
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ЯНВАРЬ № 1 2023 МАРТ

УЧРЕДИТЕЛЬ 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. Владов*,
д-р геол.-мин. наук *А.Ф. Глебов*, чл.-к. РАН, 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 *Г.А. Шехтман*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 1	Январь–Март 2023
----------------	-------------------------------	-----	---------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Манштейн А.К., Соколов П.А. Методика измерения минерализации водных растворов в трубопроводных потоках.....	4
Плоткин В.В. Алгоритм устойчивого решения обратной задачи магнитотеллурического зондирования	13
Василевский А.Н., Дашевский Ю.А., Яскевич С.В. Совместный анализ AVO и данных скважинной гравиметрии для повышения разрешающей способности при определении упругих параметров среды.....	25
Смирнов А.С., Сподобаев А.А., Нежданов А.А. Выделение интрузивных тел в сейсмическом поле Ледового месторождения Баренцева моря.....	38
Камашев А.М., Дучков А.А. Применение машинного обучения для адаптивного вычитания кратных отраженных волн.....	54

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2023

ISSN 2619-1563 (Online)

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 1	January–March 2023
-----------------	-----------	------	-----------------------

CONTENTS

Manstein A.K., Sokolov P.A. Method for measuring the mineralization of aqueous solutions in pipeline flows.....	4
Plotkin V.V. Algorithm for stable solution of inverse problem of magnetotelluric sounding	13
Vasilevskiy A.N., Dashevsky Yu.A., Yaskevich S.V. Joint analysis of AVO and borehole gravimetry data to improve the resolution in determining the elastic parameters of the medium	25
Smirnov A.S., Spodobaev A.A., Nezhdanov A.A. Identification of intrusive objects from seismic data within the Ledovoe field in the Barents Sea	38
Kamashev A.M., Duchkov A.A. Application of machine learning for adaptive subtraction of multiple reflected waves	54



МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ТРУБОПРОВОДНЫХ ПОТОКАХ

А.К. Манштейн¹, П.А. Соколов^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия
e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru*

Представлено описание аппаратно-программного комплекса, разработанного и изготовленного для оперативной оценки концентрации растворенного вещества в водном потоке на нижней поверхности металлических труб в различных технологических линиях без отбора проб. В Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука были изучены зависимости электропроводности водных растворов от температуры в специфических условиях – электропроводящей ячейке. Выполнены физические эксперименты с использованием растворов разной минерализации (от 0.5 до 300 г/л), в измерительной ячейке из стали малого объема (8.14 см³). Выполнено математическое моделирование оценки минерализации растворов.

Палетка, минерализация, взрывозащита, геометрический коэффициент, сопротивление, растворы, проводимость

METHOD FOR MEASURING THE MINERALIZATION OF AQUEOUS SOLUTIONS IN PIPELINE FLOWS

A.K. Manstein¹, P.A. Sokolov^{1,2}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,
e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru*

A description of the hardware–software complex designed and manufactured for the operational assessment of the concentration of a dissolved substance in a water stream on the lower surface of metal pipes in various technological lines without sampling is presented. At the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS the dependences of the electrical conductivity of aqueous solutions on temperature were studied under specific conditions – in an electrically conductive cell. Physical experiments were performed using solutions of different mineralization (from 0.5 to 300 g/L), in a measuring cell made of steel of small volume (8.14 cm³). Mathematical modeling of solution mineralization assessment has been performed.

Palette, mineralization, explosion protection, geometric coefficient, resistance, solutions, conductivity

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности имеется необходимость измерения величины минерализации водных растворов. Данные актуальны, поскольку требуются для контроля качества продукции, водного режима, охраны окружающей среды и многого другого.

Мониторинг монорастворов и упрощенный контроль за многокомпонентными растворами можно выполнять с помощью преобразования измеренного сопротивления и температуры в минерализацию по электрической проводимости преобладающего соединения. Обратная величина сопротивлению является групповым показателем, характеризующим ионное содержание всех веществ, растворенных в воде [Методические указания..., 1986]. Известно, что зависимость удельной электрической проводимости солевых растворов от минерализации (изотермический процесс) линейна для концентраций от 0.1 до ~50 г/л ввиду полной диссоциации вещества [Гак, 2013]. Проводимость многокомпонентного раствора равна сумме электрических проводимостей, содержащихся в нем веществ, ввиду взаимной независимости от электропроводности отдельных веществ в растворе (свойство аддитивности). Для водных растворов электролитов допускаются большие погрешности в измерении концентрации (до 20 %), которые определены в соответствующем государственном стандарте [ГОСТ 27384-2002].

Разработанный в ИНГГ СО РАН аппаратурно-программный комплекс «Поточный измеритель минерализации жидкости в газовом трубопроводе» предназначен для оперативной оценки минерализации водных растворов по данным двухэлектродного датчика в потоке жидкости в металлических трубах под большим давлением.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Аппаратурно-программный комплекс состоит из блока питания с барьером искрозащиты, ноутбука с программным обеспечением для записи данных с измерителя RLC E7-22 и датчиков температуры.

В измерительной ячейке (отрезок стальной трубы с внутренним диаметром 24 мм) размещены два платиновых электрода диаметром 0.5 мм, длиной 5 мм и расстоянием между ними 9 мм.

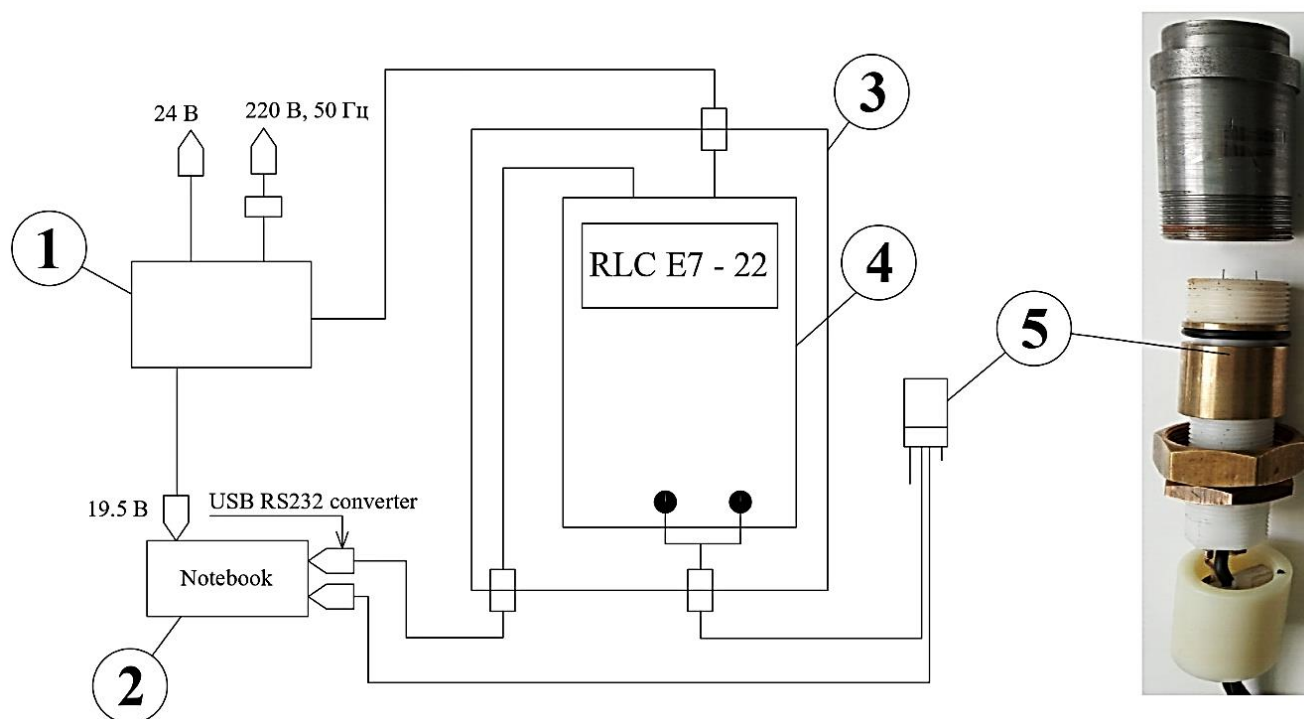


Рис. 1. Блок – схема аппаратурно программно комплекса: 1 – блок питания с барьером искрозащиты, 2 – ноутбук, 3 – взрывозащитный корпус, 4 – измеритель E7-22, 5 – датчик двухэлектродный с измерительной ячейкой

Аппаратурно-программный комплекс взрывобезопасен, при условии, что ноутбук и блок питания, находятся на достаточном расстоянии от точки измерения, то есть не во взрывоопасной зоне.

Блок питания работает от 36 В переменного тока и обеспечивает питанием ноутбук и измеритель RLC E7-22. Во взрывоопасной зоне располагается взрывобезопасный датчик измерения сопротивления с датчиками температуры окружающей среды и температуры раствора. Двухэлектродный датчик может эксплуатироваться в газовом потоке со скоростью до 20 м/с. Измеритель RLC E7-22 находится внутри взрывобезопасного корпуса (рис. 1).

Взрывозащита выполнена согласно требованиям ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99). Основные параметры и характеристики оборудования представлены в табл. 1.

RLC E7-22 работает в режиме измерения сопротивления на частоте 1 кГц. Измеряемая жидкость должна покрывать электроды полностью и образовывать слой над электродами не менее 5 мм. Прибор измеряет ток (I , А) в цепи электродов и падение напряжения на электродах. Сопротивление подводящих проводов пренебрежимо мало. Сопротивление участка цепи между электродами (R , Ом) равно отношению напряжения на величину тока.

Таблица 1

Основные параметры и характеристики

Интервал рабочих температур, °С	от –4 до +50
Датчик R предназначен для подключения к газовой трубе с давлением до, МПа (кг/см ²)	16 (160)
Диапазон измерений, Ом	от 10 до 10 000
Точность измерения сопротивления, %	±0.5
Измеритель температуры корпуса датчика R	есть
Измеритель температуры окружающей среды	есть
Точность измерения температуры, °С	±0.5
Диапазон измеряемых минерализаций, г/л	0.5–300

УЭС (ρ , Ом·м) жидкости равно произведению измеренного сопротивления на геометрический коэффициент χ . Исходя из теоретических выкладок, значение геометрического коэффициента, для случая размещения электродов в однородном пространстве, приближенно равно отношению площади электрода (S , м) на расстояние между электродами (L , м) и мало зависит от минерализации [Сваровская и др., 2017]:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \rightarrow \rho = R \cdot \frac{S}{L} \rightarrow \rho = R \cdot \chi \rightarrow \chi = \frac{\rho}{R}. \quad (1)$$

На практике кондуктометры эталонируются с применением водяных растворов с известными УЭС. Значение коэффициента χ получается расчетным путем согласно выражению (1) из экспериментальных данных.

Как и в большинстве кондуктометров, перевод измеренного сопротивления в удельное электрическое происходит с помощью умножения измеренного сопротивления между электродами на геометрический коэффициент. На рисунке 2 представлены экспериментальные кривые измеряемого сопротивления в измерительной ячейке со стальными стенками (для температуры 25 °С) и расчетного

геометрического коэффициента для перевода этого сопротивления в УЭС. Для оценки расчетного коэффициента применялась палетка Шлюмберже [Ellis, Singer, 2013].

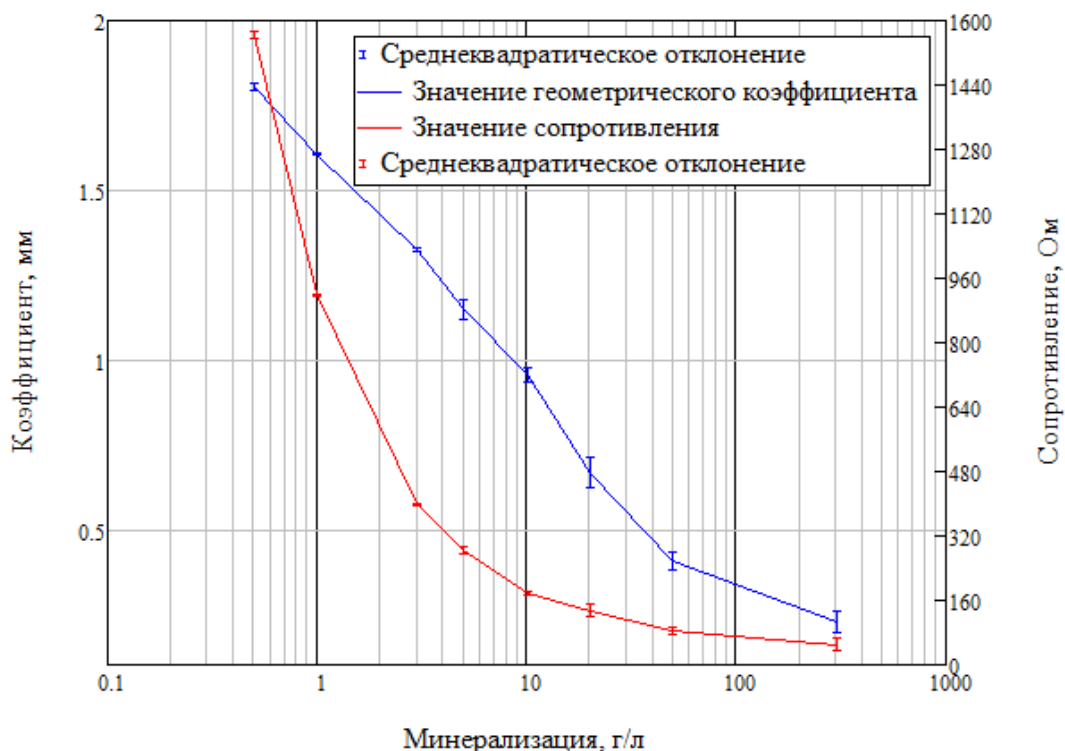


Рис. 2. Зависимость геометрического коэффициента и сопротивления от минерализации раствора в ячейке из стали (температура 25 °С)

Наличие проводящих стенок ячейки влияет на измерение сопротивления датчиком R из-за растекания тока по проводящей стенке. В этом случае данный коэффициент зависит от распределения тока между электродами по двум параллельным контурам – между электродами в жидкости и вокруг электродов по проводящей стенке.

Соответственно, геометрический коэффициент измерительной ячейки в данном приборе не может определяться как принято в рабочих ячейках с непроводящими стенками, что подтверждается графически на рис. 2. В этом проявляется влияние электропроводящих стенок измерительной ячейки. Поэтому было решено интерпретировать экспериментальные данные с помощью палетки зависимостей «Сопротивление, температура, минерализация», которая в последствии была разработана.

Эксперименты выполнены в стабильных термодинамических условиях для растворов минерализаций от 0.5 до 300 г/л. Каждый раствор нагревался в измерительной ячейке до определенной температуры, после чего на термостабильных участках записывались значения сопротивлений. По полученному набору сопротивлений, зависящих от температуры, строились полиномиальные уравнения регрессии второй степени (аппроксимирующая функция) [Селютин, 2018] в виде:

$$R = \alpha \cdot T^2 + \beta \cdot T + \gamma , \quad (2)$$

где R – измеренное сопротивление, Ом; T – температура, °С; α , β , γ – коэффициенты, которые определяются из системы уравнений для квадратичной регрессии вида:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n R_i = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^2 + \beta \sum_{i=1}^n T_i + \gamma n \\ \sum_{i=1}^n R_i T_i = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^3 + \beta \sum_{i=1}^n T_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n R_i T_i^2 = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^4 + \beta \sum_{i=1}^n T_i^3 + \gamma \sum_{i=1}^n T_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая большой объем первичного материала (при частоте измерения регистратора 3–4 в секунду), выполнялась машинная обработка сразу всех измерений для известной минерализации. Такой режим измерений возможен в промышленных условиях и допускает возможность определения качественных данных для дальнейшей обработки. Экспериментальные и аппроксимированные зависимости сопротивления от температуры для разных минерализаций представлены на рис. 3.

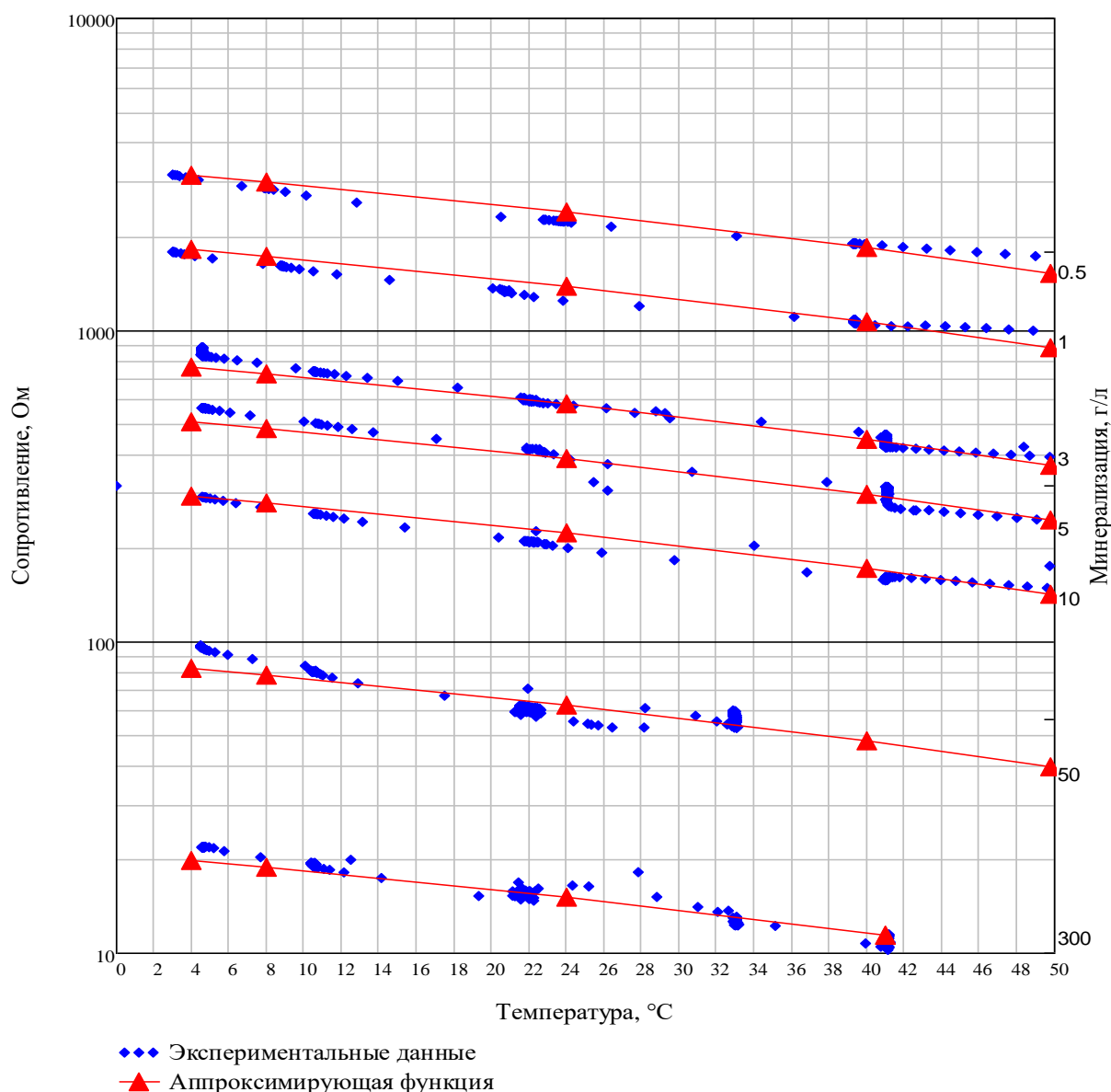


Рис. 3. Экспериментальная палетка зависимостей «Сопротивление, температура, минерализация» с аппроксимирующими функциями

Чтобы найти неизвестные промежуточные данные, применялась интерполяция, основанная на нахождении аппроксимирующей функции для коэффициентов в полиноме (2), описывающем

экспериментальные данные. Основная идея заключалась в нахождении зависимости между коэффициентами α , β , γ и минерализацией. После построения графиков и сравнения нескольких типов аппроксимаций было установлено, что наиболее подходящей аппроксимацией является степенная регрессия (рис. 4).

