества природного газа. Прогнозирование наличия потоков газа или газонасыщенной воды и путей их миграции, а соответственно и мест возможного расположения залежей газогидратов, намного сложнее. Возможно с этим связаны пока незначительные результаты поисков месторождений гидратов метана, которые идут в северных районах континентов (в том числе и в Сибири) уже более 50 лет. Рассмотрим некоторые итоги этих работ.

КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПОИСКОВ ГАЗОГИДРАТОВ В ОБЛАСТЯХ РАЗВИТИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Сибирский регион

Длительное время весьма высоко оцениваются перспективы обнаружения скоплений гидратов метана в ЗСГ Западной Сибири. Так, уже более 50 лет считается, что гидраты метана присутствуют в верхней части (входящей в ЗСГ) Мессояхского газового месторождения, залегающего в породах сеноманского яруса [Истомин, Якушев, 1992; Makogon et al., 2007]. В то же время высказываются и

обоснованные сомнения на этот счет [Гинсбург и др., 2000; Якуцени, 2013]. Считается, что более благоприятные условия для формирования скоплений гидратов метана существуют в коллекторах туронского яруса, залегающих выше сеноманских отложений, например, в пределах Восточно-Мессояхской площади [Агалаков и др., 2001]. Тем не менее, приходится констатировать, что на севере Западной Сибири природные газовые гидраты до сих пор в керне не поднимались (это отмечено и в работе [Якуцени, 2013]). Все рассуждения о возможном присутствии газогидратов в разрезах основываются только на косвенных признаках, по которым нельзя с уверенностью судить даже о существовании, тем более геологии и размерах гидратных месторождений, не говоря уже об оценке содержащихся в них запасов газа и отработке технологии его добычи. Применяемые при бурении на нефть и газ технологии (бурение без отбора керна, аномальные изменения Р–Т условий) не могут привести к обнаружению скоплений газогидратов, даже если бы они и были в разрезах. К сожалению, несмотря на огромный масштаб бурения, в Западной Сибири практически не проводились работы по целенаправленным поискам скоплений метангидратов в перспективных частях разрезов (в пределах ЗСГ) и, что очень важно, с применением специального оборудования для разбуривания и отбора гидратосодержащего керна.

Наиболее часто обсуждаются два механизма формирования скоплений газогидратов в районах распространения многолетнемерзлых пород [Истомин, Якушев, 1992].

Во-первых, формирование гидратов возможно при вхождении в плейстоцене ранее образовавшихся газовых месторождений в зону ЗСГ метана. Предполагается, что именно это и произошло с залежью Мессояхского месторождения [Makogon et al., 2007]. По этой версии в настоящее время в ЗСГ находится только его верхняя часть. Остальные газовые месторождения в сеноманских отложениях, с которыми связан основной газовый потенциал Западной Сибири, расположены, в целом, существенно глубже ЗСГ. Газоносность расположенных выше туронских отложений пока недостаточно разведана [Агалаков и др., 2001]. Весьма вероятно, что такой тип месторождения гидратов метана выявлен китайскими специалистами в Тибете [Song et al., 2014]. Краткие сведения об этом открытии представлены ниже.

Во-вторых, гидратная залежь может образоваться при поступлении природного газа из более глубоких горизонтов в зону стабильности. Этот механизм может быть реализован только в процессе формирования ЗСГ в пределах водонасыщенного коллектора в неконсолидированных породах при одновременном поступлении в этот коллектор достаточного количества метана. Судя по имеющимся данным, на севере Западной Сибири имеются все перечисленные условия, необходимые для реализации второго механизма, кроме одного и возможно основного: здесь нет подходящих для накопления гидратов коллекторов, так как на севере Западной Сибири кайнозойские слабосцементированные отложения практически не развиты: в Ямало-Тазовском и Енисейском районах мощность отложений неогена не превышает 0.2 км, а палеогена – 0.3–0.4 км [Волкова и др., 2002]. Возможно более благоприятные геологические условия для формирования скоплений гидратов метана такого типа могут существовать в восточной части арктической зоны Сибири. Ниже кратко рассмотрено газогидратное месторождение

второго типа, выявленное в дельте реки Маккензи (арктическое побережье Канады) [Scientific results..., 2005].

На наш взгляд, успех в поисках газогидратных скоплений на севере Западной Сибири может обеспечить только постановка специальных буровых работ на предварительно выбранной (с учетом ЗСГ, литологии, сведений о газоносности разреза) площади с применением технологий, способствующих сохранению газогидратов в кернах в процессе бурения и впоследствии. Именно такой подход был использован при открытии указанных выше месторождений гидратов метана в Канаде и Китае.