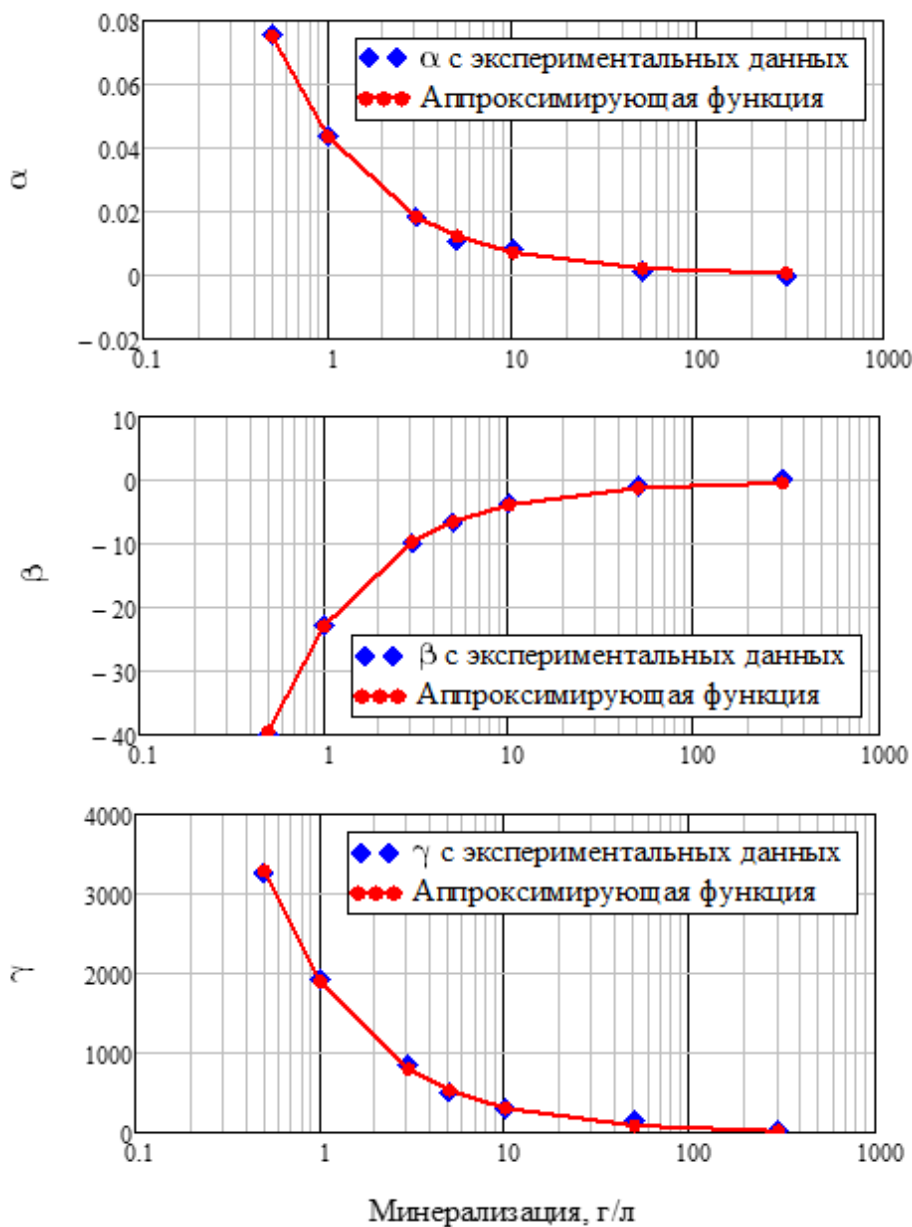


Рис. 4. Зависимости коэффициентов α , β , γ от минерализации

Найденные аппроксимирующие функции для коэффициентов α , β и γ равны:

$$\begin{aligned}
 \alpha(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79144}, \\
 \beta(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79146}, \\
 \gamma(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79148},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где C – минерализация, г/л.

Подставляя найденные функции в уравнение (2), можно выразить минерализацию, зависящую от температуры и сопротивления, при условии, что степень в $\alpha(C)$, $\beta(C)$ и $\gamma(C)$ изменяется незначительно и можно считать ее одинаковой. Таким образом, конечная формула для расчета концентрации для поточного измерителя имеет вид:

$$C(R, T) = \left(\frac{R}{0.0434 \cdot T^2 - 22.7757 \cdot T + 1904.5654} \right)^{1/-0.79146}, \quad (5)$$

где R – измеренное сопротивление, Ом; T – температура, °С; C – минерализация, г/л.

Цифровые коэффициенты оценки точности для $\alpha(C)$, $\beta(C)$ и $\gamma(C)$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка точности цифровых коэффициентов

Коэффициент	Коэффициент корреляции	Средняя ошибка аппроксимации, %
$\alpha(C)$	0.99957	4.236
$\beta(C)$	0.99972	3.415
$\gamma(C)$	0.99952	1.313

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построенная палетка зависимости «Сопротивление, температура, концентрация» (рис. 3) может применяться для перевода величин сопротивления и температуры в минерализацию для данного аппаратурно-программного комплекса графически.

Выполнено сравнение расчета минерализации по формуле (5) с данными, полученными в лабораторных условиях. Для этого измеряемый раствор помещался в измерительную ячейку датчика R , регистрировалось сопротивление и температура, после чего измеренные данные подставлялись в уравнение (5) и определялась погрешность между рассчитанным значением минерализации и исходными. Результаты сравнения представлены в табл. 3. Погрешность определения минерализации удовлетворяет государственным стандартам (10–20 %) [ГОСТ 27384-2002].

Таблица 3

Результат тестирования расчета минерализации

Дата	Минерализация раствора, г/л	Сопротивление, Ом	Температура раствора, °С	Относительная погрешность расчета минерализации к лабораторным данным, %
24.04.21	0.3	3217	27.5	-7.236
26.05.21	0.37	3457	9.8	-7.887
14.05.21	1	1475.8	23.2	6.484
18.05.21	10	231.4	27.4	10.344
29.05.21	50	60	22.6	-8.175
21.04.21	300	14.9	22.4	-5.184

Ограничения в расчете минерализации по формуле (5):

1. Достоверными данными можно считать в пределах аппроксимации экспериментальных данных (от 0.5 до 300 г/л).
2. С учетом приемлемой погрешности для всех минерализаций температурный интервал измерений – от 4 до 50 °С.
3. Измерения в диапазоне сопротивлений от 10 Ом до 10 кОм пригодны для выполнения расчета минерализации.

ВЫВОДЫ

Расчет по формуле (5) при подстановке измеренного сопротивления и температуры дает значение минерализации. Зная минерализацию, можно получить удельное электрическое сопротивление и удельную электрическую проводимость при любой температуре по уже известной палетке Шлюмберже [Ellis, Singer, 2013]. Приведенные результаты исследования могут быть использованы там, где необходимо производить контроль качества продукции, ведения водного режима, охраны окружающей среды и многого другого в автоматическом режиме при размещении датчика (измерительной ячейки) в стальной трубе.

В статье представлена обоснованная методика измерения концентрации растворенного вещества по преобладающему соединению в реальном времени в потоке жидкости непосредственно в технологическом оборудовании. Такая методика может использоваться не только в промышленности, но и в быту, например, для контроля качества водопроводной воды.

Разработанная методика может применяться в упрощенном контроле за многокомпонентными растворами в автоматизированном режиме [Методические указания..., 1986]. Разработанная палетка, связывающая сопротивление и температуру раствора с минерализацией для разработанного датчика, с помощью аппроксимации и интерполяции экспериментальных данных, позволяет получать сразу числовое значение концентрации растворенного вещества без предварительной температурной компенсации.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Новосибирского государственного технического университета. Грант № 021 – НСГ – 21.

Авторы выражают признательность д.т.н., профессору И.Н. Ельцову за оказанную помощь при проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гак Е.З. Магнитные поля и водные электролиты – в природе, научных исследованиях, технологиях. – СПб.: Элмор, 2013. – 536 с.

ГОСТ 27384-2002. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств; Введ. с 1 января 2004 г. – М.: Стандартинформ, 2010. – 15 с.

ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99). Электрооборудование взрывозащищенное; Введ. с 9 декабря 1999 г. – М.: Стандартинформ, 2008. – 120 с.

Методические указания по применению кондуктометрического контроля для ведения водного режима электростанций МУ 34-70-114-85. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. – 37с.

Сваровская Н.А., Колесников И.М., Винокуров В.А. Электрохимия растворов электролитов. Часть I. Электропроводность: Учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – 66 с.

Селютин А.Д. Аппроксимация полиномов n степени методом наименьших квадратов // Молодой ученый. – 2018. – № 16 (202). – С. 91–96.

Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, 2013. – 692 p.

REFERENCES

Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, 2013. – 692 p.

Gak E.Z. Magnetic fields and aqueous electrolytes – in nature, scientific research, technology. – St. Petersburg: Elmor, 2013. – 536 p.

GOST 27384-2002. Norms of measurement error of indicators of composition and properties; Introduction since January 1, 2004. – Standartinform, Moscow, 2010. – 15 p.

GOST R 51330.10-99 (IEC 60079-11-99). Explosion-proof electrical equipment; Introduction since December 9, 1999. – Standartinform, Moscow, 2008. – 120 p.

Guidelines for the use of conductometric control for maintaining the water regime of power plants MU 34-70-114-85. – SPO Soyuztekhnenergo, Moscow, 1986. – 37p.

Selyutin A.D. Approximation of polynomials of degree n by the method of least squares // Young Scientist. – 2018. – Vol. 16 (202). – P. 91–96.

Svarovskaya N.A., Kolesnikov I.M., Vinokurov V.A. Electrochemistry of electrolyte solutions. Part I. Electrical Conductivity: Study Guide. – Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin, Moscow, 2017. – 66 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАНШТЕЙН Александр Константинович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: электрометрические измерения и разработка электроразведочной аппаратуры.

СОКОЛОВ Павел Андреевич – магистрант Новосибирского государственного технического университета, инженер лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: автоматизация обработки данных и изучение методов подавления электромагнитных помех.

*Статья поступила 16 ноября 2022,
принята к печати 2 февраля 2023*



АЛГОРИТМ УСТОЙЧИВОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.В. Плоткин

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

При решении обратных задач магнитотеллурического зондирования (МТЗ) появляются эквивалентные решения, заметно отличающиеся друг от друга. Но решение прямой задачи при заданной модели среды и граничных условиях единственно, отклик среды на источник электромагнитного поля уникален. Рассматривается алгоритм, ведущий к точному решению тестовой задачи при стремлении к нулю невязок входных и модельных данных. Используется несколько стартовых моделей среды и два метода оптимизации: нелинейный метод наименьших квадратов с вычислениями матрицы чувствительности и метод на базе метаэвристических алгоритмов, применяемых, когда целевые функции имеют несколько локальных минимумов. С помощью численных расчетов получено устойчивое решение обратной задачи МТЗ для модели 3D-среды.

Магнитотеллурическое зондирование, обратная задача, устойчивое решение, трехмерная модель

ALGORITHM FOR STABLE SOLUTION OF INVERSE PROBLEM OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING

V.V. Plotkin

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: PlotkinVV@ipgg.sbras.ru*

When solving inverse problems of magnetotelluric sounding (MTS), equivalent solutions appear, noticeably different from each other. But the solution of a direct problem under a given medium model and boundary conditions is the only one, the response of the medium to the source of the electromagnetic field is unique. An algorithm is considered that leads to an accurate solution of the test problem when striving for zero inconsistencies in input and model data. Several starting medium models and two optimization methods are used: a nonlinear least squares method with calculations of the sensitivity matrix and a method based on metaheuristic algorithms used when target functions have several local minima. Using numerical calculations, a stable solution of the inverse MTS problem for the 3D-medium model was obtained.

Magnetotelluric sounding, inverse problem, stable solution, three-dimensional model

ВВЕДЕНИЕ

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для изучения неоднородных глубинных структур электропроводности Земли [Жданов, 1986; Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Сведения получают в ходе решения обратной задачи, которая, как и любая такая задача, является неустойчивой. Поэтому возможно появление эквивалентных решений, существенно отличающихся друг от друга, однако

соответствующих весьма малым невязкам исходных и модельных данных МТЗ. Для устранения эквивалентных решений проводят регуляризацию задачи – накладывают дополнительные условия, ограничивающие область их поиска и отбора. В то же время известно, что решение прямой задачи при заданной модели среды и правильно поставленных условиях на границах ее изучаемого объема является единственным. Отсюда следует, что и регистрируемый отклик среды на источник электромагнитного поля является уникальным. Под неустойчивостью обратной задачи понимают тот факт, что изменения отклика среды могут быть весьма малыми даже при ее существенных изменениях. Но тогда важно учитывать насколько малые изменения отклика среды регистрируются в эксперименте или возникают при численных расчетах. В первом случае это погрешности измерений, а во втором ошибки вычислений.

Наличие шумов и аппаратных ограничений в эксперименте сказывается на величине погрешностей измерений и увеличивает область эквивалентности решений обратной задачи. В то же время при численных расчетах тестовой обратной задачи, когда взятая модель среды известна, можно попытаться найти алгоритм точного ее решения, так как область эквивалентности при численных расчетах связана с ошибками вычислений, гораздо меньшими погрешностей измерений. Кроме того, это позволяет определить, какие объемы входных данных и априорной информации необходимы для полного восстановления среды, и как это осложняется внесением шумов во входные данные.

Представляет интерес такой алгоритм, который при стремлении к нулю невязок исходных и модельных данных приводил бы к нужному решению, в частности, к точному решению тестовой задачи, для которой оно известно. Можно воспользоваться априорной информацией, которая ограничивает коридоры значений электропроводности, количество и толщины неоднородных слоев, пространственную область локализации неоднородностей в среде. В данной работе предлагается один из возможных алгоритмов, и его применение рассматривается при решении обратной задачи МТЗ для трехмерно неоднородной среды.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ И ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Нами было проведено численное моделирование для 3D-среды. Расчеты поля проводились методом Треффца [Егоров, 2011; Плоткин, Губин, 2015]. Модель среды представляется набором параллелепипедов, в которых электропроводность однородна. Взятая для расчетов модель 3D-среды показана на рис. 1.

Эту модель можно описать вектором, координаты которого x_k соответствуют ее параметрам в определенном порядке. Сначала идут параметры $x_k = \ln \sigma_k$, где σ_k – значения электропроводностей в однородных параллелепипедах трех верхних латерально неоднородных слоев. Нумерация параллелепипедов, обозначенных на рис. 1 точками белого цвета, начинается с левого нижнего угла верхнего слоя ρ_1 и продолжается последовательно слева направо и вверх до правого верхнего угла этого слоя. Как видно, каждый слой представлен 25 параллелепипедами.

Далее аналогично нумеруются параллелепипеды в нижележащих слоях ρ_2 и ρ_3 . Всего для модели 3D-среды на рис. 1 получается 75 таких параметров. Затем следуют параметры $x_k = \ln h_k$, где h_k – толщины неоднородных слоев (снизу вверх), параметры $x_k = \ln \sigma_k$, где σ_k – значения электропроводностей двух однородных подстилающих слоев (сверху вниз), и последний параметр $x_k = \ln h_k$, где h_k – толщина верхнего из этих подстилающих слоев (всего 81 параметр). Все параметры 3D-среды положительные, так как $e^{x_k} > 0$.

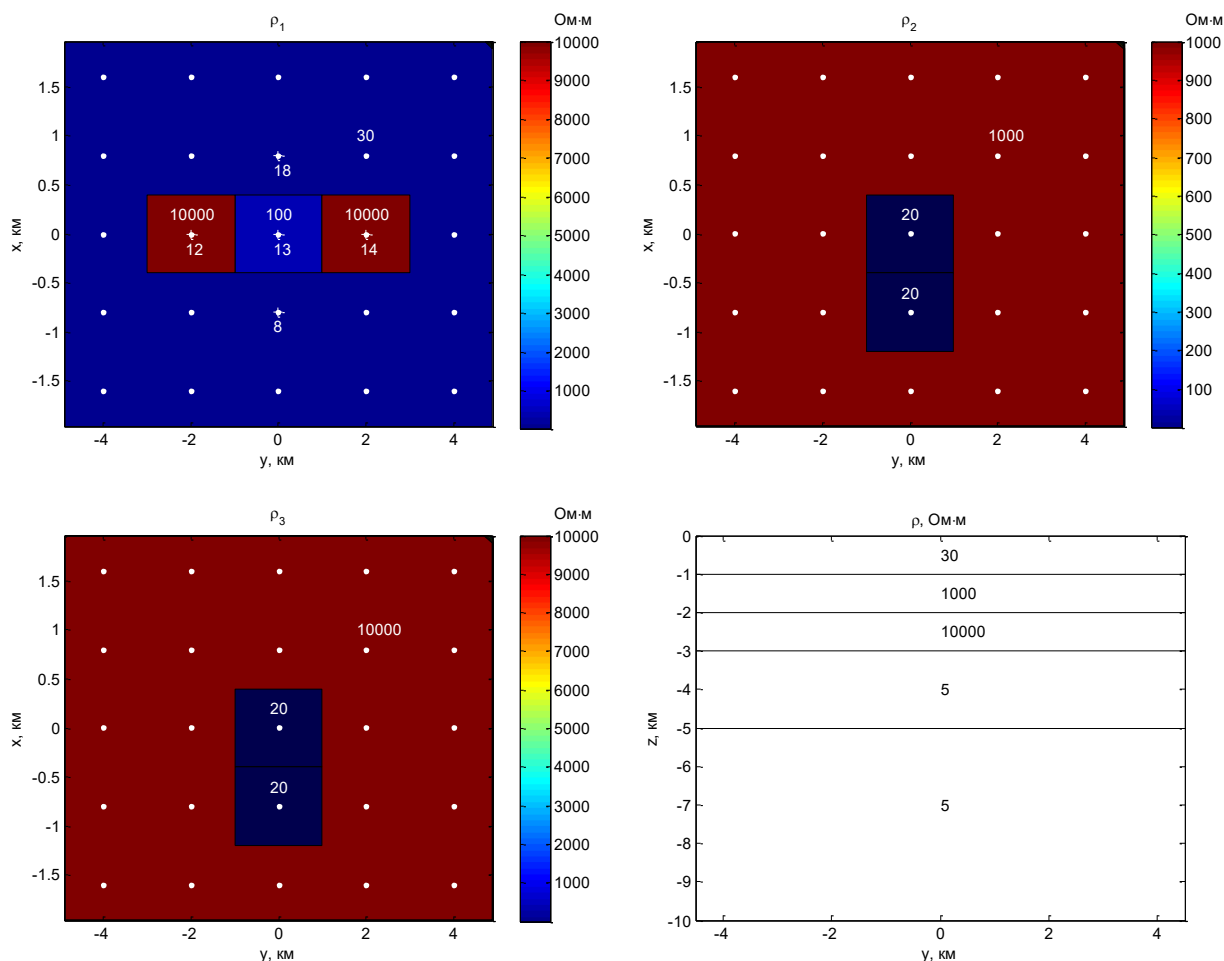


Рис. 1. Распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) в трех верхних латерально неоднородных слоях (цифры – УЭС в Ом·м, центры параллелепипедов показаны точками белого цвета, пункты МТЗ отмечены крестиками, номера пунктов указаны цифрами ниже крестиков) и глубинный геоэлектрический разрез фоновой среды

На рисунке 2 приведены рассчитанные методом Треффца стандартные кривые $\rho_{xy}(\omega)$ и $\rho_{yx}(\omega)$ [Жданов, 1986; Бердичевский, Дмитриев, 2009], а также модовые кривые $\rho_{11}(\omega)$ и $\rho_{22}(\omega)$ [Плоткин, Потапов, 2020; Plotkin et al., 2020] кажущегося сопротивления в нескольких пунктах МТЗ (их положение показано на рис. 1), которые использовались как входные данные для обратных задач.

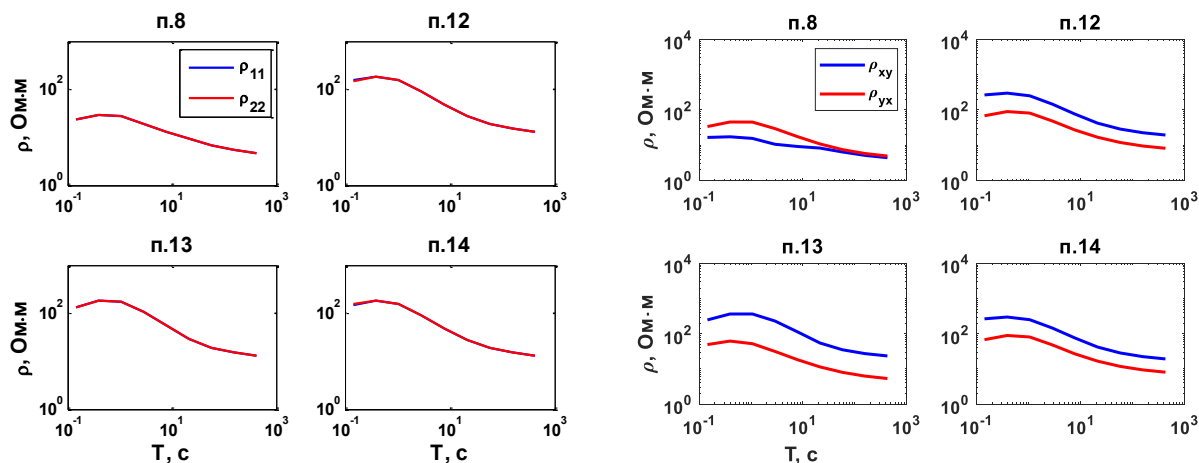


Рис. 2. Модовые (слева) и стандартные (справа) кривые кажущегося сопротивления в некоторых пунктах МТЗ, рассчитанные методом Треффца для модели 3D-среды (см. рис. 1)

Для ясности укажем, что модовые кривые кажущихся сопротивлений соответствуют импедансным соотношениям между амплитудами волн с правой и левой круговой поляризацией [Плоткин, Потапов, 2020; Plotkin et al., 2020] по аналогии со стандартными кривыми для импедансных соотношений между декартовыми компонентами поля. Можно отметить, что модовые кривые в отличие от стандартных практически не отличаются друг от друга. Хорошо видны смещения стандартных кривых по оси ординат относительно друг друга (гальванические искажения), вызванные возбуждением электростатических полей в латеральных неоднородностях. Однако на модовых кривых гальванические смещения практически не заметны, что вызвано характером возбуждения электростатического поля в латеральной неоднородности при воздействии на нее волны с круговой поляризацией (направления вращения вектора электрического поля для эффекта не существенны).

При решении обратной задачи существенную роль играет учет априорной информации о модели среды, полученной по результатам предыдущих работ или предварительного анализа экспериментальных данных.

В частности, для конкретности будем далее предполагать, что известно количество латерально неоднородных слоев над подстилающей горизонтально-слоистой средой. Такой вывод можно сделать по результатам одномерных инверсий всех модовых кривых кажущихся сопротивлений во взятых пунктах МТЗ. При оптимизации модели среды находим наименьшее количество слоев, обеспечивающее малые значения функционала невязок Φ :

$$\Phi = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\ln \rho - \ln \rho_{11,22}^0}{\ln \rho_{11,22}^0} \right|_k^2,$$

где K – количество всех учитываемых временных периодов, $\rho_{11,22}^0$ – модовые «экспериментальные» кривые кажущихся сопротивлений (для исходной модели среды), ρ – кажущееся сопротивление подбираемого одномерного слоистого разреза, рассчитываемое по известной формуле [Жданов, 1986; Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Как оказалось, кривые кажущихся сопротивлений подобранных одномерных разрезов во всех случаях совпадали с «экспериментальными» модовыми кривыми при значениях $\Phi \leq 10^{-4}$ и наименьшем количестве из трех слоев над подстилающей однородной средой. Однако для 3D-среды все такие разрезы являются эквивалентными (не совпадают с локальными).

Учитывая гальванические искажения стандартных кривых кажущегося сопротивления в пунктах МТЗ, можно уточнить локализацию латеральных неоднородностей относительно этих пунктов на исследуемом полигоне. Это позволяет уменьшить количество неизвестных параметров искомой модели среды. Учитывая поведение стандартных кривых в пп. 8, 12–14 и 18, было принято, что латеральные неоднородности локализованы под этими пунктами. С другой стороны, будет надежнее, если это обстоятельство подтверждено и имеющейся априорной информацией. Поэтому также рассмотрены варианты с меньшим (пп. 8, 12–14) и большим (пп. 7–9, 12–14) количеством взятых пунктов наблюдений.

Весьма важны также априорные данные о коридорах возможных вариаций параметров искомой модели среды, сведения о которых получены по результатам проведенных ранее исследований. Будем предполагать, что по априорной информации значения УЭС ограничены диапазоном от 1 до 20 000 Ом·м, а толщины слоев диапазоном от 0.2 до 4 км.

СТАРТОВЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Для получения устойчивого решения обратной задачи использовалось несколько стартовых моделей среды. Первая модель получена усреднением результатов одномерных инверсий модовых кривых во взятых пунктах МТЗ. В этих случаях для оптимизации моделей среды использовался нелинейный метод наименьших квадратов и итерационный процесс с вычислениями матрицы чувствительности и ее сингулярного SVD-разложения [Senkaya, Karsli, 2016]. Для устойчивости и регуляризации процесса в целевой функционал добавлен член $\lambda \sum_k x_k^2$, где x_k – искомые параметры модели среды, и λ – параметр, от величины которого зависит устойчивость процесса. При поиске минимума Φ существует конкуренция членов с невязками данных и члена $\lambda \sum_k x_k^2$. Параметр λ для следующей итерации выбирался, учитывая зависимость $\Phi(\lambda)$, положение точки ее минимума и коридор возможных значений x_k . Тот или иной выбор λ отвечает за появление “эквивалентных” моделей среды, не совпадающих с исходной. Для точного совпадения лучше выбирать как можно меньшие значения λ (когда это возможно).

Наряду с указанным методом оптимизации моделей среды использовался другой метод [Zhao et al., 2020] на базе метаэвристических алгоритмов, применяемых, когда целевые функции имеют множество локальных пиков. Указанные алгоритмы основаны на математических моделях природных явлений и биологических систем. В частности, в работе [Zhao et al., 2020] базой названо поведение популяции морских скатов манта во время кормления. Поэтому алгоритму выбрано название MRFO (Manta Ray Foraging Optimization). В качестве популяции вводится семейство искомых моделей среды и анализируется коллективное поведение. Алгоритм включает три варианта оптимизации: коллективное поведение роя особей – поведение самоорганизующихся естественных систем; алгоритм спиральной оптимизации – многоточечного поиска, в котором точки поиска следуют траекториям логарифмической спирали к общему центру, определяемому как текущая наилучшая точка; алгоритм скачков между текущей позицией и ее симметричным отражением относительно лучшей позиции, найденной до сих пор. Детали алгоритмов более подробно приведены в [Zhao et al., 2020]. Мы использовали программу авторов на языке МатЛаба и доступную в сети интернет по ссылке: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73130-manta-ray-foraging-optimization-mrfo>.

Существенно, что в этом методе оптимизации модели среды не нужно задавать стартовую модель, поскольку одновременно производится поиск как локальных минимумов целевого функционала, так и его глобального минимума. Поэтому требуется указать лишь коридор возможных значений искомых параметров x_k .

Метод MRFO применим для оптимизации 1D, 2D и 3D моделей среды по данным одного или нескольких пунктов МТЗ. Для конкретности следует задать нужный вариант расчетов прямой задачи и целевого функционала Φ . Как выше указывалось, нами в 3D случае расчеты кривых МТЗ выполнялись по методу Треффца. Используемые функционалы Φ суммы всех невязок для модовых или для стандартных кривых рассчитывались по следующим формулам:

$$\Phi = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{11} - \ln \rho_{11}^0}{\ln \rho_{11}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{22} - \ln \rho_{22}^0}{\ln \rho_{22}^0} \right|_k^2 \right),$$

$$\Phi = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{xy} - \ln \rho_{xy}^0}{\ln \rho_{xy}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{yx} - \ln \rho_{yx}^0}{\ln \rho_{yx}^0} \right|_k^2 \right),$$

где K – количество всех учитываемых периодов и пунктов МТЗ, $\rho_{11,22}$, $\rho_{11,22}^0$ – модовые кажущиеся сопротивления для текущей и исходной модели среды соответственно, и $\rho_{xy,yx}$, $\rho_{xy,yx}^0$ – стандартные кажущиеся сопротивления для текущей и исходной модели среды соответственно.

Если найденная методом MRFO модель среды не совпадала с исходной моделью, мы использовали ее как стартовую для последующей оптимизации упомянутым выше нелинейным методом наименьших квадратов. Отметим, что получение стартовых моделей во всех случаях проводилось с использованием функционалов невязок только модовых кривых, поскольку при этом нет проблемы выбора какой-либо из них в силу их близости. В окончательной оптимизации нелинейным методом наименьших квадратов для достижения поставленной цели использовался функционал суммы невязок модовых и стандартных кривых МТЗ из-за его большей чувствительности к эффектам в 3D-среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера приведем полученные результаты в случае учета кривых МТЗ в пп. 8, 12–14 и 18 (рис. 1). Как упоминалось, априори было принято, что латеральные неоднородности локализованы под этими пунктами, а глубинный разрез представлен тремя латерально неоднородными слоями с однородной подстилающей средой. Количество параметров x_k , описывающих такой разрез, сокращается до 23 (фоновые значения УЭС в 3 слоях, $5 \times 3 = 15$ значений УЭС под 5 пунктами, 3 толщины слоев, равные значения УЭС в двух подстилающих слоях и 1 толщина верхнего подстилающего слоя; задание 2 подстилающих слоев с равным УЭС вызвано особенностями программы). Значения x_k соответствуют последовательно трем неоднородным слоям – по 6 параметров сверху вниз, далее – толщинам этих слоев и параметрам подстилающей среды.

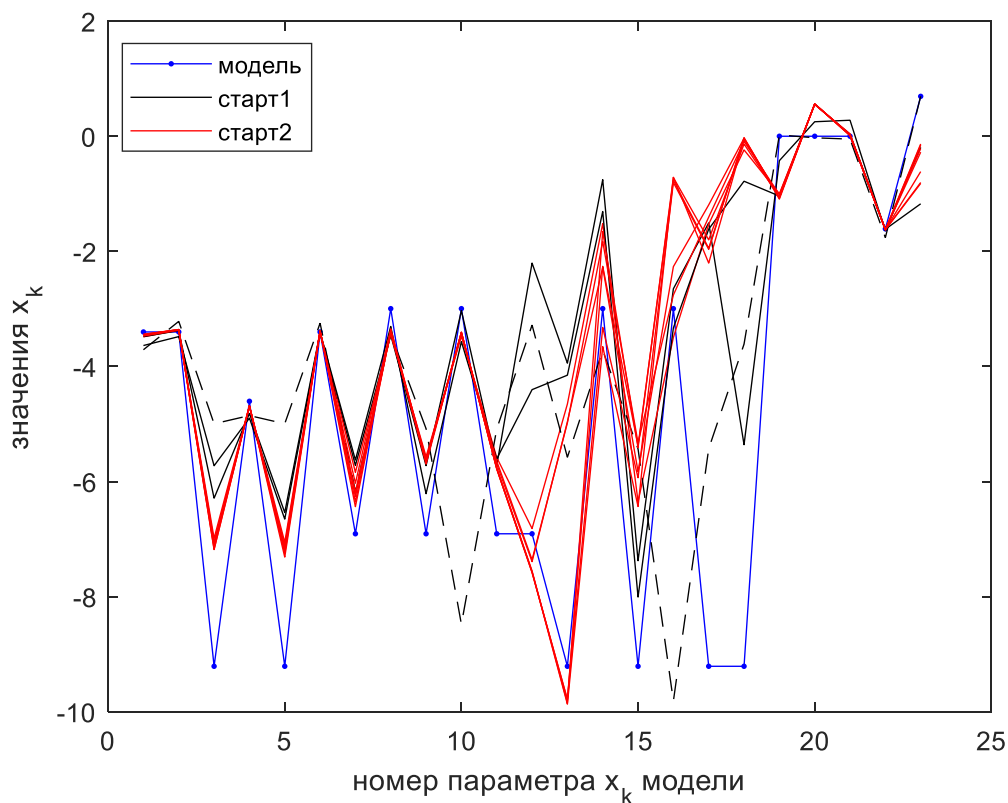


Рис. 3. Параметры x_k , соответствующие стартовым (старт 1, старт 2) и исходной (модель) моделям среды

В данном примере при расчетах методом MRFO в целевом функционале Φ учитывались невязки по относительной величине только модовых кривых. Как оказалось, после 200 итераций значения $\Phi \leq 10^{-5}$, а после 500 итераций упали до значений $\Phi \sim 10^{-6}$. Однако все полученные модели среды заметно отличаются от исходной модели (рис. 3). С учетом порядка малых отличий модельных и исходных кривых МТЗ, все полученные модели среды следует признать эквивалентными.

Все приведенные на рис. 3 эквивалентные модели среды (в том числе и стартовая модель по результатам усреднения одномерных инверсий в каждом пункте) были использованы как стартовые для последующей оптимизации упомянутым выше нелинейным методом наименьших квадратов в 3D варианте. При этом в функционале Φ вычислялась сумма всех невязок по относительной величине совместно для модовых и стандартных кривых МТЗ. На рисунке 4 представлены кривые сходимости итерационных процессов нелинейного метода наименьших квадратов для всех стартовых моделей на рис. 3. Кривыми черного цвета на этих рисунках показаны стартовые модели и итерационные процессы, приводящие к исходной модели среды; пунктир черного цвета относится к стартовой модели по результатам усреднения одномерных инверсий и к соответствующему итерационному процессу.

Отметим, что всплески на кривых сходимости к увеличенным значениям Φ объясняются выбранным способом уменьшения в ходе итераций параметра регуляризации λ по величине. Такая ситуация реализуется, когда выявляется какой-либо из локальных минимумов Φ , так что найти новое значение λ для дальнейшего уменьшения Φ в нем не получается. Так как точное совпадение с исходной моделью среды возможно лишь при попадании в область вблизи глобального минимума Φ , в этом случае необходимо пытаться выбирать $\lambda \rightarrow 0$.

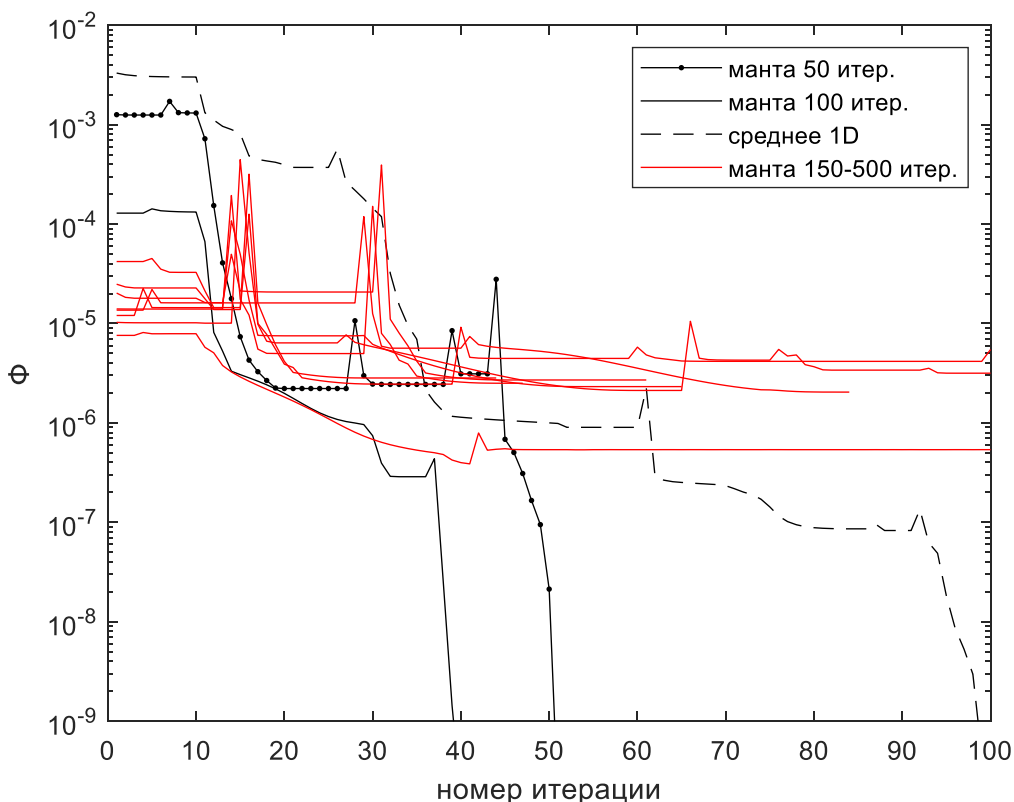


Рис. 4. Процессы сходимости функционалов невязок при различных стартовых моделях среды, приведенных на рис. 3

Как можно видеть, нелинейный метод наименьших квадратов приводит к исходной модели лишь со стартовыми моделями, для которых $\Phi > 10^{-4}$. Такие стартовые модели были получены по результатам одномерных инверсий на пунктах и методом MRFO после первых 100 итераций. Остальные стартовые модели – результаты всех последующих итераций в методе MRFO при $\Phi < 10^{-4}$. Этим методом не удается достигнуть значений $\Phi \sim 10^{-7}$, начиная с которых реализуется переход в точку глобального минимума Φ и точно к исходной модели среды. Поэтому эквивалентными моделями решения обратной задачи можно считать лишь модели, удовлетворяющие условию $\Phi > 10^{-7}$. Поскольку погрешности численных расчетов меньше, получить точное решение обратной задачи в рассматриваемом случае оказывается возможным.