Месторождение гидратов в Тибете

Выше отмечалось, что формирование гидратов возможно при вхождении уже существующих газовых месторождений в ЗСГ, образовавшуюся при похолодании в плейстоцене. Весьма вероятно, что именно такой тип месторождения гидратов метана выявлен китайскими специалистами в мезозойских впадинах на Цинхай-Тибетском нагорье (координаты 38°05,5' с.ш., 99°10' в.д., высота 4–4,1 км) [Song et al., 2014]. Впадины сложены породами юрского (J₂) возраста: мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, залежами каменного угля. В разрезах обнаружены нефте- и газопроявления. Мощность мерзлоты достигает 0,14 км, мощность ЗСГ – 0,4 км. Границы мерзлоты и ЗСГ значительно изменяются в разрезах в зависимости от поверхностной обстановки. Поиски гидратных скоплений велись на участке с 1999 г. Специальное бурение здесь было организовано в 2008–2009 гг. Пробурено четыре скважины глубиной 0,18–0,76 км с детальным отбором керна. Основным результатом исследований явился подъем гидратосодержащего керна с глубины 0,13–0,4 км. Гидраты встречены в виде льдоподобных слоев мощностью 0,2–4,8 м или рассеянных включений в трещинах кернов. Гидратные проявления мало связаны с литологией. В гидратном газе преобладает метан (54–76 %), а также этан, пропан и CO₂. Это открытие является первой находкой образцов гидратов метана в охлажденной зоне, расположенной в средних широтах.

Месторождение в дельте р. Маккензи (северная Канада)

Другой тип месторождения гидратов метана открыт в осадках над газовым месторождением Маллик в дельте реки Маккензи (арктическое побережье Канады, координаты 69,5° с.ш., 134–135° в.д.) [Scientific results..., 2005]. В этом районе мощность слабосцементированных кайнозойских отложений достигает 2 км, мерзлоты – 0,64 км, ЗСГ – 1,1 км. В 1998–2002 гг. здесь было пробурено несколько исследовательских скважин до глубины 1,15 км. Работы выполнялись международной группой, финансируемой научными организациями Канады, США, Японии, Германии. Геологические и геотермические данные по одной из скважин показаны на рис. 2. При бурении этой и других скважин в нижней части ЗСГ (глубина 0,89–1,1 км) в грубозернистых песках олигоцена обнаружены гидраты метана. При детальном отборе керна на этих глубинах было поднято порядка 110 м гидратосодержащих осадков. Пористость песков изменяется от 25 % до 35 %, а мощность гидратных слоев – от 0,1 до 1,5 м. Насыщенность гидратом порового пространства составляет 50–80 %. Метан, извлеченный из гидратосодержащего керна, относится к термогенному типу. Установлено, что при формировании гидратов газ поступал в песчаный коллектор с глубины 4–5 км по разломной зоне. Газогидраты

распространены в дельте р. Маккензи на площади более 3600 км². Ряд аналогичных месторождений гидратов выявлены и в США на северном побережье Аляски.

ВЫВОДЫ

В статье кратко описана современная ситуация, связанная с поисками месторождений гидратов метана в континентальной части Сибирского региона. Идея поисков возникла вскоре после того, как в 1960-х годах коллектив исследователей во главе с А.А. Трофимуком опубликовал идею (а затем и зарегистрировал открытие) о возможности формирования скоплений газогидратов в земной коре [Васильев и др., 1970]. Задача оказалась весьма сложной. Сейчас приходится констатировать, что за прошедшие более 50 лет не удалось достоверно (с извлечением гидратосодержащего керна) выявить ни одного месторождения метангидратов, даже в породах наиболее хорошо изученного Западно-Сибирского осадочного бассейна, где проведены масштабные объемы бурения на нефть и газ, выявлены косвенные признаки наличия гидратов в разрезах многих площадей, послуживших основанием для многочисленных прогнозов.

На примере успешного открытия двух месторождений гидратов метана в Канаде и Китае показано, что привести к успешному решению задачи по поиску газогидратов может только организация и выполнение целевого проекта на проведение специализированных, технически обеспеченных буровых работ (до глубин 1–2 км) на уже выделенных перспективных участках в северных районах Западной Сибири или в пределах Вилуйской синеклизы.

В данной работе впервые определены параметры зоны стабильности гидратов метана в осадках Вилуйской синеклизы. Показано, что здесь существуют весьма благоприятные условия для формирования скоплений метангидратов: запесоченный разрез, повышенное содержание растворенного метана в воде по всему разрезу, признаки перемещений потоков газа и воды, а также значительные мощности ЗСГ (больше, чем в Западной Сибири), нижние границы которой практически достигают уже выявленных газовых залежей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.П. Семенова за предоставление геолого-геофизических материалов по Вилуйской синеклизе. Исследования поддержаны Интеграционным проектом № 6 «Палеорекострукция теплового поля и криолитозоны Вилуйской синеклизы в позднем плейстоцене-голоцене» Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Агалаков С.Е., Курчиков А.Р., Бабурин А.Н. Геолого-геофизические предпосылки существования газогидратов в туронских отложениях Восточно-Мессояхского месторождения // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11–12. – С. 1785–1791.

- Васильев В.Г., Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А., Трофимук А.А., Черский Н.В.** Свойство природных газов находиться в земной коре в твердом состоянии // Открытия, изобретения, товарные знаки. – М.: Наука. 1970. – № 10. – С. 32–36.
- Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е., Кулькова И.А., Гуськов С.А., Кузьмина О.Б., Левчук Л.К., Михайлова И.В., Сухорукова С.С.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири: Кайнозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во «Гео». – 2002. – 245 с.
- Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А., Дучков А.Д., Прасолов Э.М., Заварзин И.В., Коллетт Т.С.** Присутствуют ли природные газовые гидраты в сеноманской залежи Мессояхского газового месторождения? // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 8. – С. 1165–1177.
- Горячий лед:** как развиваются технологии добычи метана из газовых гидратов в России. ТАСС. 18.01.2018 (электронный ресурс). <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/news/press/press-tass-goryuchiy-led-kak-razvivayutsya-tekhnologii-dobychi-18012018>.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермиков М.Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 4. – С. 62–68.
- Истомин В. А., Якушев В.С.** Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 235 с.
- Погодаев А.В.** Особенности геологического строения, закономерности формирования и размещения газоконденсатных месторождений Вилюйской синеклизы, обоснование новых направлений нефтегазопроисловых работ: Диссертация на соискание ученой степени к.г.-м.н. – Якутск: ИПНГ СО РАН, 2016. – 156 с.
- Семенов В.П., Железняк М.Н.** Геотермические условия Вилюйской синеклизы // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII, № 4. – С. 3–10.
- Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А., Погодаев А.В., Слепцова М.И.** Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилюйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – 20 с.
- Якуцени В.П.** Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8, № 4. – 24 с.
- Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y.** Natural gas hydrates – a potential energy source for the 21st century // J. Petrol. Sci. Engin. – 2007. – Vol. 56, No. 1. – P. 14–31.
- Mazurenko L.L., Soloviev V.A.** Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations // Geo Marine Lett. – 2003. – Vol. 23, No. 304. – P. 162–176.
- Scientific results** from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada / Eds. Dallimore S.R. and Collett T.S. Ottawa, Geological Survey of Canada. – 2005. – Bulletin 585 – 140 p.
- Sloan E.D.** Physical/chemical properties of gas hydrates and application to world margin stability and climatic change // Gas hydrates: relevance to world margin stability and climatic change / Eds. Henriot J-P. and Mienert J. Geological society, London, 1998. – Special publication No. 137. – P. 31–50.
- Song Y., Yang L., Zhao J., Liu W., Yang M., Li Y., Liu Y., Li Q.** The status of natural gas hydrate research in China: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – No. 31. – P. 778–791.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, газовые гидраты.

СОКОЛОВА Людмила Степановна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, тепловые свойства пород.

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, директор Института мерзлотоведения СО РАН. Область научных интересов: мерзлотоведение, геотермия.

АЮНОВ Дмитрий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, тепловые свойства пород



ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕСЧАНЫХ ОБРАЗЦОВ, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРАТ МЕТАНА НЕЦЕМЕНТИРУЮЩЕГО ТИПА

Г.А. Дугаров¹, А.А. Дучков^{1,2}, А.Д. Дучков¹, А.Ю. Манаков³, К.Э. Купер⁴, М.И. Фокин^{1,2}, А.Н. Дробчик¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Россия,

⁴Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11, Россия

e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

В работе исследуется способ формирования песчаных образцов, содержащих гидрат метана нецементирующего типа, заключающийся в том, что в образец после формирования гидрата метана методом «с избытком газа» задавливается вода, насыщенная метаном. Лабораторное исследование проводится на специализированной установке, позволяющей формировать гидратосодержащие образцы и изучать их акустические свойства в процессе проведения экспериментов. Результаты сравниваются с данными ранее проведенных экспериментов на песчаных образцах, содержащих гидрат тетрагидрофурана (ТГФ) и метана, сформированного методом «с избытком газа». Показано, что исследуемый подход приводит к формированию образцов, содержащих гидрат метана нецементирующего типа.

Газогидраты, гидрат метана, гидрат ТГФ, акустические свойства, экспериментальные исследования

LABORATORY STUDY OF SAND SAMPLES CONTAINING METHANE HYDRATE OF NON-CEMENTING TYPE

G.A. Dugarov¹, A.A. Duchkov^{1,2}, A.D. Duchkov¹, A.Yu. Manakov³, K.E. Kuper⁴,
M.I. Fokin^{1,2}, A.N. Drobchik¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Lavrentiev Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

⁴Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Avenue, 11, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

The approach to the formation of sand samples containing methane hydrate of a non-cementing type is studied. The approach is to inject methane-rich water in the sample after formation of methane hydrate by the "excess gas" method. Laboratory research is carried out on a specialized setup that allows to form hydrate-bearing samples and to study their acoustic properties during the experiments. The results are compared with the data of previous experiments on sand samples containing tetrahydrofuran (THF) and methane hydrate formed by the "excess gas" method. It is shown that the studied approach allow to form samples containing methane hydrate of a non-cementing type.

Gas hydrates, methane hydrate, THF hydrate, acoustic properties, experimental research

ВВЕДЕНИЕ

Газогидраты представляют собой твердые кристаллические соединения, образующиеся из газа и воды при определенных термобарических условиях. Для стабильности газогидратов необходимо повышенное давление и достаточно низкая температура. Подходящие термобарические условия соблюдаются в акваториях ниже уровня дна при глубинах от 200 м в арктических регионах, от 500–700 м – в экваториальных. Толщина зоны с подходящими термобарическими условиями может достигать километра. В многолетнемерзлых породах толщина зоны стабильности газогидратов составляет порядка 500 м на глубинах от 250 м [Манаков, Дучков, 2017].