На практике погрешности экспериментальных данных пока существенно больше. Возникает вопрос, как оценить пороговое значение Φ , ниже которого решение обратной задачи становится устойчивым по входным и, в частности, экспериментальным данным.

С этой целью на рис. 5 показаны все модели среды, полученные в ходе оптимизации нелинейным методом наименьших квадратов при нескольких стартовых моделях с разными итоговыми значениями функционалов (кривые красного цвета $10^{-7} < \Phi \leq 10^{-6}$ и кривые черного цвета $10^{-9} < \Phi < 10^{-7}$). Для сравнения отображена исходная модель ($\Phi=0$). Наиболее неустойчивы значения x_k , относящиеся к нижнему латерально неоднородному слою при $k = 14, 15, 17$ и 18 (они соответствуют контрастным значениям УЭС ρ_3 в нижнем слое под пп. 8, 12, 14 и 18, рис. 1). Становится понятным, что меняя эти параметры в некотором коридоре значений с целью получить величины функционала Φ , сравнимые с погрешностями входных (экспериментальных) данных, можно определить область эквивалентных решений обратной задачи. Существенно, что выяснить неустойчивые параметры модели среды удастся применением метода MRFO.

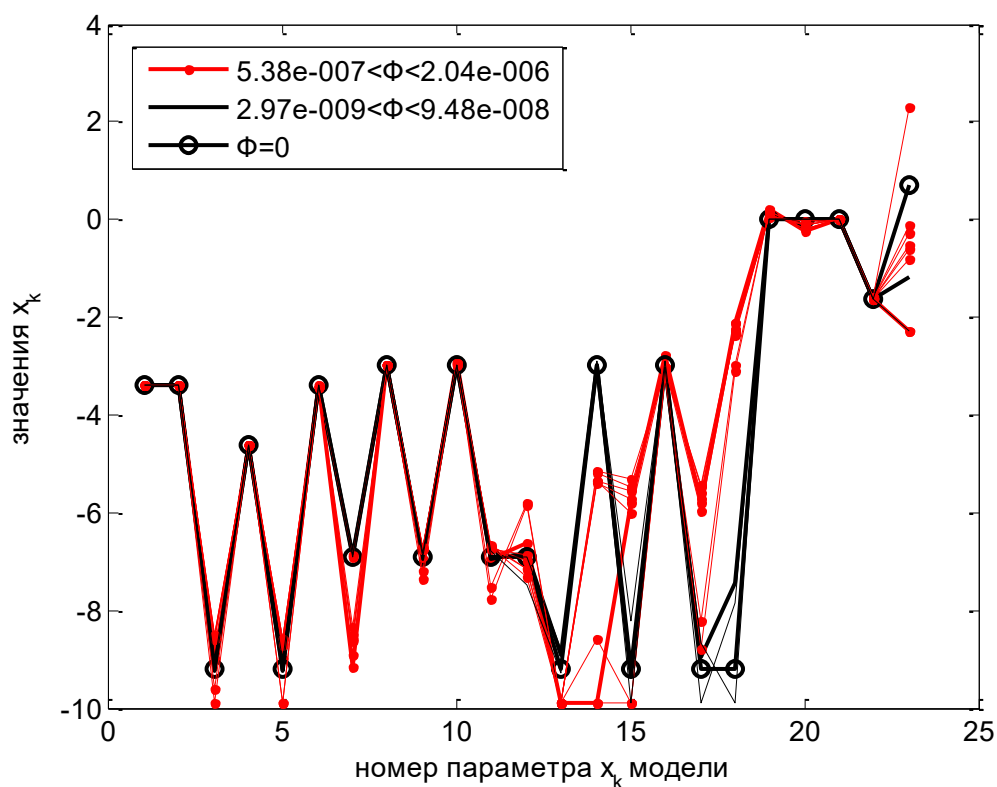


Рис. 5. Параметры x_k , полученные при нескольких стартовых моделях среды нелинейным методом наименьших квадратов с различными значениями функционалов Φ (кривые красного цвета $10^{-7} < \Phi \leq 10^{-6}$ и кривые черного цвета $10^{-9} < \Phi < 10^{-7}$). Исходная модель среды отображена кривой $\Phi = 0$

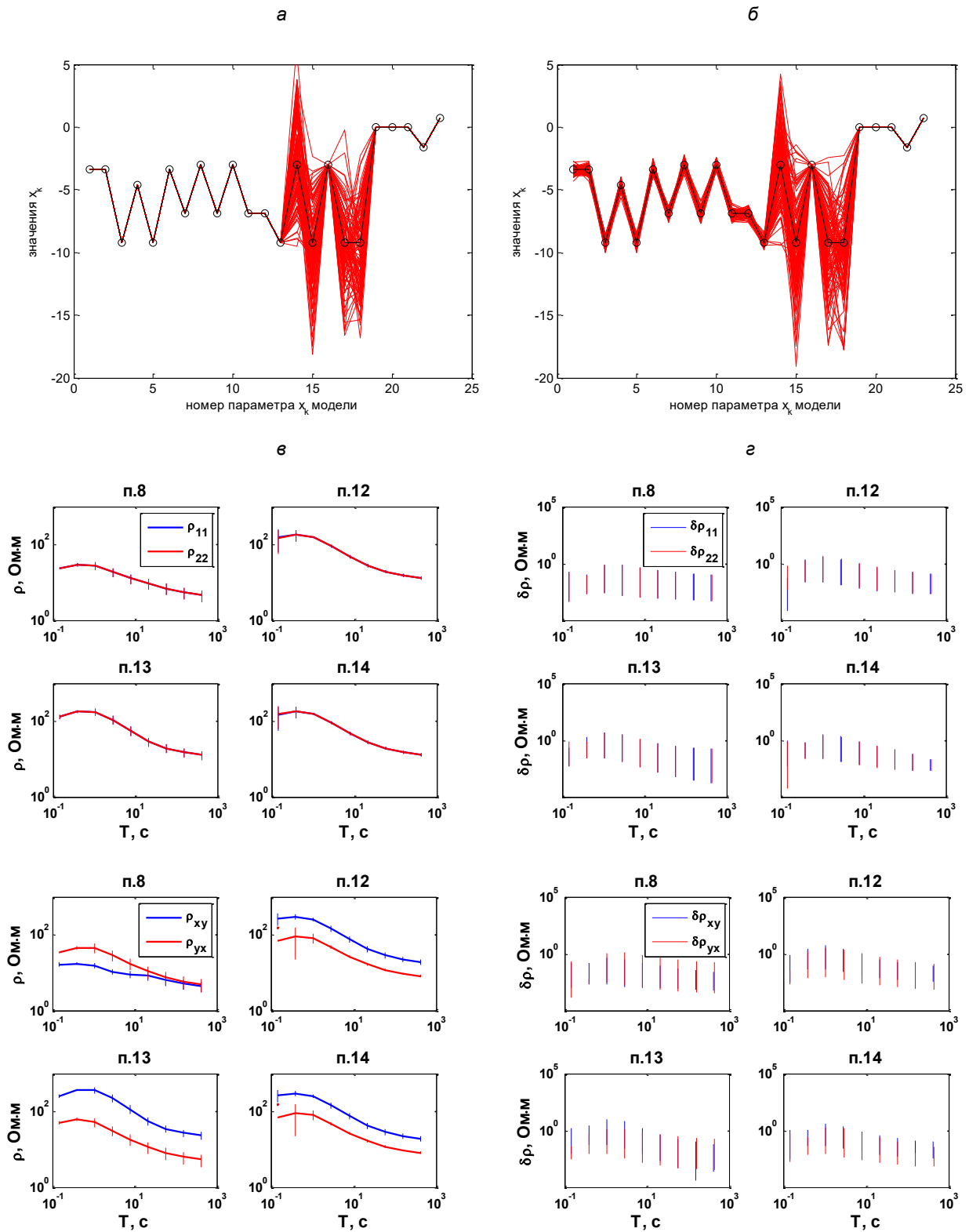


Рис. 6. Модели среды со случайными возмущениями некоторых параметров x_k разной амплитуды (кривые красного цвета, подробнее о различиях вариантов (а) и (б) в тексте, исходная модель – кривая черного цвета). Кривые МТЗ для исходной модели среды (в) с погрешностями за счет возмущений x_k (а). Для случая (б) показаны только погрешности (г), поскольку они малы и на графиках с кривыми МТЗ не отображаются

На рис. 6, а, б показаны модели, полученные случайными возмущениями различных параметров x_k исходной модели среды. Величины возмущений для выборки из 100 моделей задавались по нормальному закону распределения. При $k=1-19$ амплитуда 0.3 (рис. 6, а) и $3 \cdot 10^{-5}$ (рис. 6, б). При $k=14$,

15, 17 и 18 амплитуда всегда 3 (рис. 6, а, б). Возмущения показаны кривыми красного цвета, исходная модель среды – кривой черного цвета. Для всех моделей определены кривые МТЗ. Величины отклонений от аналогичных кривых для исходной модели дают коридоры разброса – предполагаемых «экспериментальных» ошибок.

Кривые МТЗ для исходной модели среды вместе с этими ошибками отображены на рис. 6, в (возмущения для случая на рис. 6, а). Для возмущений на рис. 6б показаны только «экспериментальные» погрешности (рис. 6, г), поскольку из-за их малости на графиках кривых МТЗ они не видны.

Из сравнения этих вариантов возмущений модели среды следует, что погрешности по величине в основном обусловлены изменениями параметров x_k при $k=1-19$. Вклад изменений x_k с заметно большей амплитудой существенно меньше. Поэтому при указанных «экспериментальных» ошибках определить x_k при $k=14, 15, 17$ и 18 можно лишь с большими разбросами их значений. Но в случае тестовой задачи, уменьшая амплитуду возмущений, можно определить порог погрешностей, при достижении которого точное решение (исходная модель среды) будет найдено. Понятно, что разные методы оптимизации не всегда в процессе итераций могут достигнуть этого порога.

Напомним, что параметры x_k при $k = 14, 15, 17$ и 18 соответствуют контрастным значениям УЭС ρ_3 в нижнем неоднородном слое под пп. 8, 12, 14 и 18. Заметим, что более глубокие слои влияют на отклик среды с понижением частоты зондирования и соответствующим увеличением толщины скин-слоя. Из-за диффузионного характера проникновения поля в среду разрешающая способность МТЗ падает, тем более по отношению к контрастным изменениям УЭС. Этим объясняется повышенная неустойчивость определения указанных параметров x_k в реальном эксперименте, поскольку понизить его ошибки часто невозможно. Находя описанным выше способом неустойчивые параметры x_k и устанавливая амплитуды их возмущений в соответствии с экспериментальными погрешностями, можно оценить область эквивалентных решений обратной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм решения обратной задачи МТЗ, приводящий при стремлении к нулю невязок входных и модельных данных к исходной модели среды в тестовой задаче. Используются два метода оптимизации: нелинейный метод наименьших квадратов и метод MRFO (Manta Ray Foraging Optimization).

В основе первого метода итерационный процесс с расчетом матрицы чувствительности и ее сингулярного SVD-разложения. Для устойчивости и регуляризации процесса в целевой функционал добавлен член $\lambda \sum_k x_k^2$, где x_k – искомые параметры модели среды и λ – параметр, от величины которого зависит устойчивость процесса. Величина λ на каждой итерации выбирается с учетом положения точки минимума в зависимости целевого функционала от λ .

Метод MRFO – метаэвристический алгоритм, применяемый, когда имеется множество локальных минимумов целевого функционала. Для этого метода не нужна стартовая модель. Одновременно производится поиск как локальных, так и глобального минимума целевого функционала. Нужно указать лишь коридор возможных значений искомых параметров x_k .

Сначала рассчитываются стартовые модели. Одна из них получается усреднением результатов одномерных инверсий модовых кривых нелинейным методом наименьших квадратов в каждом из взятых пунктов МТЗ (модовые кривые взяты, поскольку в отличие от стандартных кривых практически не отличаются друг от друга).

Остальные модели определяются в 3D случае методом MRFO по данным нескольких пунктов МТЗ. Если найденная методом MRFO модель 3D-среды не совпадает с исходной, она считается стартовой моделью для последующей оптимизации нелинейным методом наименьших квадратов.

С помощью численных расчетов на примере тестовой модели 3D-среды продемонстрирована работоспособность предложенного алгоритма - точно восстановлена исходная модель среды (на той же пространственной сетке, на которой выполнялся расчет данных).

Показано, как используя метод MRFO и зная погрешности экспериментальных данных, можно установить неустойчиво определяемые параметры x_k , приводящие к появлению эквивалентных решений обратной задачи, и оценить область неопределенности этих параметров.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0025. Автор благодарен анонимному рецензенту за советы по улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.** Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 668 с.
- Егоров И.В.** Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. – 2011. – № 2. – С. 15–26.
- Жданов М.С.** Электроразведка. – М.: Недра, 1986. – 320 с.
- Плоткин В.В., Губин Д.И.** Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2015. – № 56 (7). – С. 1381–1390, doi: 10.15372/GiG20150709.
- Плоткин В.В., Потапов В.В.** Оценки Холловской проводимости по данным магнитотеллурического зондирования // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – № 11 (4). – С. 817–828, doi: 10.5800/GT-2020-11-4-0509.
- Plotkin V.V., Mogilatov V.S., Potapov V.V.** Role of Hall effect in magnetotelluric sounding // Problems of Geocosmos-2018: Proceedings of the XII International Conference and School (St. Petersburg, Petrodvorets, October 08-12, 2018), Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – 2020. – P. 19–27, doi: 10.1007/978-3-030-21788-4_3.
- Senkaya M., Karlı H.** Joint inversion of Rayleigh-wave dispersion data and vertical electric sounding data: synthetic tests on characteristic sub-surface models // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64 (1). – P. 228–246, doi: 10.1111/1365-2478.12289.
- Zhao W., Zhang Z., Wang L.** Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 87. – 103300, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103300.

REFERENCES

- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I.** Models and methods of magnetotellurics [in Russian]. – Nauchnyi Mir, Moscow. – 2009. – 668 p.
- Plotkin V.V., Gubin D.I.** Accounting for near-surface inhomogeneities over a horizontally layered section in magnetotelluric sounding // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – Vol. 56 (7). – P. 1083–1090, doi: 10.1016/j.rgg.2015.06.009.
- Plotkin V.V., Potapov V.V.** Hall conductivity estimates from magnetotelluric sounding data // Geodynamics & Tectonophysics. – 2020. – Vol. 11 (4). – P. 817–828, doi: 10.5800/GT-2020-11-4-0509.

Plotkin V.V., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Role of Hall effect in magnetotelluric sounding // Problems of Geocosmos-2018: Proceedings of the XII International Conference and School (St. Petersburg, Petrodvorets, October 08-12, 2018), Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – 2020. – P. 19–27, doi: 10.1007/978-3-030-21788-4_3.

Senkaya M., Karşlı H. Joint inversion of Rayleigh-wave dispersion data and vertical electric sounding data: synthetic tests on characteristic sub-surface models // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64 (1). – P. 228–246, doi: 10.1111/1365-2478.12289.

Yegorov I.V. Trefftz method for the solution of three-dimensional forward and inverse problems of geoelectrics // Physics of the Earth. – 2011. – Vol. 47 (2). – P. 90–100, doi: 10.1134/S1069351311010034.

Zhao W., Zhang Z., Wang L. Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 87. – 103300, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103300.

Zhdanov M.S. Electroinvestigation [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1986. – 320 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

ПЛОТКИН Валерий Викторович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, новые способы интерпретации данных МТЗ, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных.

*Статья поступила 10 января 2023,
принята к печати 20 февраля 2023*



СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ AVO И ДАННЫХ СКВАЖИННОЙ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

А.Н. Василевский^{1,2}, Ю.А. Дашевский^{1,2,3}, С.В. Яскевич^{1,4}

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 вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 6,
630090, Новосибирск, Россия.

⁴Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
e-mail: VasilevskiyAN@jggg.sbras.ru

Анализируется как использование дополнительной информации в виде гравиметрических измерений в скважине при оценке упругих импедансов в рамках AVO-анализа влияет на точность определения параметров среды. Показана возможность увеличения точности результатов сейсморазведки в процедуре определения упругих параметров за счет использования данных скважинной гравиметрии.

Скважинная гравиметрия, AVO-анализ, упругие импедансы, комплексирование сейсмических и гравиметрических методов

JOINT ANALYSIS OF AVO AND BOREHOLE GRAVIMETRY DATA TO IMPROVE THE RESOLUTION IN DETERMINING THE ELASTIC PARAMETERS OF THE MEDIUM

A.N. Vasilevskiy^{1,2}, Yu.A. Dashevsky^{1,2,3}, S.V. Yaskevich^{1,4}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

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

³Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Lavrentyev Ave, 6, Novosibirsk, 630090, Russia,

⁴Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lermontova Str., 128, Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: VasilevskiyAN@jggg.sbras.ru

The paper analyzes how the use of additional information obtained through the borehole gravimetric measurements affects the accuracy of determining the parameters of the medium when evaluating elastic impedances in the framework of AVO-analysis. The possibility of increasing the accuracy of seismic survey results in the procedure for determining elastic parameters through the use of borehole gravimetry data has been demonstrated.

Borehole gravimetry, AVO-analysis, elastic impedances, joint interpretation of seismic and gravity data

ВВЕДЕНИЕ

Процедура инверсии данных сейсморазведки в упругие параметры среды включает два основных этапа. Сначала оценивается отражательная способность как функция угла падения для каждой точки среды. В частности, это выполняется путем миграции в истинных амплитудах, что является наиболее технологичным методом получения отражательной способности, зависящей от угла.