Природные газогидраты рассматриваются как перспективный источник газа. Оцениваемые мировые запасы в 2–10 раз превышают запасы природного газа в традиционных и сланцевых месторождениях [Chong et al., 2016]. Также газогидраты рассматриваются как источник потенциальных осложнений при разработке месторождений [Макогон, Омельченко, 2012; Истомин и др., 2013]. Помимо этого, рассматриваются сценарии влияния возможного разложения газогидратов на изменение климата [Mestdagha et al., 2017].

Необходимость соблюдения термобарических условий для сохранения газогидратов в естественных гидратосодержащих образцах усложняет процесс их извлечения для последующего изучения, а также существенно увеличивает стоимость их получения. Поэтому изучение физических свойств гидратосодержащих образцов в мире в основном проводится на искусственных образцах, сформированных в специализированных установках [Winters et al., 2000; Kulenkampff, Spangenberg, 2005; Priegnitz et al., 2013]. В данной работе рассматриваются эксперименты по изучению акустических свойств искусственно сформированных гидратосодержащих образцов, проведенные на подобной специализированной установке, впервые созданной в России [Дучков и др., 2015; Дучков и др., 2017б].

Существуют различные подходы к формированию гидратов в образцах пород [Waite et al., 2009; Манаков, Дучков, 2017]. Основные из них заключаются в формировании гидрата: в частично насыщенной водой породе (метод «с избытком газа»); из растворенного в воде газа (метод «с избытком воды»); из водного раствора тетрагидрофурана (ТГФ). При этом для первых двух обычно используется метан, что позволяет формировать гидрат, идентичный природному. В большинстве природных скоплений газогидратов образующий газ на 98–99 % состоит из метана. Использование ТГФ обусловлено удобством работы с ним. Гидрат ТГФ формируется уже при нормальном атмосферном давлении при достаточно низкой температуре. Использование различных подходов к формированию гидратов в образцах может

приводить к их различной морфологии, типу расположения гидрата в поровом пространстве [Priest et al., 2009; Waite et al., 2009]. Основное разделение гидратов по морфологии заключается в отнесении их к «цементирующему» или «нецементирующему» типам.

Ранее была проведена серия экспериментов по формированию песчаных образцов, содержащих гидраты метана и ТГФ [Дугаров и др., 2018; Дучков и др., 2018]. При формировании гидрата метана использовался метод «с избытком газа», так как метод формирования гидрата метана «с избытком воды» требует значительных временных затрат на проведение экспериментов. В результате наблюдался разный характер зависимостей скоростей продольных (P) и поперечных (S) волн от гидратонасыщения образца. Гидратонасыщение в данном случае определяется как объемная доля порового пространства, занимаемого гидратом. В случае формирования гидрата метана методом «с избытком газа» наблюдается резкий рост скоростей уже при небольших значениях гидратонасыщения, тогда как для ТГФ такой рост наблюдается при значениях гидратонасыщения более 0.5. Это может быть связано с тем, что в случае формирования гидрата метана методом «с избытком газа» нарабатывается гидрат цементирующего типа, а для ТГФ – нецементирующего типа [Дучков и др., 2018].

При этом гидрат ТГФ и гидрат метана отличаются по своей структуре: кубическая sh – для ТГФ и кубическая sl – для метана. Также в экспериментах с гидратом ТГФ отсутствует свободный газ, который оказывает существенное влияние на акустические свойства. При этом исследования реальных гидратосодержащих образцов (содержат гидрат метана) из зоны Nankai Trough показывают, что этим образцам присуща модель гидрата нецементирующего типа [Konno et al., 2015; Santamarina et al., 2015; Jin et al., 2016]. Возникает необходимость формирования гидрата метана нецементирующего типа в образцах для изучения их физических свойств. В работе [Choi et al., 2014] был предложен вариант формирования гидрата такого типа. В нашей статье рассматривается применимость данного подхода для исследования образцов на имеющейся специализированной установке.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В случае формирования гидрата метана готовится смесь кварцевого песка с дистиллированной водой. Исходное количество воды влияет на итоговое гидратонасыщение. Здесь мы предполагаем, что вся имеющаяся вода перейдет в гидрат. Подготовленная смесь загружается в капролоновую ячейку с внутренним диаметром 26 мм и изменяющейся высотой, от 30 до 50 мм, для компенсации уплотнения образца. Торцы ячеек запаиваются латунной сеткой для удержания образца и сохранения возможности подвода газа к образцу.

В случае формирования гидрата ТГФ готовится смесь кварцевого песка с водным раствором ТГФ с полным флюидонасыщением. На итоговое гидратонасыщение образца влияет массовая доля ТГФ в используемом водном растворе ТГФ [Манаков, Дучков, 2017]. Образцы помещаются в аналогичные описанным выше ячейки, но изготовленные из тефлона, ввиду того что ТГФ разрушает капролон. Торцы ячеек закрываются металлическими крышками. В этом случае подвод газа не нужен, гидрат формируется из водного раствора ТГФ.

Подготовленные ячейки помещаются в камеру высокого давления специализированной установки [Дучков и др., 2015; Дучков и др., 2017б]. К образцам прикладывается аксиальное и радиальное давление в 300 атм. В случае формирования гидрата метана к образцам также подводится газ под давлением 100 атм. Затем температура понижается до значений, находящихся в области стабильности гидрата. Здесь использовалось как поддержание постоянного значения температуры, так и температурные циклы в пределах области стабильности гидратов для замораживания/размораживания воды, не перешедшей в гидрат, с целью ускорения процесса гидратоформирования [Чувиллин, Гурьева, 2009; Li et al., 2011; Чувиллин, Буханов, 2014; Дучков и др., 2017а].