Второй шаг включает в себя саму инверсию. Цель инверсии достигается за счет минимизации несоответствия между данными об отражательной способности, зависящими от угла, и синтетическими данными, полученными в результате численного моделирования уравнений Цепприца [Воскресенский, 2001]. Не все параметризации уравнений Цепприца можно использовать для обращения. Debski и Tarantola [1995] не рекомендуют одновременно использовать плотность, скорости P - и S -волн в качестве набора параметров для AVO-инверсии. Они предложили, например, отдельно выбрать в качестве параметров инверсии плотность, скорость P -волн или скорость S -волн.

Если следовать этой рекомендации, то остаются проблемы оценки параметров среды и применения результатов для наземной сейсморазведки и геологической интерпретации:

1. Известно, что при AVO-анализе по отраженным волнам PP плотность определяется с большой погрешностью. В этом случае многообещающим выглядит использование обменных волн PS и снижение неопределенности в оценке плотности по сравнению с использованием только отраженных волн PP [Нефедкина и др., 2000; Jin et al., 2000].

2. Синтетические сейсмограммы часто не соответствуют данным наземной сейсморазведки. Трудной задачей оказывается сопоставление наблюдаемой и синтетической сейсмограмм, даже при «калибровке» с использованием скоростей, полученных по ВСП. Основная проблема заключается в разрешении: данные плотностного каротажа, на основе которых рассчитываются синтетические данные, характеризуют относительно небольшие объемы породы – несколько десятков сантиметров от скважины, в то время как сейсморазведка характеризует свойства породы на удалениях до нескольких сотен метров от скважины.

3. В литературе описана взаимосвязь литостатического давления с процентным содержанием песка, типом породы, глубиной и условиями осадконакопления, имеющая сильную корреляцию со скоростью и плотностью. Поскольку плотность может быть отнесена к конкретной литологии, корреляция между литостатическим давлением и литологией может быть установлена посредством надежной оценки плотности с требуемым пространственным разрешением [Verm et al., 1998].

В настоящей работе предлагается расширить возможности сейсморазведки за счет использования скважинных гравиметрических данных. Инвертируя данные скважинной гравиметрии, можно получить распределение плотности в области пространства, окружающем скважину. Далее значения плотности использовать для AVO-инверсии в качестве априорных данных или осуществлять совместную инверсию данных AVO и гравиметрии.

Современные возможности скважинной гравиметрии значительны [Beuer, 1991; Nind et al., 2013; Нежданов и др., 2016]:

- радиус исследований достигает 50 м, при обеспечении вертикальной разрешающей способности не хуже 5 м;
- точность определения плотности до 0.02 г/см³;
- демонстрируется высокая чувствительность к средней в пределах радиуса исследований плотности пород;
- допускается проведение исследований как в открытом, так и обсаженном стволе скважины;
- отмечается практическое отсутствие влияния собственно скважины (ее диаметра, скважинной жидкости, обсадной колонны, цемента и т. д.).

Отметим, что в самое последнее время новый импульс развитию гравиметрии, в том числе скважинной, дает применение недорогих MEMS гравиметров, которые по точности измерений и стабильности приближаются к классическим [Middlemiss et al., 2018; Carbone et al., 2020; Yu et al., 2020; Liu et al., 2022].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью сейсморазведки является определение по сейсмическим данным таких параметров пласта, как скорости продольных и поперечных волн, плотность, упругие константы и т. д. В рамках этой задачи ищутся поверхности, на которых эти параметры существенно изменяются. Особенно важно найти области, где изменения характерны для присутствия нефти/газа. Например, переход от глинистых к газонасыщенным пескам приводит к специфическому изменению соотношения скоростей P - и S -волн [Ампиров и др., 2007; Яковлев и др., 2011].

Сейсмические данные получают путем возбуждения сейсмических волн (обычно P -волн на поверхности) и регистрации рефрагированных/отраженных волн на поверхности или в скважине (в последнем случае говорят о вертикальном сейсмопрофилировании или ВСП) (рис. 1).

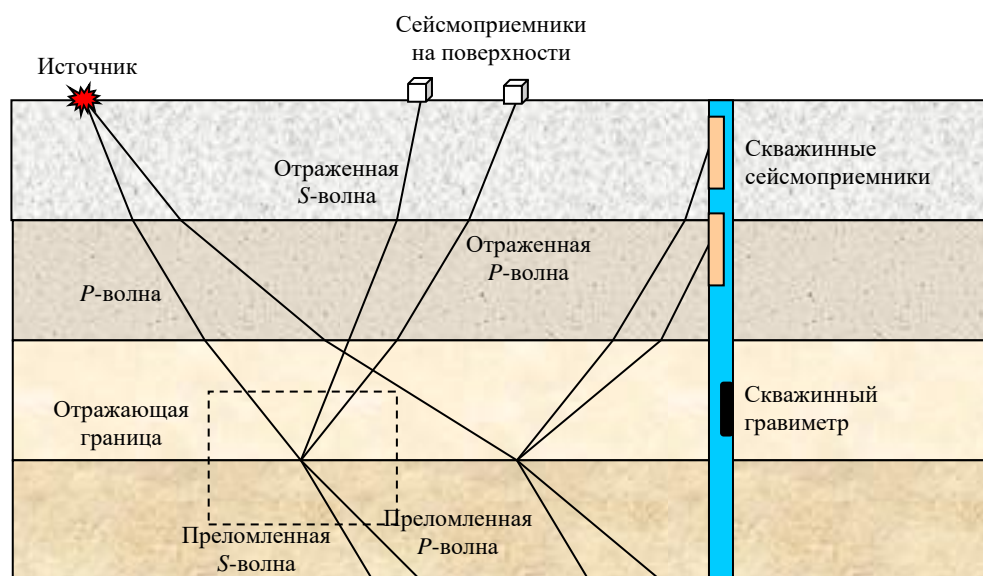


Рис. 1. Отраженные и преломленные волны на границе слоев. Прямоугольная область, выделенная пунктиром более подробно показана на рис. 2

Процесс инверсии и интерпретации сейсмических данных многообразен и очень сложен [Ампиров и др., 2007; Яковлев и др., 2011]. Мы рассмотрим следующие основные этапы этого процесса:

- *Миграция.* На этом шаге положения источников и приемников связываются с положением отражающей границы и углом падения;

- *Миграция в истинных амплитудах.* На этом шаге находится коэффициент отражения на отражающей границе. Обработав волны, приходящие на границу под разными углами, мы в итоге получаем изменение коэффициентов отражения $R^{PP}(\theta)$ (для отраженных P -волн) и $R^{PS}(\theta)$ (для обменных PS -волн) с углом падения θ ;

- *Анализ зависимости амплитуды отраженной волны от угла падения (AVO).* Имея коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ и $R^{PS}(\theta)$ для диапазона углов падения, можно найти изменение скоростей, либо упругих постоянных, либо каких-либо других параметров на отражающей границе.

Остановимся на последнем шаге, предполагая, что вся предобработка проведена и коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ и $R^{PS}(\theta)$ заданы с некоторой точностью.

Уравнения Цепприца и их приближения

Падение P -волны на границу между двумя слоями с разными скоростями P - и S - волн и плотностями приводит к возникновению четырех новых волн: отраженных P - и S - волн и проходящих P - и S -волн (рис. 2). Отношения их амплитуды к амплитуде падающей P -волны называются коэффициентами отражения и прохождения. Обозначим коэффициенты отражения для P - и S -волн как R^{PP} и R^{PS} . Они зависят от скоростей V_{Pj} и V_{Sj} , плотностей ρ_j и угла падения θ . Эта зависимость описывается уравнениями Цепприца. Эти уравнения довольно громоздки, поэтому используются различные приближения [Воскресенский, 2001]:

линеаризованное уравнение Цепприца Аки и Ричардса:

$$R^{PP}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\sec^2 \theta}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta V_S}{V_S} \sin^2 \theta;$$

приближение Шуэ:

$$R^{PP}(\theta) \approx \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_P}{V_P} \right)}_A + \underbrace{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_S}{V_S} \right) \right)}_B \sin^2 \theta + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P}}_C \frac{\sin^4 \theta}{1 - \sin^2 \theta}.$$

Из этих приближений хорошо видно, что естественно использовать средние значения:

$$V_P = (V_{P1} + V_{P2})/2, \quad V_S = (V_{S1} + V_{S2})/2, \quad \rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$$

и вариации

$$\Delta V_P = V_{P1} - V_{P2}, \quad \Delta V_S = V_{S1} - V_{S2}, \quad \Delta \rho = \rho_1 - \rho_2,$$

а не скорости и плотности в каждом слое.

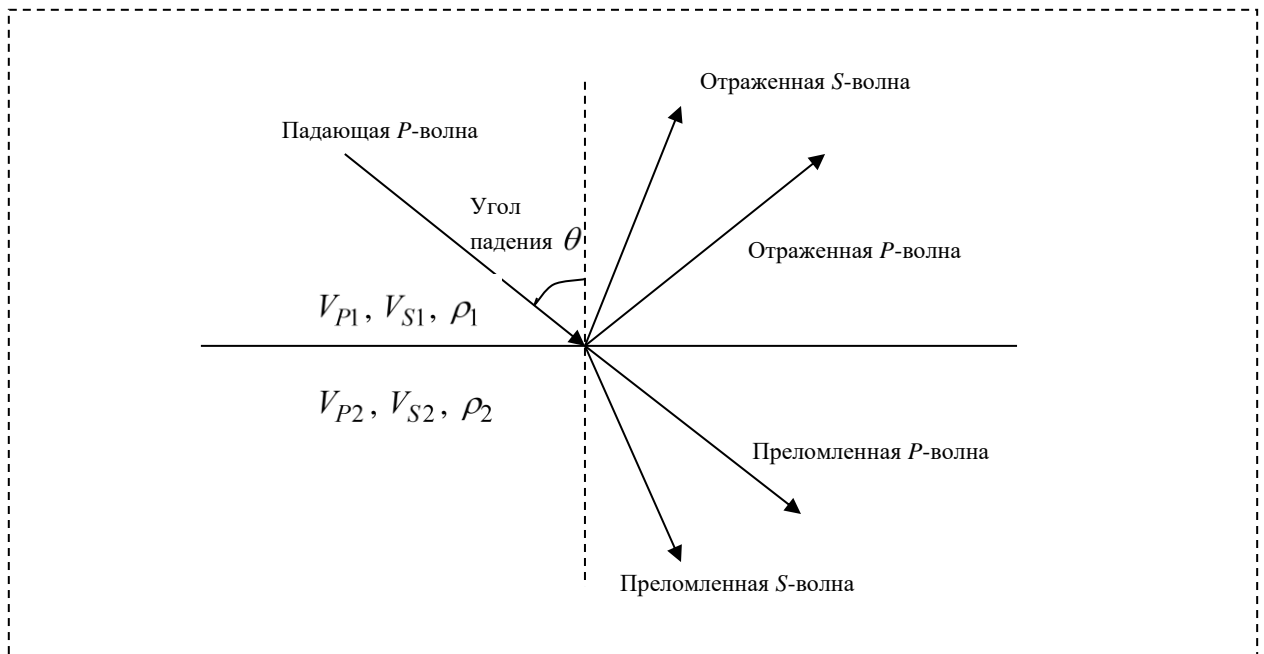


Рис. 2. Отраженные и проходящие волны на границе двух слоев

Упругая инверсия

Прежде всего заметим, что R^{PP} (и R^{PS}) зависят только от отношения скоростей и отношения плотностей. Это означает, что все шесть параметров не могут быть восстановлены. В лучшем случае мы можем надеяться найти четыре параметра, при этом должны быть заданы по крайней мере одна скорость и одна плотность. Разумно предположить, что мы знаем среднюю P -скорость $V_P = (V_{P1} + V_{P2})/2$ и среднюю плотность $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$.

Используя приближение Шуэ, мы можем найти три параметра A , B и C , которые обеспечивают наилучшее соответствие данным. С другой стороны, нам нужно найти четыре параметра.

Для дальнейшего сокращения числа искоемых параметров используются различные эмпирические приближенные соотношения:

Линейная связь для глин $V_P \approx 1.16V_S + 1.36$ (км/с) [Castagna et al., 1985].

Уравнение Гарднера [Gardner et al., 1974] $\rho \approx 0.23V_P^{0.25}$, которое подразумевает

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 0.25 \frac{\Delta V_P}{V_P}.$$

Подчеркнем, что эти соотношения являются приблизительными. Более того, в ситуациях, типичных для пород, насыщенных углеводородами, они могут существенно нарушаться.

Оказывается, что изменение соотношения скоростей $\Delta \frac{V_P}{V_S}$, а также упругие импедансы $\Delta(V_P\rho)$,

$\Delta(V_S\rho)$ более чувствительны к присутствию нефти/газа, чем исходные параметры ΔV_P , ΔV_S , $\Delta\rho$. Это означает, что лучше сразу восстановить один из перечисленных параметров по коэффициентам отражения R^{PP} и R^{PS} .

Комбинация AVO и скважинной гравиметрии

Одним из возможных способов совмещения AVO и скважинной гравиметрии является следующее:

- используя скважинные гравиметрические данные со слоистой моделью Земли, мы находим плотность вдоль скважины и, следовательно, среднюю плотность и изменение плотности для каждой пары слоев (для каждой границы раздела);
- использовать эти значения как точные при инверсии данных посредством AVO-анализа (традиционная схема предполагает, что мы знаем только среднюю плотность).

С одной стороны, данные измерений силы тяжести связаны только с плотностью. А с другой стороны, плотность плохо определяется по данным сейсморазведки [Lines, 1998]. Так что этот двухэтапный подход кажется оптимальным.

Еще одним способом совмещения сейсморазведки и скважинной гравиметрии является комбинированная инверсия, когда оба набора данных инвертируются вместе. Математически это предполагает минимизацию комбинированного функционала. В качестве отправной точки здесь можно использовать решение, полученное первым методом

Покажем далее, что использование более точной информации о плотности вдали от скважины, полученной с помощью инверсии гравиметрических данных, повысит точность AVO-анализа. С этой целью в следующем разделе мы вводим понятие условной неопределенности, а затем показываем, что

неопределенность таких показателей как изменение соотношения скоростей и отношения плотностей улучшается, когда они задаются с большей точностью.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ

Предположим, что параметры $x_j, j = 1, \dots, n$, модели и данные $y_i, i = 1, \dots, N$, связаны линейным отображением. Отображение

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (y_1, \dots, y_N)$$

называют прямым. Если данных достаточно, говорят об инверсии:

$$(y_1, \dots, y_N) \mapsto (x_1, \dots, x_n).$$

Изменения параметров $x = (x_1, \dots, x_n)$ на $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ приводят к соответствующим изменениям данных $y = (y_1, \dots, y_N)$ на $\delta y = (\delta y_1, \dots, \delta y_N)$. И наоборот, вариации δy данных могут быть связаны с вариациями δx параметров.

В качестве меры вариации данных вводится следующая норма:

$$\|\delta y\| = \sqrt{\langle C \delta y, \delta y \rangle} = \sqrt{\sum_{i,k=1}^N c_{ik} \delta y_i \delta y_k},$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ обозначает Эвклидово скалярное произведение и $C = (c_{ik})$ есть положительно определенная симметричная матрица, называемая ковариационной матрицей. В случае однотипных и одномасштабных данных, вариации которых не коррелированы, C – единичная матрица.

Оценка неопределенности параметров

Предположим, что вариация параметров $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ вызывает вариацию данных δy .

Рассмотрим параметр $G = \sum_{j=1}^n g_j x_j$ – линейную комбинацию x_j . Будем называть максимальной

величину $|\delta G|$, $\delta G = \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j$ на всем множестве $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$, которая приводит к вариации δy

с условием $\|\delta y\| \leq \delta_0$ неопределенностью оценки G , соответствующую неопределенности данных δ_0 .

Обозначим эту максимальную величину неопределенности как δG^{\max} .

Поскольку зависимость данных от параметров линейна

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, \quad i = 1, \dots, N,$$

то вариации δy и δx связаны между собой той же матрицей $A = (a_{ij})$:

$$\delta y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta x_j, \quad i = 1, \dots, N.$$

Следовательно, возможно определение величины δG^{\max} для заданного значения δ_0 .

Задача нахождения неопределенности δG^{\max} может быть сформулирована как задача максимизации с ограничениями

$$\begin{cases} |\delta G| \rightarrow \max, \\ \langle B \delta x, \delta x \rangle \leq \delta_0^2. \end{cases}$$

Здесь $B = A^T C A$ – положительно определенная симметричная матрица, называемая информационной.

Условная неопределенность

Предположим, что мы пытаемся найти величину неопределенности оценки некоторого параметра

$G = \sum_{j=1}^n g_j x_j$. Пусть значения некоторых других параметров известны и их точность задана. Будем

полагать, что номера таких параметров $n(1), \dots, n(k)$, а их вариации не превышают

$$|\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k,$$

где $k \leq n$ – номер дополнительного условия.

Будем называть условной неопределенностью δG^{cond} такую максимальную величину $|\delta G|$,

$\delta G = \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j$, для всех вариаций $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ при условии, что $|\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k$, которая

приводит к вариации δy с условием $\|\delta y\| \leq \delta_0$.

Для определения условной неопределенности δG^{cond} , необходимо решить следующую задачу максимизации с ограничениями:

$$\begin{cases} \left| \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j \right| \rightarrow \max, \\ \langle C A \delta x, A \delta x \rangle \leq \delta_0^2, \\ |\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k. \end{cases}$$

Алгоритм решения этой задачи, а также процедуры нахождения условной неопределенности программно реализованы и детально описаны в [Dashevsky et al., 2012].

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ЗАДАЧАХ AVO-АНАЛИЗА

Предположим, что коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ известны для диапазона углов θ_j , $j=1, \dots, m$, и мы ищем некоторый параметр G , зависящий от скоростей и плотностей, например, изменение импеданса P -волн: $\Delta I_P = I_{P1} - I_{P2} = V_{P1}\rho_1 - V_{P2}\rho_2$. Наша цель – оценить (условную) неопределенность δG^{cond} в предположении, что $R^{PP}(\theta)$ и некоторые параметры известны с заданной точностью. Мы будем использовать следующие параметры:

$$x_1 = V_P, x_2 = \Delta V_P, x_3 = V_S, x_4 = \Delta V_S, x_5 = \rho, x_6 = \Delta \rho.$$

Зафиксируем набор параметров $V_{P1}, V_{P2}, V_{S1}, V_{S2}, \rho_1, \rho_2$ (точка (x_1, \dots, x_6)) и перейдем от отображения $(x_1, \dots, x_6) \mapsto R^{PP}(\theta_j)$ к его линейному приближению и заменим параметр G его линейным аналогом. Тогда вариации δx , δR^{PP} , δG связаны линейными отображениями следующим образом:

$$\delta R^{PP}(\theta_j) = \sum_{k=1}^6 a_{jk} \delta x_k, \quad a_{jk} = \frac{\partial R^{PP}(\theta_j)}{\partial x_k},$$

$$\delta G = \sum_{k=1}^6 g_k \delta x_k, \quad g_k = \frac{\partial G}{\partial x_k}.$$

Таким образом, приходим к следующей постановке задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \sum_{k=1}^6 g_k \delta x_k \right| \rightarrow \max \\ \left\| \sum_{k=1}^6 a_{jk} \delta x_k \right\| \leq \delta_0, \\ |\delta x_l| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, 6, \end{array} \right.$$

(некоторые из δ_l них могут быть равны ∞ , что означает, что у нас нет информации о соответствующем параметре).