Специализированная установка позволяет проводить акустические измерения на P- и S-волнах в ходе всего эксперимента. В процессе наработки гидрата наблюдается рост скоростей как P-, так и S-волн. Прекращение роста скоростей служит индикатором завершения гидратоформирования. В рассматриваемых экспериментах акустические измерения проводились каждые 5 мин.

Был проведен эксперимент по переформированию гидрата цементирующего типа в гидрат нецементирующего типа в соответствии с работой [Choi et al., 2014]. После полного формирования гидрата метана методом «с избытком газа» по контуру подвода газа в образец была задавлена дистиллированная вода, насыщенная метаном. Гидратонасыщение образца в конце этапа формирования гидрата метана методом «с избытком газа» оценивается по исходному количеству воды в образце. Предполагается, что вся вода перешла в гидрат. После того, как в образец была задавлена насыщенная метаном вода, процесс переформирования гидрата также отслеживался по изменению скоростей P- и S-волн. При выходе значений скоростей на постоянные считаем, что процесс переформирования завершен. После этого проводится разложение гидрата при плавном повышении температуры. Гидратонасыщение в образце с задавленной водой определяется по скачку давления при разложении гидрата и измерению соответствующего этому скачку объема газа.

СКОРОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА

Изменение скоростей P- и S-волн в процессе проведения эксперимента приведено на рис. 1. Этап 1–2 соответствует формированию гидрата методом «с избытком газа». Температурный режим был выбран с поддержанием постоянного значения в области стабильности гидрата метана. Виден резкий рост скоростей как P-, так и S-волн на этапе 1–2 с выходом на некоторое постоянное значение, что свидетельствует об окончании процесса формирования гидрата. Соответствующие итоговые значения скоростей относительно данных по прошлым экспериментам приведены на рис. 2 и обозначены цифрой 2. Для прошлых экспериментов приведены итоговые скорости P- и S-волн после полного формирования гидрата (один маркер представляет собой результаты одного эксперимента). Временные затраты на проведение одного эксперимента составляют от двух дней до двух недель в зависимости от итогового гидратонасыщения.

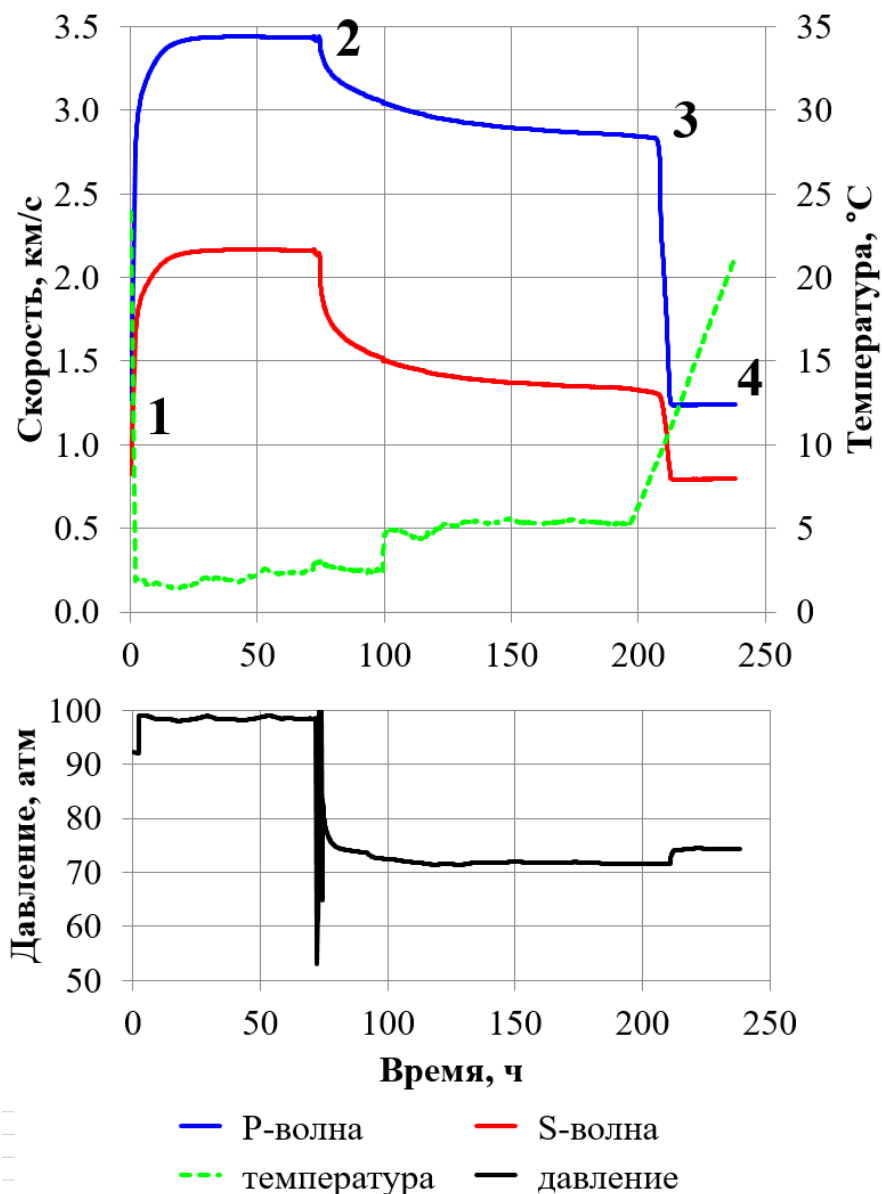


Рис. 1. Поэтапное изменение скоростей Р- и S-волн в процессе эксперимента, а также соответствующие изменения значений температуры образца и давления в контуре подвода газа

Затем на этапе 2 в образец была задавлена дистиллированная вода, насыщенная метаном, через контур подвода газа. На рис. 1 видны соответствующие скачки давления в контуре на времени 70–75 ч. После наблюдается плавное падение скоростей Р- и S-волн, которое интерпретируется как переход гидрата из цементирующего типа в нецементирующий. На 100 ч было решено повысить температуру ближе к границе стабильности гидрата метана, чтобы ускорить процесс переформирования, но к желаемому результату это не привело. После получения данных по разложению гидрата (200–240 ч) стало видно, что повышение температуры было недостаточным, для приближения к границе стабильности гидрата необходимо было повысить температуру еще примерно на 4°C.

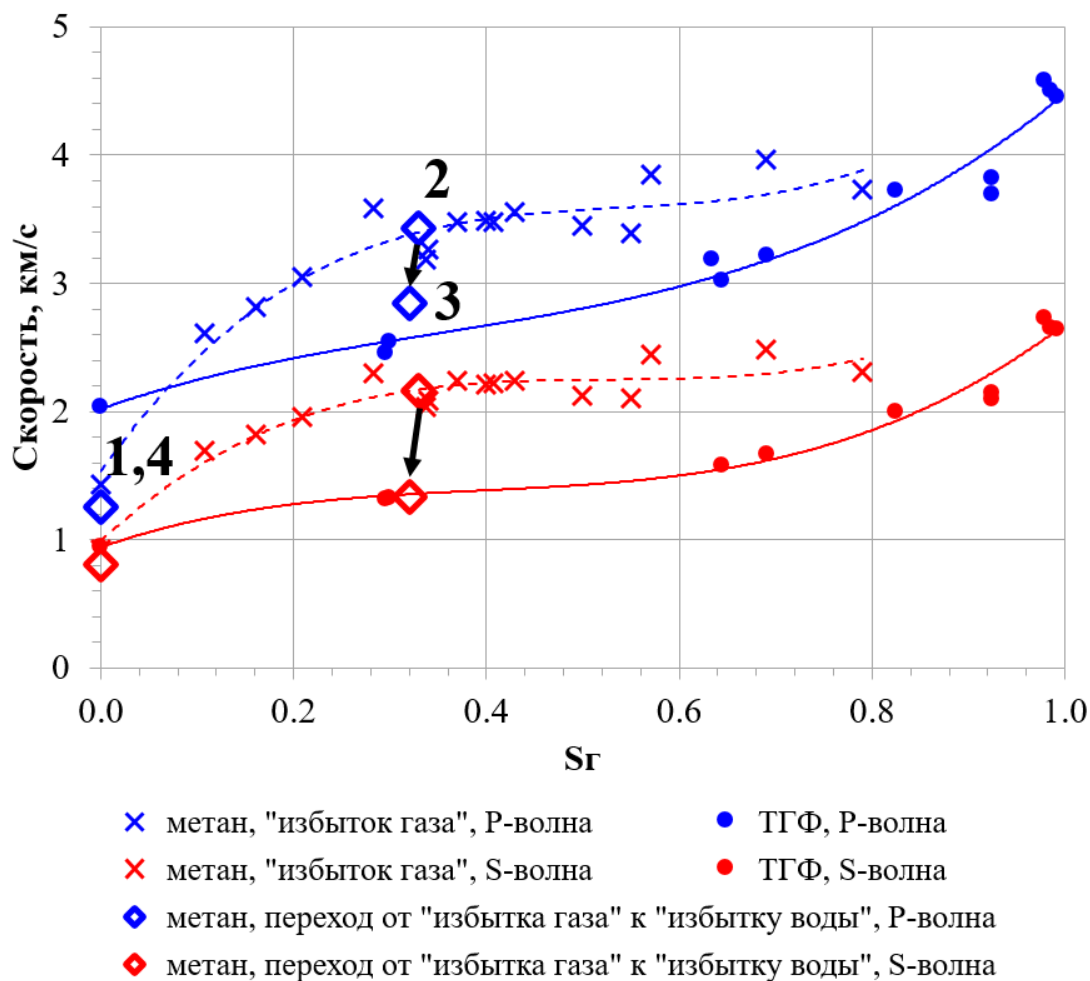


Рис. 2. Изменение скоростей Р- и S-волн на различных этапах проведения эксперимента в сравнении с данными прошлых экспериментов (см. маркеры *метан*, «избыток газа» и *ТГФ*), линиями показана интерполяция полиномами третьей степени

Падение скоростей через каждые 10 ч от начала этапа 2–3 показано на рис. 3. Видно, что к 120 ч от начала этапа 2–3 падение скоростей практически прекратилось. Считаем, что процесс переформирования гидрата завершен. Соответствующие итоговые значения скоростей также отмечены на рис. 2 и обозначены цифрой 3. Видно, что скорость S-волны опустилась до значения, соответствующего данным по образцам с гидратом ТГФ. Значение скорости Р-волны также существенно снизилось, но меньше, чем скорость S-волны.