Параметры слоев (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Таблица 1

Набор	V_{P1}	V_{P2}	V_{S1}	V_{S2}	ρ_1	ρ_2
1	2249	2458	731	1612	2.14	1.89
2	2743	2835	1395	1762	2.06	2.06
3	2898	2857	1290	1666	2.425	2.275
4	3811	3453	2263	2302	2.4	2.1

Поскольку результат инверсии может сильно зависеть от набора параметров, для которых выполняется процесс линеаризации, рассмотрим в качестве примера четыре реальных набора параметров, взятых из [Воскресенский, 2001] и представленных в табл. 1. Верхний слой – сланец, а нижний слой – газонасыщенный песок.

Неопределенность оценки параметров среды без учета априорной информации о плотности

Далее мы будем предполагать, что $R^{PP}(\theta)$ задан с точностью 10 % : $\|\delta R^{PP}\| \leq 0.1 \|R^{PP}\|$. Будем считать, что имеется априорная информация только о средних величинах V_P, V_S, ρ , это означает, что $\delta_1 = \delta_3 = \delta_5 = 0$. В результате инверсии данных, представленных в табл. 1, были получены численные оценки условной неопределенности параметров. В ячейках табл. 2 для параметров $\Delta V_P, \Delta V_S, \Delta \rho, \Delta(V_P/V_S), \Delta(V_P\rho), \Delta(V_S\rho)$ показаны эти неопределенности.

Таблица 2

Неопределенность параметров (скорости в м/с и плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	2406.4	2598.6	2.003	4.312	677.1	4105.9
2	499.3	389.8	0.345	0.137	136.7	341.0
3	926.8	723.8	0.716	0.375	274.3	863.96
4	1311.2	838.1	0.764	0.049	399.8	416.2
Диапазон возможных значений параметра	1600	1500	0.5	1.57	5260	4300

Значение неопределенности оценки того или иного параметра зависит от геологической ситуации. Так, например, для набора 1 (см. табл. 2) значение неопределенности для всех параметров, за исключением $\Delta(V_P\rho)$, больше, чем для других наборов. Значение неопределенности оценки плотности в трех случаях из четырех больше величины интервала возможных значений плотности. Это означает, что плотность геологического вещества невозможно определить, инвертируя сейсмические данные. Неопределенность оценки P -импеданса $\Delta(V_P\rho)$ характеризуется наименьшим значением, по сравнению с остальными параметрами.

Неопределенность в оценке параметров при наличии сторонней информации о распределении плотности

Предположим теперь, что на отражающей границе с некоторой точностью известно значение скачка плотности. Эти данные могут быть получены на основе инверсии результатов данных скважинной гравиметрии. А именно, предположим, что $\delta_6 = 0, 0.05, 0.5$ (г/см³) и вновь исследуем значения условной неопределенности оценки значений уже рассмотренных наборов параметров разреза. Результаты этого анализа представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Неопределенность параметров при точном задании плотности (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	4.22	2.78	0.0	2.38	1.56	2.37
2	3.95	3.09	0,0	1.93	1.08	1.79
3	4.57	3.27	0.0	2.20	1.18	2.11
4	4.25	3.89	0.0	1.03	1.15	1.21

Таблица 4

Неопределенности оценки параметров для случая погрешности определения плотности 0.05 г/см³ (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	166.4	301.5	0.05	0.681	241.96	653.6
2	126.4	118.5	0.05	0.071	126.24	189.2
3	155.2	169.5	0.05	0.153	231.44	374.1
4	225.6	178.5	0.05	0.049	347.16	344

Таблица 5

Неопределенности оценки параметров для случая погрешности определения плотности 0.5 г/см³ (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	702.4	838.5	0.5	1.623	378.72	1548
2	499.2	366	0.5	0.136	136.76	339.7
3	708.8	555	0.5	0.339	273.52	791.2
4	958.4	604.5	0.5	0.05	399.76	417.1

Сравнивая результаты, представленные в табл. 3, с результатами табл. 4 и 5, легко сделать заключение, что неопределенность исходных значений плотности существенным образом влияет на точность определения параметров в результате инверсии: чем больше погрешность задания плотности, тем выше неопределенность результатов инверсии.

ВЫВОДЫ

В нашей работе был выполнен анализ того, как использование дополнительной информации в виде гравиметрических измерений в скважине при оценке упругих импедансов в рамках AVO-анализа влияет на точность определения параметров среды. Мы намеренно предположили, что работаем в условиях ограниченной информации о скоростях распространения волн в среде, но считаем, что этот факт не снижает важности полученных результатов, а помогает более явно сформулировать прирост информативности.

Неопределенность оценки параметров существенно зависит от типа и самих значений параметров разреза.

Стороннее задание значений плотности значительно улучшает точность определения параметров ΔV_P и ΔV_S .

Стороннее привлечение значений плотности наименьшее влияние оказывает на точность оценки параметров $\Delta(V_P\rho)$ и $\Delta(V_S\rho)$. Неопределенность определения P -импеданса $\Delta(V_S\rho)$ менее всего зависит от точности задания плотности.

В некоторых случаях априорное задание плотности уменьшает неопределенность оценки $\Delta(V_P/V_S)$. Заметим, что этот параметр служит одним из индикаторов присутствия в разрезе углеводородов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту FWZZ-2022-0019 (0266-2022-0019) ИНГГ СОРАН.

ЛИТЕРАТУРА

Ампиров Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 1 // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 4. – С. 3–16.

Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. – М., 2001. – 68 с.

Нежданов А.А., Пережогин А.С., Полин И.И. Определение подсчетных параметров сенонских газовых залежей помощью гравитационного каротажа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 8–14.

Нефедкина Т.В., Курдюкова Т.В., Бузлуков В.В. Определение упругих параметров среды инверсией данных AVO-анализа продольных и обменных волн // Доклады академии наук. – № 371 (4). – С. 532–534.

Яковлев И.В., Ампиров Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 2 // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 1. – С. 5–15.

Beyer L.A. Borehole gravity survey: SEG Short Course notes. – 1991. – 350 p.

Carbone D., Antoni-Micollier L., Hammond G., de Zeeuw-van Daltsen E., Rivalta E., Bonadonna C., Messina A., Lautier-Gaud J., Toland K., Koymans M., Anastasiou K., Bramsiepe S., Cannavò F., Contrafatto D., Frischknecht C., Greco F., Marocco G., Middlemiss R., Ménoret V., Noack A., Passarelli L., Paul D., Prasad A., Siligato G, Vermeulen P. The NEWTON-g gravity imager: toward new paradigms for terrain gravimetry // Frontiers in Earth Science. – 2020. – Vol. 8. – 573396, doi: 10.3389/feart.2020.573396.

Castagna J.P., Batzle M.L., Eastwood R.L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks // Geophysics. – 1985. – Vol. 50. – P. 571–581, doi: 10.1190/1.1441933.

Dashevsky Yu.A., Dyatlov G.V., Vasilevskiy A.N. Increasing the resolution of VSP AVA analysis through using borehole gravity information. – 2012. – Patent application WO2012144922A1 WIPO (PCT).

Debski W., Tarantola A. Information on elastic parameters obtained from the amplitudes of reflected waves // Geophysics. – 1995. – Vol. 60 (5). – P. 1426–1436, doi: 10.1190/1.1443877.

Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (6). – P. 770–780, doi: 10.1190/1.1440465.

- Jin S., Cambois G., Vuillermoz C.** Shear-wave velocity and density estimation from *PS*-wave AVO analysis: Application to an OBS data set from the North Sea // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – P. 1446–1454, doi: 10.1190/1.1444833.
- Lines L.R.** Density contrast is difficult to determine from AVO // *CREWES Research Report*. – 1998. – Vol. 10. – P. 47-1–47-8.
- Liu H.-F., Luo Z.-C., Hu Z.-K., Yang S.-Q., Tu L.-C., Zhou Z.-B., Kraft M.** A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications // *Petroleum Science*. – 2022. – Vol. 19 (6). – P. 2631–2648, doi: 10.1016/j.petsci.2022.06.005.
- Middlemiss R.P., Bramsiepe S.G., Douglas R., Hild S., Hough J., Paul D.J., Samarelli A., Rowan S., Hammond G.D.** Microelectromechanical system gravimeters as a new tool for gravity imaging // *Philosophical transactions of the Royal Society A*. – 2018. – Vol. 376. – 20170291, doi: 10.1098/rsta.2017.0291.
- Nind C., MacQueen J., Wasylechko R., Chemam M., Nackers C.** GRAVILOG: An update on the development and use of Borehole Gravity for Mining Exploration // *ASEG Extended Abstracts*. – 2013. – Vol. 2013 (1). – P. 1–5, doi: 10.1071/ASEG2013ab048.
- Verm R., Liang L., Hilterman F.** Significance of geopressure in predicting lithology // *The Leading Edge*. – 1998. – Vol. 17 (2). – P. 227–234, doi: 10.1190/1.1437952.
- Yu G., Tu L., Hu F.** MEMS-based vector borehole gravity meter development // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2020. – P. 920–924, doi: 10.1190/segam2020-3398784.1.

REFERENCES

- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V.** Almost everything about seismic inversion. Part 1 // *Seismic Technologies*. – 2009. – Vol. 4. – P. 3–16.
- Beyer L.A.** Borehole gravity survey: SEG Short Course notes. – 1991. – 350 p.
- Carbone D., Antoni-Micollier L., Hammond G., de Zeeuw-van Dalfsen E., Rivalta E., Bonadonna C., Messina A., Lautier-Gaud J., Toland K., Koymans M., Anastasiou K., Bramsiepe S., Cannavò F., Contrafatto D., Frischknecht C., Greco F., Marocco G., Middlemiss R., Ménoret V., Noack A., Passarelli L., Paul D., Prasad A., Siligato G, Vermeulen P.** The NEWTON-g gravity imager: toward new paradigms for terrain gravimetry // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – 573396, doi: 10.3389/feart.2020.573396.
- Castagna J.P., Batzle M.L., Eastwood R.L.** Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks // *Geophysics*. – 1985. – Vol. 50. – P. 571–581, doi: 10.1190/1.1441933.
- Dashevsky Yu.A., Dyatlov G.V., Vasilevskiy A.N.** Increasing the resolution of VSP AVA analysis through using borehole gravity information. – 2012. – Patent application WO2012144922A1 WIPO (PCT).
- Debski W., Tarantola A.** Information on elastic parameters obtained from the amplitudes of reflected waves // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60 (5). – P. 1426–1436, doi: 10.1190/1.1443877.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R.** Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // *Geophysics*. – 1974. – Vol. 39 (6). – P. 770–780, doi: 10.1190/1.1440465.
- Jin S., Cambois G., Vuillermoz C.** Shear-wave velocity and density estimation from *PS*-wave AVO analysis: Application to an OBS data set from the North Sea // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – P. 1446–1454, doi: 10.1190/1.1444833.
- Lines L.R.** Density contrast is difficult to determine from AVO // *CREWES Research Report*. – 1998. – Vol. 10. – P. 47-1–47-8.

- Liu H.-F., Luo Z.-C., Hu Z.-K., Yang S.-Q., Tu L.-C., Zhou Z.-B., Kraft M.** A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications // *Petroleum Science*. – 2022. – Vol. 19 (6). – P. 2631–2648, doi: 10.1016/j.petsci.2022.06.005.
- Middlemiss R.P., Bramsiepe S.G., Douglas R., Hild S., Hough J., Paul D.J., Samarelli A., Rowan S., Hammond G.D.** Microelectromechanical system gravimeters as a new tool for gravity imaging // *Philosophical transactions of the Royal Society A*. – 2018. – Vol. 376, 20170291, doi: 10.1098/rsta.2017.0291.
- Nefedkina T.V., Kurdyukova T.V., Buzlukov V.V.** Determination of elastic parameters of the medium through inversion of data provided by the AVO analysis of longitudinal and exchange waves // *Doklady Earth Sciences*. – 2000. – Vol. 371A. – P. 547–549.
- Nezhdanov A.A., Perezhogin A.S., Polyn I.I.** Determination of volumetric parameters for Senonian gas deposits through gravity logging // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. – 2016. – Vol. 5. – P. 8–14.
- Nind C., MacQueen J., Wasylechko R., Chemam M., Nackers C.** GRAVIOLOG: An update on the development and use of Borehole Gravity for Mining Exploration // *ASEG Extended Abstracts*. – 2013. – Vol. 2013 (1). – P. 1–5, doi: 10.1071/ASEG2013ab048.
- Verm R., Liang L., Hilterman F.** Significance of geopressure in predicting lithology // *The Leading Edge*. – 1998. – Vol. 17 (2). – P. 227–234, doi: 10.1190/1.1437952.
- Voskresensky Yu.N.** Study of changes in the amplitudes of seismic reflections for prospecting and exploration of hydrocarbon deposits. – Moscow, 2001. – 68 p.
- Yakovlev I.V., Ampilov Yu.P., Filippova K.E.** Almost everything about seismic inversion. Part 2 // *Seismic Technologies*. – 2011. – Vol. 1. – P. 5–15.
- Yu G., Tu L., Hu F.** MEMS-based vector borehole gravity meter development // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2020. – P. 920–924, doi: 10.1190/segam2020-3398784.1.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЕВСКИЙ Александр Николаевич – научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; старший преподаватель кафедры геофизики Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: обработка и интерпретация гравитационных и магнитных данных, решение обратных задач геофизики.

ДАШЕВСКИЙ Юлий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики Новосибирского государственного университета; главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные научные интересы: решение прямых и обратных задач электромагнитных методов геофизики; выявление, обоснование и применение нереализованных возможностей геоэлектрики.

ЯСКЕВИЧ Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института земной коры СО РАН. Основные научные интересы: обработка и интерпретация данных сейсморазведки.

*Статья поступила 16 января 2023,
принята к печати 20 февраля 2023*



ВЫДЕЛЕНИЕ ИНТРУЗИВНЫХ ТЕЛ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЛЕДОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

А.С. Смирнов^{1,2}, А.А. Сподобаев², А.А. Нежданов³

¹Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия,

²ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19, Россия,

³ФАУ «ЗапСибНИИГТ», 625000, Тюмень, ул. Республики, 57, Россия,

e-mail: SmirnovAS@tyuiu.ru

Сейсмическое поле триасовых отложений осадочного чехла Баренцева моря характеризуется многочисленными отражениями повышенной интенсивности, которые обусловлены проявлением юрско-мелового базальтоидного магматизма. На примере Ледового месторождения показаны особенности распространения волновых пакетов, связанных с развитием интрузий – многоярусных силлов. Выявлены закономерности распределения повышенных временных толщин закартированных силлов, установлена их связь с разломными нарушениями.

Ледовое месторождение, интрузии, сейсморазведка, Баренцево море

IDENTIFICATION OF INTRUSIVE OBJECTS FROM SEISMIC DATA WITHIN THE LEDOVOE FIELD IN THE BARENTS SEA

A.S. Smirnov^{1,2}, A.A. Spodobaev², A.A. Nezhdanov³

¹Industrial University of Tyumen, Volodarskogo Str., 38, Tyumen, 625000, Russia,

²Gazprom VNIIGAZ LLC, Perekopskaya Str., 19, Tyumen, 625003, Russia,

³FAA ZapSibNIIGG, Respubliki Str., 57, Tyumen, 625000, Russia,

e-mail: SmirnovAS@tyuiu.ru

The seismic field of the Triassic deposits of the sedimentary section of the Barents Sea is characterized by numerous reflections of increased intensity. These reflections are due to the Jurassic-Cretaceous basaltoid magmatism. On the case of the Ledovoe field, the features of the waves propagation associated with the intrusions – multi-tiered sills are shown. Regularities in the distribution of increased seismic time thicknesses of the mapped sills are revealed, and their relation to faults is established.

Ledovoe field, magmatic intrusions, seismic survey, Barents Sea

ВВЕДЕНИЕ

Ледовое газоконденсатное месторождение расположено в восточной части Баренцева моря, в 200 км к западу от архипелага Новая Земля (рис. 1). Ближайшие месторождения расположены в 70 км к юго-западу (Штокмановское) и 50 км к северу (Лудловское). В тектоническом плане связано с одноименным поднятием, структурой 3-го порядка (30 × 10 км) в пределах Штокмановско-Лунинского порога Восточно-Баренцевоморского мегапрогиба (рис. 2). Осадочный чехол представлен палеозойско-

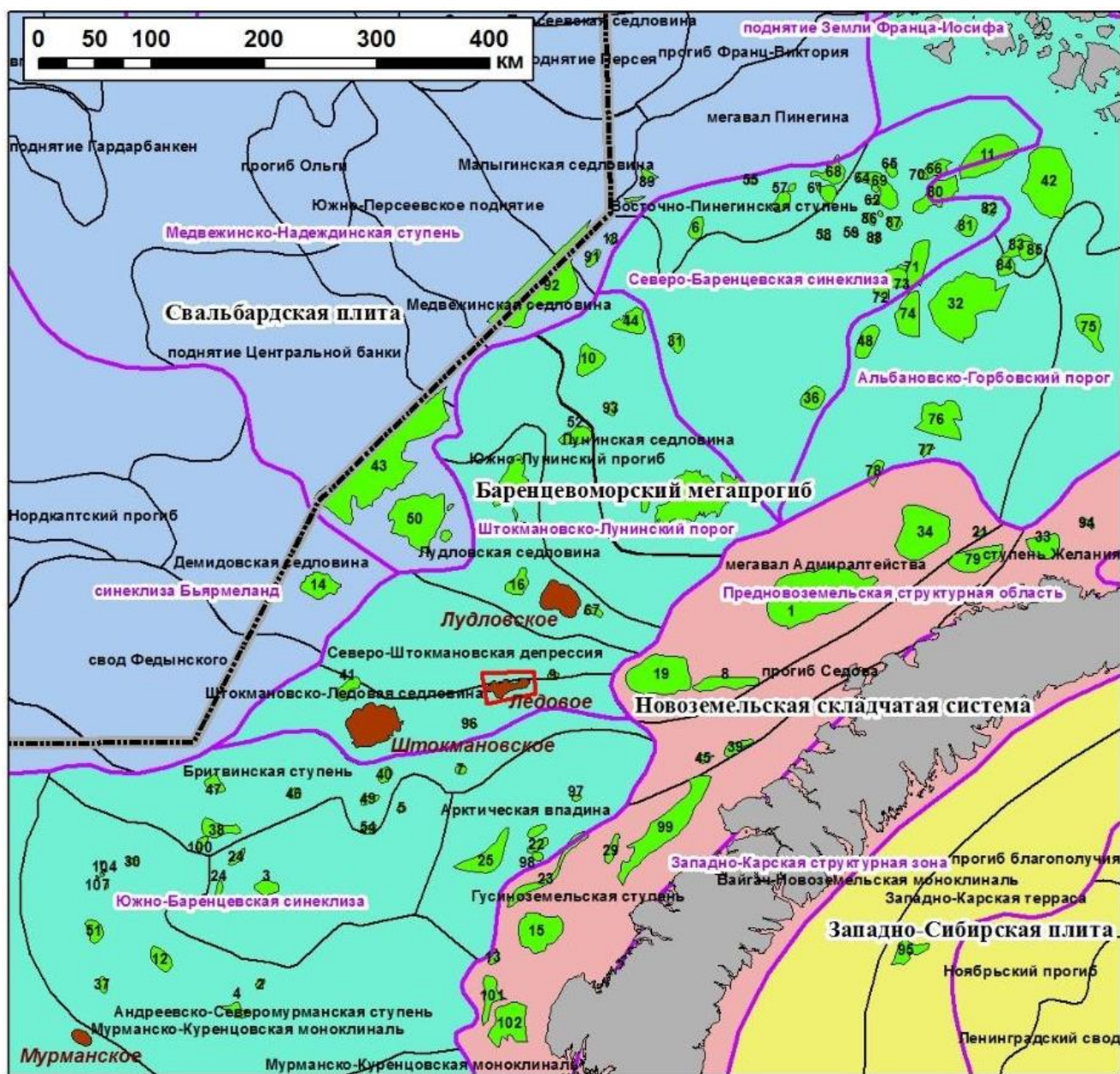


Рис. 2. Тектоническая карта (ВНИИОкеанологии, 2004 г.)