Примерно после 200 ч началось плавное повышение температуры с целью разложения гидрата. При достижении температуры чуть ниже 10°C наблюдается резкое падение значения скоростей Р- и S-волн, также наблюдается скачок давления в контуре подвода газа, связанный с разложением гидрата в образце (рис. 1). Именно по этому скачку давления затем замеряется соответствующий объем выделившегося газа и оценивается итоговое гидратонасыщение образца до его разложения. Скорости Р- и S-волн в образце после разложения гидрата метана (этап 4 на рис. 1), а также до начала его формирования (этап 1) практически совпадают и обозначены на рис. 2 цифрами 1, 4.

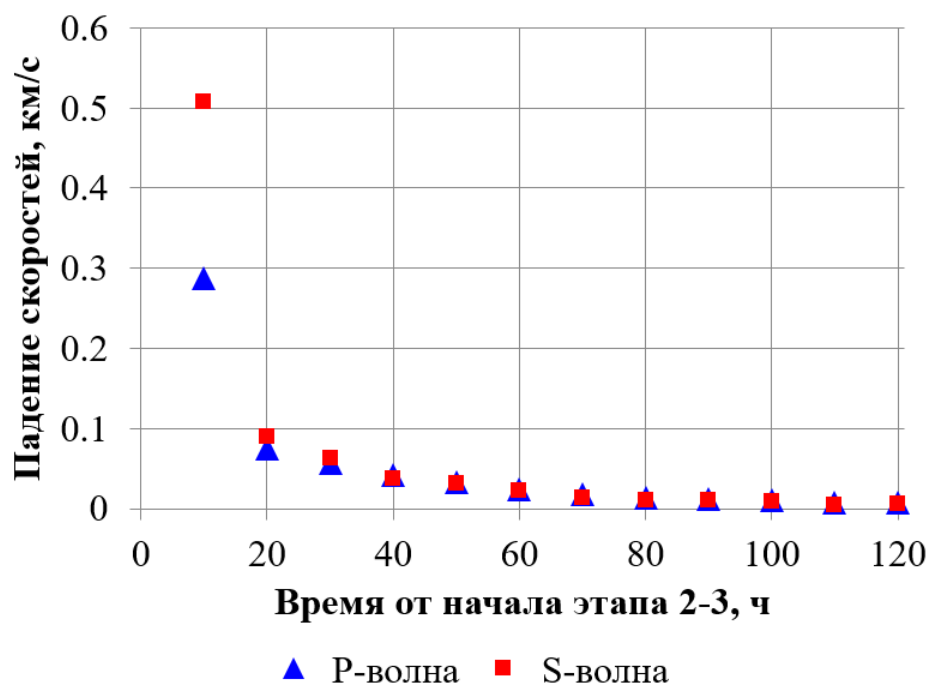


Рис. 3. Падение скоростей P- и S-волн на этапе 2–3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты эксперимента по формированию в поровом пространстве песчаного образца гидрата метана нецементирующего типа. С этой целью после формирования гидрата метана методом «с избытком газа» в образец была задавлена дистиллированная вода, насыщенная метаном. В результате наблюдается медленное падение значений скоростей как P-, так и S-волн, что связывается с процессом переформирования гидрата метана цементирующего типа в нецементирующий. Сравнение полученных данных по скоростям с данными уже проведенных ранее экспериментов по формированию образцов, содержащих гидраты ТГФ и метана, сформированного методом «с избытком газа», подтверждает данный вывод.

В дальнейшем необходимо проведение дополнительных экспериментов при иных значениях гидратонасыщения. Также возможно проведение экспериментов, в которых в образец будет задавлена соленая вода. Наличие солей в воде должно способствовать началу роста кристаллов гидрата в ней.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

ЛИТЕРАТУРА

Дугаров Г.А., Дучков А.А., Дучков А.Д., Дробчик А.Н. Лабораторное изучение акустических свойств гидратосодержащих образцов // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – № 5. – 1750812.