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Согласно принятой региональной индексации сейсмических отражающих горизонтов (ОГ), в интервале осадочного чехла баренцевоморского региона выделяются следующие реперные поверхности: Г₂ (кровля апт-альбских отложений), В (кровля средней юры, подошва?), Б (кровля стратиграфического несогласия триас-юра) и Ia (кровля палеозойских отложений) (рис. 3). Большая часть разреза, от 2 до 5 с, соотносится с триасовым комплексом, в пределах которого выделяются горизонты с индексом «А» [Шипилов, Шкарубо, 2010], среди которых, через систему 2D профилей на скв. 2 Лудловскую, идентифицировано отражение А₂, приуроченное к кровле среднего триаса.

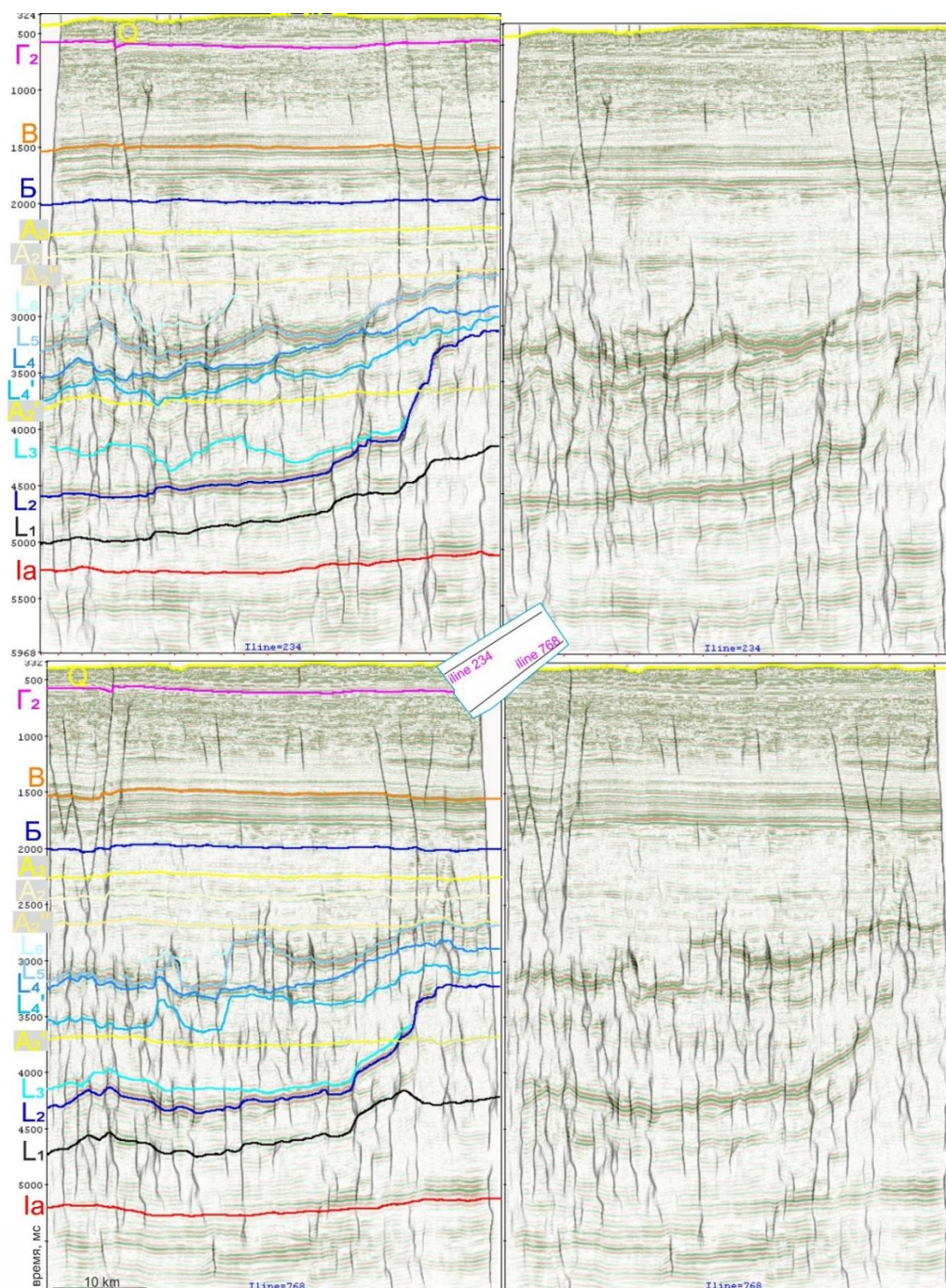


Рис. 3. Совмещенные изображения вертикальных сечений сейсмического куба амплитуд и куба вероятности разломов (пояснения в тексте)

Остальные горизонты триасовой толщи (A_2' , A_2'') стратифицированы условно, без привязки к каким-либо конкретным пластам или границам. Представленная корреляция верхней части триасового комплекса отражает субсогласное залегание сейсмических комплексов осадочной толщи, которая формировалась в мелководно-морских и прибрежно-морских условиях [Шельфовые осадочные бассейны..., 2020]. На рисунке 4, иллюстрирующем погоризонтные (седиментационные) срезы куба амплитуд, хорошо заметно, что на срезах по ОГ A_2 и A_2' фиксируются многочисленные русловые палеосистемы, на всех срезах видны следы трещиноватости (либо разломов) той или иной интенсивности. Корректность прослеженного горизонта A_2' подтверждается наличием уникального для данного интервала сплетения русел, которые отвечают геологической ситуации триаса, то есть седиментационные срезы выступают критерием качества сейсмической корреляции. Подобный подход, основанный на использовании седиментационных срезов или карт атрибутов в качестве контроля качества выполненной корреляции вертикальных сечений, рассматривается разными авторами [Ольнева, Овечкина, 2016; Posamentier et al., 2022].

Кроме субгоризонтальных ОГ в средней и нижней частях разреза триаса фиксируется ряд волновых доминант в виде протяженных и дискордантных осей синфазности (см. рис. 3), индексируемых как ОГ серии L (L_1 , L_2 ... L_4) [Шпилов, 2018]. То, что данные сейсмические горизонты не связаны с кратными волнами, показывает различная амплитуда образуемых структурных форм, меняющаяся не закономерно, в отличие от кратных или частично кратных волн, которые своей конфигурацией должны повторять вышележащие отражения.

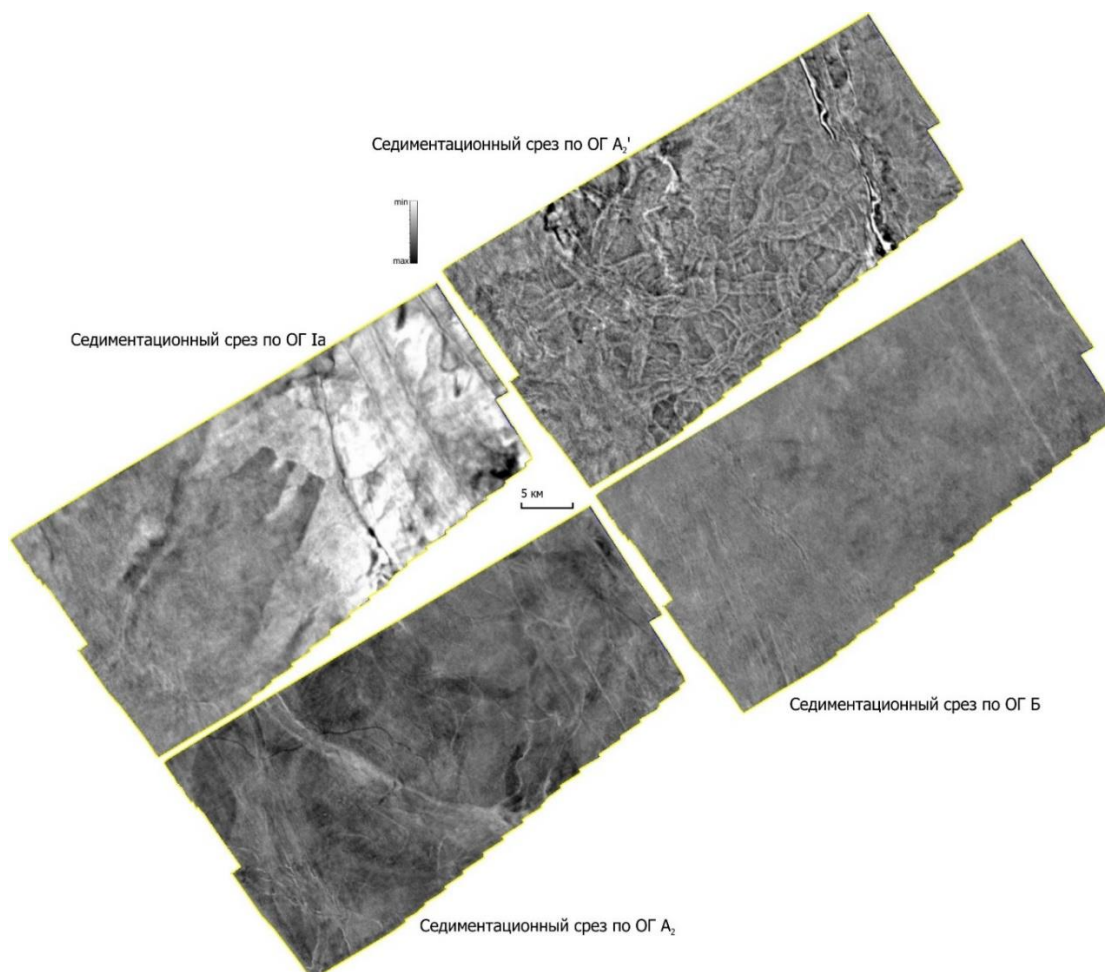


Рис. 4. Седиментационные срезы куба амплитуд

Наличие таких отражений является важной особенностью волновой картины Восточно-Баренцевоморского мегапрогиба. Подобного рода сейсмические аномальные объекты (идентифицируемые как силлы – от англ. sill), связанные с внедрением магматических пород в осадочную толщу, известны на континентальных окраинах всех океанов [Planke et al., 2000], а также в пределах некоторых рифтовых бассейнов материковой суши [Chen et al., 2022]. Для Баренцевоморского региона магматическая активность хорошо изучена [Шипилов, 2018]. Она проявляется в виде внедрения силлов в осадочные отложения перми, триаса, верхней юры и нижнего мела, также закартированы лавовые потоки на дневной поверхности [Grogan et al., 2000].

Согласно классификации типов интрузивных объектов по сейсмическим данным [Planke et al., 2005], выделяется четыре основных типа залегания такого рода объектов: параллельное (согласно вмещающим породам), плоско трансгрессивное (секущее вмещающие породы, формирующие стратиграфические несогласия), чашеобразное (комбинация первых двух типов – частично согласованное вмещающим породам залегание) и разломно-блоковое (согласно вмещающим породам и разломам). За исключением разломно-блокового, все указанные типы залегания интрузий встречены в сейсмическом поле триасового интервала разреза Ледового месторождения.

Изотопные датировки абсолютного возраста морских и сухопутных данных Баренцево-Карского региона позволяют выделить несколько этапов активизации тектономагматических процессов, среди которых силурийско-раннедевонский, позднедевонско-раннекарбонный, позднепермско-триасовый, среднеюрско-меловой и кайнозойский. При этом в пределах каждого этапа внедрение магматических расплавов происходило в пульсирующем режиме, что подтверждается бурением скв. Лудловская-1, которая вскрыла в интервале терригенных триасовых отложений два пласта, отнесенных друг от друга на 150 м, толщиной 27 и 5 м (рис. 5) соответственно, представленных габбро-диабазами и габбро-долеритами (аномально высокие сопротивления на кривой бокового каротажа). Возраст первого пласта составляет 131–139 млн лет, второго – 159 млн лет, что соответствует готериву-валанжину (ранний мел) и оксфорду (поздняя юра) [Шипилов, 1998].

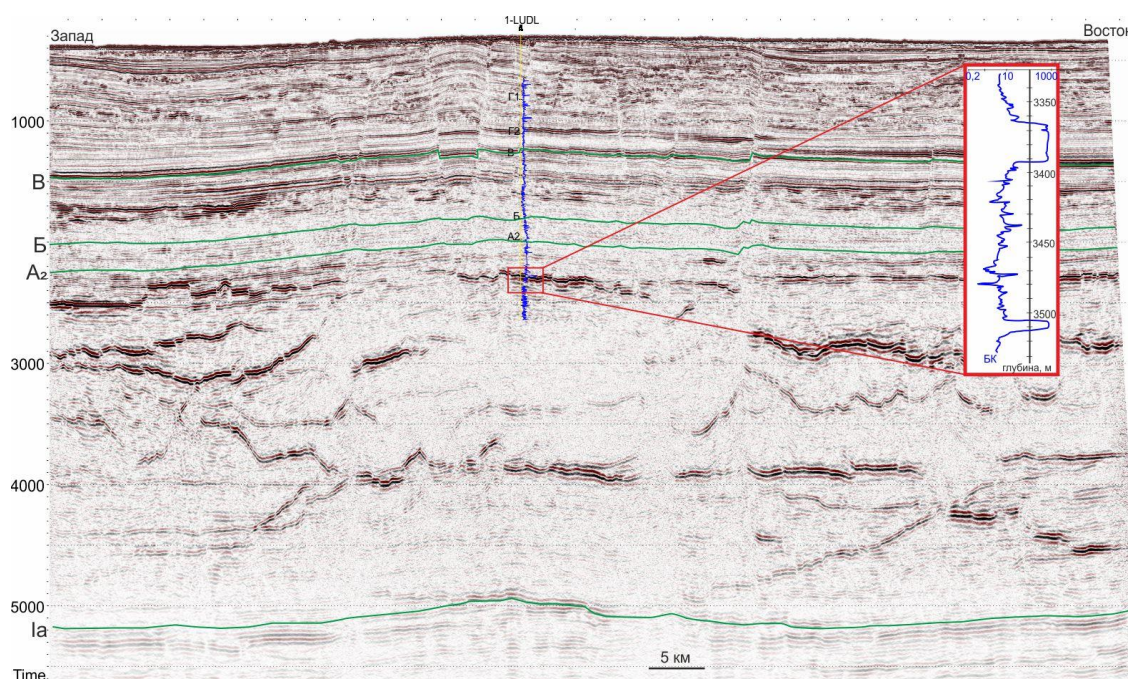


Рис. 5. Сейсмический разрез через скв. Лудловская-1

Среди волновых пакетов высокой интенсивности на Ледовом месторождении нами были выделены только те ОГ, которые уверенно отождествляются в волновом поле с возможностью прослеживания на значительной территории. При этом стоит понимать, что не каждое магматическое тело может формировать самостоятельное отражение. Во-первых, существуют ограничения разрешающей способности сейсморазведки, связанные с частотой регистрируемого сейсмического отклика. Во-вторых, сказывается экранирующий эффект вышележащих силлов, которые зачастую формируют высококонтрастные отражения. По крайней мере, такое объяснение было предложено в работе [Planke et al., 2005] для одного из вскрытых скважиной интрузивного тела с невыразительным сейсмическим обликом.

Помимо ярких отражений, связанных с силами, особенностью сейсмического материала Свальбардской и Баренцево-Карской плит является наличие вертикальных или слабонаклонных столбообразных объектов в нижней части разреза в виде потери когерентности отражений шириной от первых сотен метров до нескольких километров и высотой до нескольких километров. Зачастую такие зоны приурочены к положительным структурам верхней части разреза [Шельфовые осадочные бассейны..., 2020; Шипилов и др., 2021], либо к погребенным вулканам, в том числе гидротермальным [Planke et al., 2005]. Данные объекты принято ассоциировать с дайками.

На Ледовом месторождении (в пределах площади съемки МОГТ 3D) таких объектов (даек) нет, что обусловлено, вероятно, меньшей интенсивностью магматизма. В связи с этим возникает вопрос с идентификацией путей перемещения магмы. Поскольку столбообразных объектов, связанных с дайками в сейсмическом поле Ледового месторождения не обнаружено, а разломные нарушения фиксируются, нами сделан вывод о ключевой роли именно разрывных нарушений в контроле распространения силлов в триасовой толще.

РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ КАК ПУТИ ВНЕДРЕНИЯ МАГМЫ

Согласно региональным исследованиям (потенциальные и волновые поля) [Бургутто и др., 2016], в пределах Баренцева моря выделяется множество разломов, которые формируют несколько систем разрывных нарушений в фундаменте, палеозойском комплексе, а также в триасе и юре. В первую очередь это региональные разломы, выступающие границами между крупными блоками земной коры, протягивающиеся на сотни километров. Они представлены, главным образом, дизъюнктивными дислокациями типа сбросов и сдвигов. Основное их простирание – северо-западное. Имея древнее заложение, данные разломы реактивированы в неотектоническое время [Бургутто и др., 2016]. Этому же направлению отвечает простирание даек на спутниковых снимках островной суши Земли Франца Иосифа, свободной от ледников [Шипилов, 2018].