- Дучков А.Д., Голиков Н.А., Дучков А.А., Манаков А.Ю., Пермьяков М.Е., Дробчик А.Н.** Аппаратура для изучения акустических свойств гидратосодержащих пород в лабораторных условиях // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 44–55.
- Дучков А.Д., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Дробчик А.Н.** Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лед или гидраты метана и тетрагидрофурана // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 478, № 1. – С. 94–99.
- Дучков А.Д., Дучков А.А., Манаков А.Ю., Пермьяков М.Е., Голиков Н.А., Дробчик А.Н.** Лабораторное моделирование и измерение акустических свойств образцов пород, содержащих гидраты метана // Доклады академии наук. – 2017а. – Т. 472, № 1. – С. 80–84.
- Дучков А.Д., Дучков А.А., Пермьяков М.Е., Манаков А.Ю., Голиков Н.А., Дробчик А.Н.** Лабораторные измерения акустических свойств гидратосодержащих песчаных образцов (аппаратура, методика и результаты) // Геология и геофизика. – 2017б. – Т. 58, № 6. – С. 900–914.
- Истомин В.А., Моисейкин П.А., Абрашов В.Н., Федулов Д.М., Черных В.В., Медведев С.Г., Сопнев Т.В.** Гидратообразование в призабойной зоне пласта при освоении туронских залежей Западной Сибири // Вести газовой науки. – 2013. – № 5. – С. 99–104.
- Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю.** Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2012. – № 3. – С. 5–19.
- Манаков А.Ю., Дучков А.Д.** Лабораторное моделирование гидратообразования в горных породах // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 290–307.
- Чувилин Е.М., Гурьева О.М.** Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 3. – С. 70–79.
- Чувилин Е.М., Буханов Б.А.** Измерение теплопроводности газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании–оттаивании. Часть 1. Методика исследований // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII, № 1. – С. 70–76.
- Choi J.-H., Dai S., Cha J.-H., Seol Y.** Laboratory formation of noncementing hydrates in sandy sediments // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. – 2014. – Vol. 15. – P. 1648–1656.
- Chong Z.R., Yang S.H.B., Babu P., Linga P., Li X.-S.** Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges // Applied energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 1633–1652.
- Jin Y., Konno Y., Yoneda J., Kida M., Nagao J.** In situ methane hydrate morphology investigation: Natural gas hydrate-bearing sediment recovered from the Eastern Nankai Trough area // Energy and fuels. – 2016. – Vol. 30, No. 7. – P. 5547–5554.
- Konno Y., Jin Y., Yoneda J., Kida M., Egawa K., Ito T., Suzuki K., Nagao J.** Effect of methane hydrate morphology on compressional wave velocity of sandy sediments: Analysis of pressure cores obtained in the Eastern Nankai Trough // Marine and petroleum geology. – 2015. – Vol. 66. – P. 425–433.
- Kulenkampff J., Spangenberg E.** Physical properties of cores from the Mallik 5L-38 gas hydrate production research well under simulated in situ conditions using the field laboratory experimental core analysis system (FLECAS) // Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada / eds. Dallimore S.R., Collett T.S. – Geological Survey of Canada, 2005. – Bulletin 585. – 16 p.

Li D., Wang D., Liang D. P-wave of hydrate-bearing sand under temperature cycling // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76, No. 1. – P. E1–E7.

Mestdagha T., Poort J., de Batista M. The sensitivity of gas hydrate reservoirs to climate change: perspectives from a new combined model for permafrost-related and marine settings // *Earth-science reviews*. – 2017. – Vol. 169. – P. 104–131.

Priegnitz M., Thaler J., Spangenberg E., Rücker C., Schicks J.M. A cylindrical electrical resistivity tomography array for three dimensional monitoring of hydrate formation and dissociation // *Review of scientific instruments*. – 2013. – Vol. 84. – 104502.

Priest J.A., Rees E.V.L., Clayton C.R.I. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands // *Journal of geophysical research*. – 2009. – Vol. 114. – B11205.

Santamarina J.C., Dai S., Terzariol M., Jang J., Waite W.F., Winters W.J., Nagao J., Yoneda J., Konno Y., Fujii T., Suzuki K. Hydro-bio-geomechanical properties of hydrate-bearing sediments from Nankai Trough // *Marine and petroleum geology*. – 2015. – Vol. 66. – P. 434–450.

Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D., Dugan B., Espinoza D.N., Germaine J., Jang J., Jung J.W., Kneafsey T.J., Shin H., Soga K., Winters W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments // *Review of geophysics*. – 2009. – Vol. 47. – RG4003.

Winters W.J., Dillon W.P., Pecher I.A., Mason D.H. GHASTLI – determining physical properties of sediment containing natural and laboratory-formed gas hydrate // *Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments* – Springer, 2000. – Chapter 24. – P. 311–322.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУГАРОВ Гэсэр Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: теория распространения сейсмических волн в анизотропных и поглощающих средах, эффективные модели, акустические свойства гидратосодержащих образцов.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геометрическая теория построения сейсмических изображений, параллельные алгоритмы обработки сейсмических данных, микросейсмический мониторинг в разведочных задачах, лабораторное изучение физических свойств пород, содержащих газогидраты. *E-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru.*

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, геокриология, природные газовые гидраты, физические свойства гидратосодержащих пород. *E-mail: duchkovad@ipgg.sbras.ru.*

МАНАКОВ Андрей Юрьевич – доктор химических наук, заведующий лабораторией Института неорганической химии им. А.А. Николаева СО РАН. Область научных интересов: супрамолекулярная химия, клатратные соединения. *E-mail: manakov@niic.nsc.ru.*

КУПЕР Константин Эдуардович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Область научных интересов: рентгеновская компьютерная томография, микроструктура горных пород. *E-mail: k.e.kuper@inp.nsk.su.*

ФОКИН Михаил Игоревич – лаборант Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: многофазные среды, численное моделирование. *E-mail: fokinmi@ipgg.sbras.ru.*

ДРОБЧИК Аркадий Николаевич – младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: экспериментальные исследования, автоматизация исследований, акустические измерения. *E-mail: drobchikan@ipgg.sbras.ru.*