Для максимально эффективного извлечения информации из сейсмического куба о тектонических нарушениях в пределах изученной съемки МОГТ 3D был использован алгоритм расчета куба вероятностей разломов, который имеет неоспоримые преимущества в идентификации вертикальных неоднородностей сейсмической записи в качестве разломов перед традиционными атрибутами типа когерентности и т. п., реализованный в отечественном программном комплексе GeoPlat Pro-S [Мифтахов и др., 2021]. Седиментационные срезы полученного куба в интервале триаса и юры представлены на рис. 6.

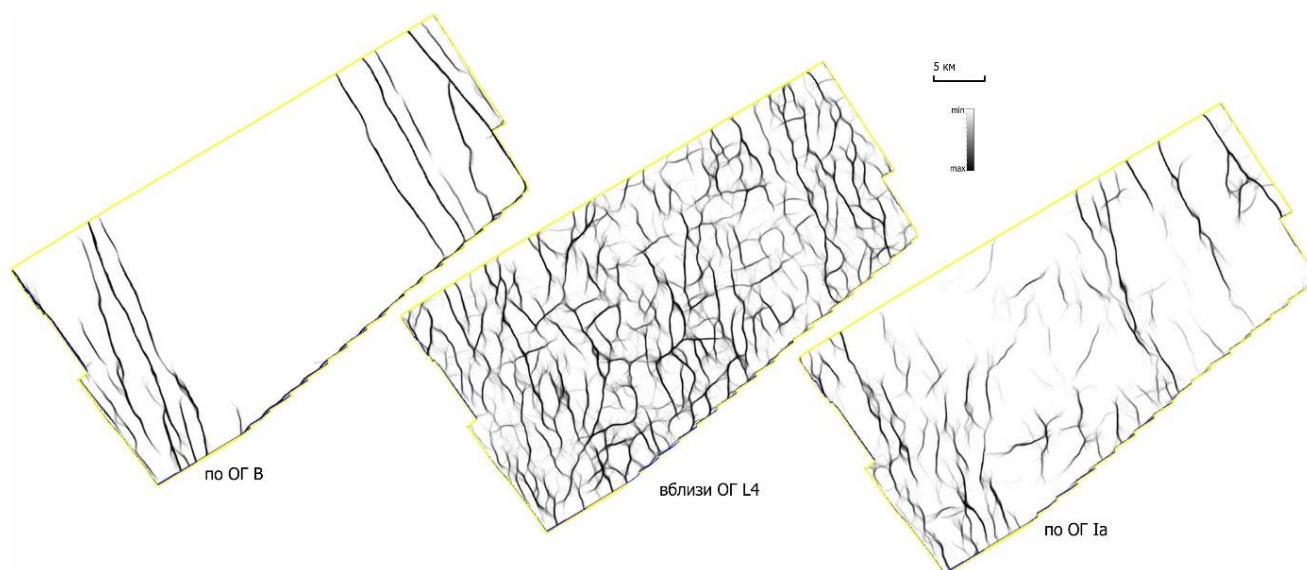


Рис. 6. Седиментационные срезы куба вероятности разломов

Наибольшая плотность разломов соответствует уровню внедрения силлов (ОГ L4), фиксируемые разломы имеют генеральное северо-западное простирание, которое лишь обозначается на общем фоне разнонаправленных нарушений переменной длины. Кровля палеозойских отложений (ОГ Ia) существенно менее подвержена разрывной тектонике, основное простирание разломов также северо-западное. Гораздо меньшее влияние на характер волнового поля оказали тектонические нарушения в юрском интервале разреза (ОГ В), где выделяются лишь единичные нарушения. Максимальная амплитуда вертикального смещения блоков достигает 90 мс (около 120 м). Выявленная общая северо-западная направленность и спрямленный характер фиксируемых линеаментов на седиментационных срезах куба вероятности разломов согласуется с представлениями о развитии региональной разломной тектоники.

Выделенные линеаменты приемлемо отображают видимые сдвиги осей синфазности (более нескольких шагов дискретизации), очевидно, связанные с разрывными нарушениями. Однако анализ карт атрибутов сейсмического поля показал наличие некоторого количества линеаментов в центральной части площади в юрском интервале разреза, которые не сопровождаются нарушением сплошности осей синфазности (рис. 7). Поскольку аппаратные решения комплекса Geoplat Pro-S предполагают возможность дообучения алгоритма, был рассчитан дополнительный куб вероятности разломов, скорректированный в сторону увеличения восприимчивости алгоритма к распознаванию признаков разломов. Сопоставление полученных результатов представлено на рис. 8.

Нетрудно заметить, что в случае внесения дополнительных признаков разломов в расчет, в виде малоамплитудных (1–3 шага дискретизации) сдвигов осей синфазности, проявляются ранее не обозначившиеся линеаменты, прежде всего, это протяженные нарушения северо-западного простирания в центре площади. Кроме того, обнаружены оперяющие укороченные разломы северо-восточной направленности.

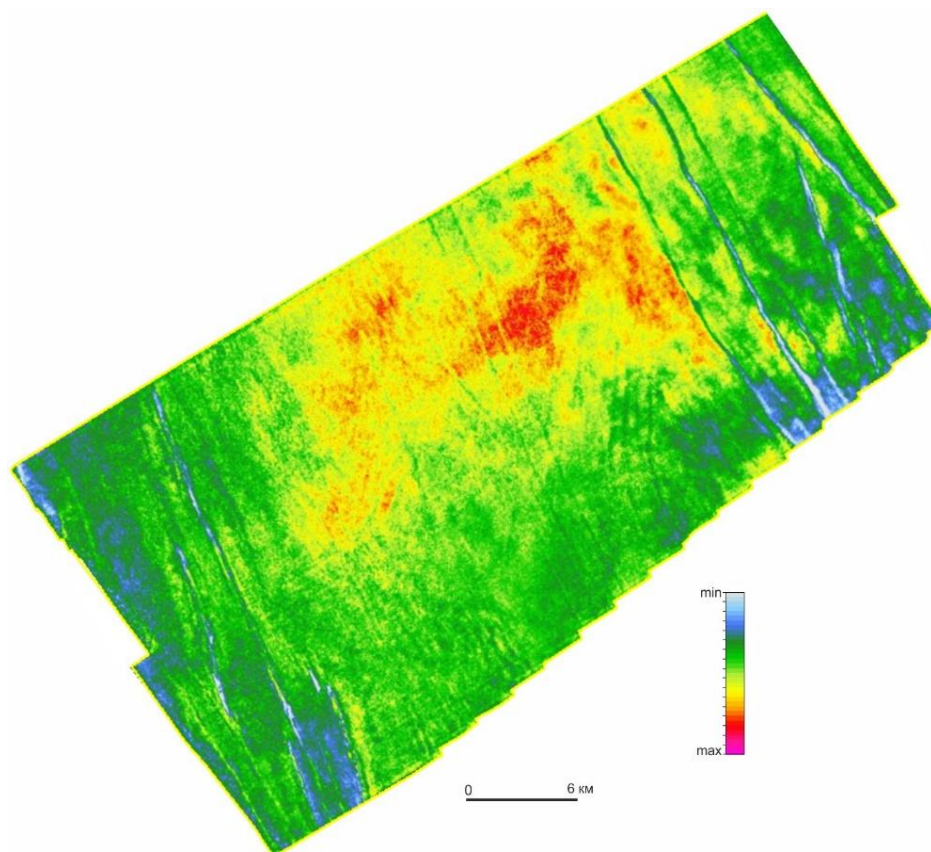


Рис. 7. Карта амплитуд ОБ В (сдвиг вниз 60 мс)

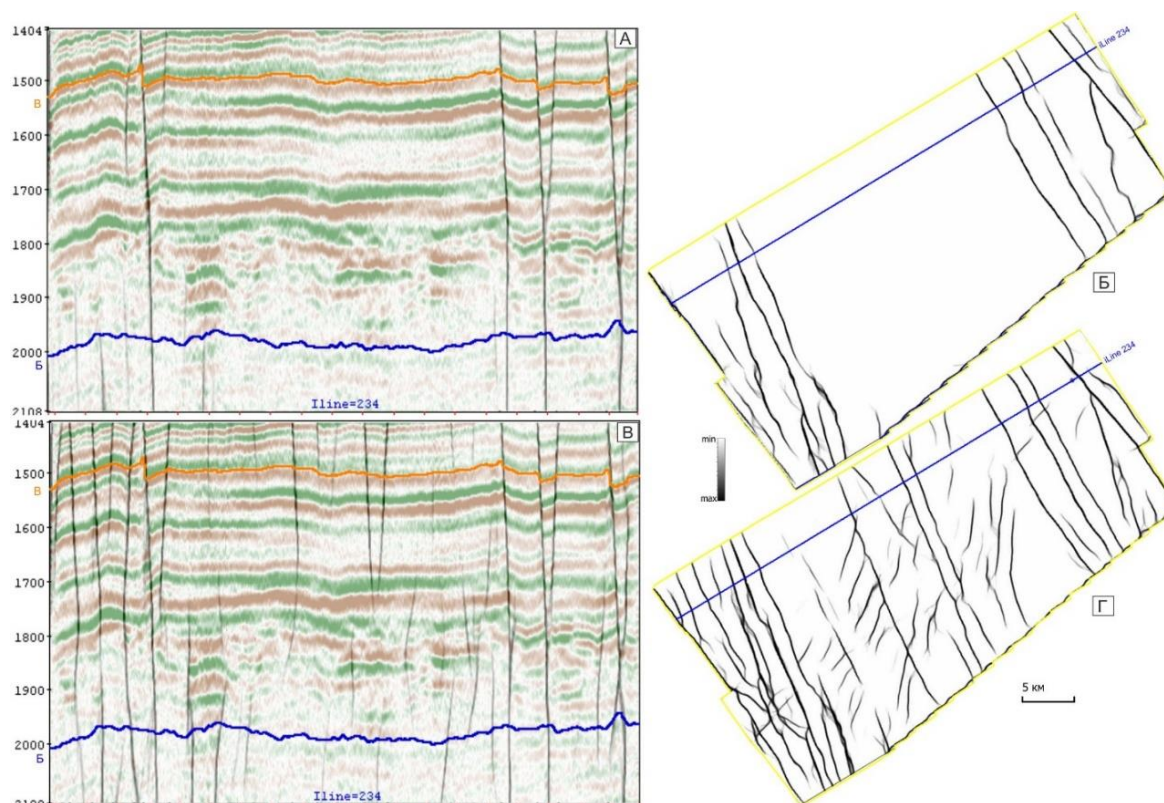


Рис. 8. Визуализация разломной тектоники юрского интервала, рассчитанной по различным алгоритмам (срезы по ОГ В): А, Б – параметры по умолчанию В, Г – дообучение алгоритма распознавания разломов

Анализируя полученные результаты (см. рис. 6, 8), следует заметить, что в юрском интервале разреза доминируют нарушения регионального, северо-западного простирания, осложненные мелкими (безамплитудными) дислокациями, заметными по сейсмическим атрибутам в центральной части площади съемки МОГТ 3D. Триасовый интервал внедрения интрузий, по которому фиксируется максимальное количество тектонических нарушений, характеризуется практически сплошным полем разнонаправленных разломов с различной амплитудой смещения.

АНАЛИЗ ТОЛЩИН СЕЙСМОКОМПЛЕКСОВ В ТРИАСОВОМ ИНТЕРВАЛЕ РАЗРЕЗА

Как сказано выше, в волновом сейсмическом поле Ледового месторождения в явном виде не отображаются столбчатые аномалии, связанные с внедрением магматических тел. Однако сами отражения, предположительно связанные с силами (ОГ группы L), формируют многочисленные кинематические аномалии, с выпуклой кровлей и/или вогнутой подошвой в виде линз и складок нагнетания. Наиболее яркий пример подобного рода аномалий зафиксирован между ОГ L4 и L5, особенно в центральной части площади, на линии 234 (см. рис. 3).

С целью локализации и анализа пространственного расположения выявленных аномалий временных толщин были построены карты изопахит смежных отражений (рис. 9). Толщины между самыми нижними закартированными горизонтами L1 и L2 имеют доминирующую аномалию на востоке, значения в пределах которой кратно превосходят фоновые данные. Область повышенных толщин ограничена четкими линиями северо-западного простирания.

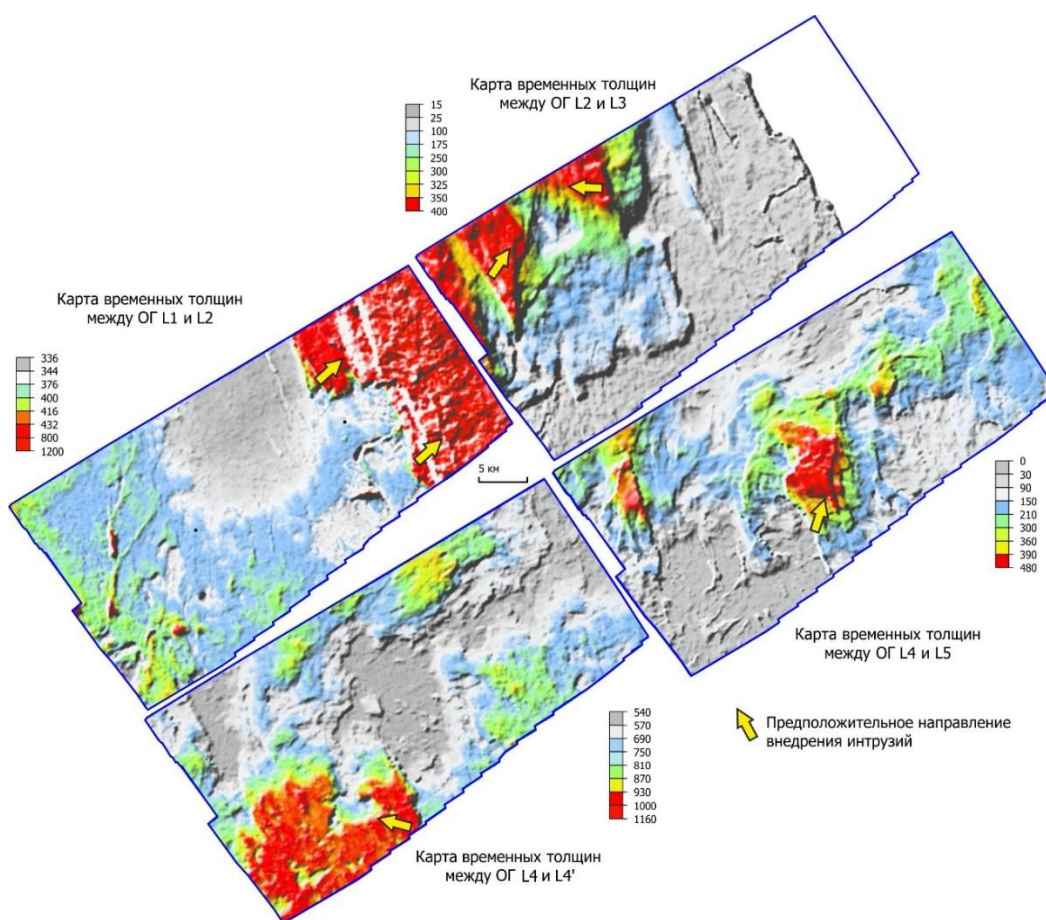


Рис. 9. Карта временных толщин между интрузивными горизонтами

Однако не стоит увязывать данный раздвиг с наличием единого крупного интрузива. Поскольку данная аномалия рассекается ОГ A_2' , который прослежен согласно терригенным седиментационным напластованиям триаса. То есть резкое воздымание ОГ L_2 связано со стратиграфически несогласным залеганием силлов.

По всей видимости, данная аномалия связана с многочисленными эпизодами последовательного (вверх по разрезу) внедрения интрузий в виде силлов. Питающими каналами данного образования выступили высокоамплитудные (до 30 мс/40 м) разломы, фиксируемые на восточном краю участка.

Граница прекращения прослеживаемости горизонта L_3 на востоке обусловлена наличием аномального подъема нижележащего горизонта L_2 , который, нарушая стратиграфические границы, резко вверх задирается в восточном направлении. Локальные максимумы толщин рассматриваемого сейсмокомплекса расположены в северо-западной части 3D съемки, также имеют крутые границы субмеридионального простирания, явно обусловленные наличием разрывных нарушений. При этом не наблюдается связи между амплитудами разломов, контролирующими данные аномалии толщин, и величинами временных раздувов. Максимальные толщины сейсмокомплекса порядка 400 мс приурочены как к высокоамплитудным разломам на западе (20–40 мс/40–50 м), так и к практически безамплитудным на востоке.

Сейсмокомплекс между ОГ L_4 и L_4' характеризуется существенными вариациями толщин. Минимальные мощности слоя приходятся на центральную часть площади, максимальные сосредоточены на ее юго-западе. В данном случае карта толщин также четко обозначает разломно-блоковую делимость территории. Во многом зеркально выше описанной картине зафиксировано увеличение толщин между ОГ L_4 и L_5 . Основная область раздува временных толщин приходится на центр 3D съемки, еще один локальный максимум толщин, меньших размеров (апофиз), отмечен на северо-западе площади.

Самый верхний прослеженный горизонт L_6 , связанный с силлами, ограниченно охватывает лишь северо-западную часть площади съемки. При этом зона прослеживания данного отражения укладывается между двумя экстремумами толщин нижележащего магматического сейсмокомплекса (рис. 10).

Таким образом, сопоставив положение областей с максимальными значениями закартированных толщин сейсмокомплексов, связанных с силлами, можно заметить последовательное смещение временных раздувов по площади для каждого последующего этапа внедрения интрузивных инъекций. Полистадийность внедрения магматических расплавов подтверждена региональными данными с определенными датировками, о чем было упомянуто выше. При этом, судя по скв. Лудловская-1, может существовать общая тенденция к уменьшению возраста внедрившихся силлов с сокращением глубины.

Исходя из теории формирования силлов, главным условием субсогласных инъекций магматического расплава в слоистую осадочную толщу является режим тектонического растяжения, в результате чего формируются ослабленные зоны с пониженным давлением вмещающих пород [Короновский, 2018].

Охлаждающиеся магматические расплавы формировали конечные камеры внедрения, плотность вещества в которых составляла порядка 2.9 г/см³ [Planke et al., 2005]. Плотность вмещающих пород, без учета разуплотнения, оценивается в пределах 2.5 г/см³. Соответственно, каждая последующая инъекция магмы осуществлялась через систему разрывных нарушений, в более податливую для внедрения область осадочной толщи, еще не затронутую магматизмом и ослабленную тектоническими напряжениями. Количество прослеженных горизонтов, связанных со строением интрузий, ограничено качеством сейсмических данных. Диапазоны перепадов глубин инъекционных объектов в разы превышают

неровности триасовых и юрско-меловых горизонтов. Это указывает на то, что постседиментационные магматические процессы не оказали существенного влияния на структурные планы верхней части осадочного чехла Ледового месторождения. В этой связи не стоит напрямую увязывать представленные здесь временные толщины между горизонтами группы L с реальной толщиной магматических объектов. Тем не менее, закартированные сейсмические отражения позволяют получить представление о характере поступления магмы и ее локализации в терригенных осадках триасовой толщи.

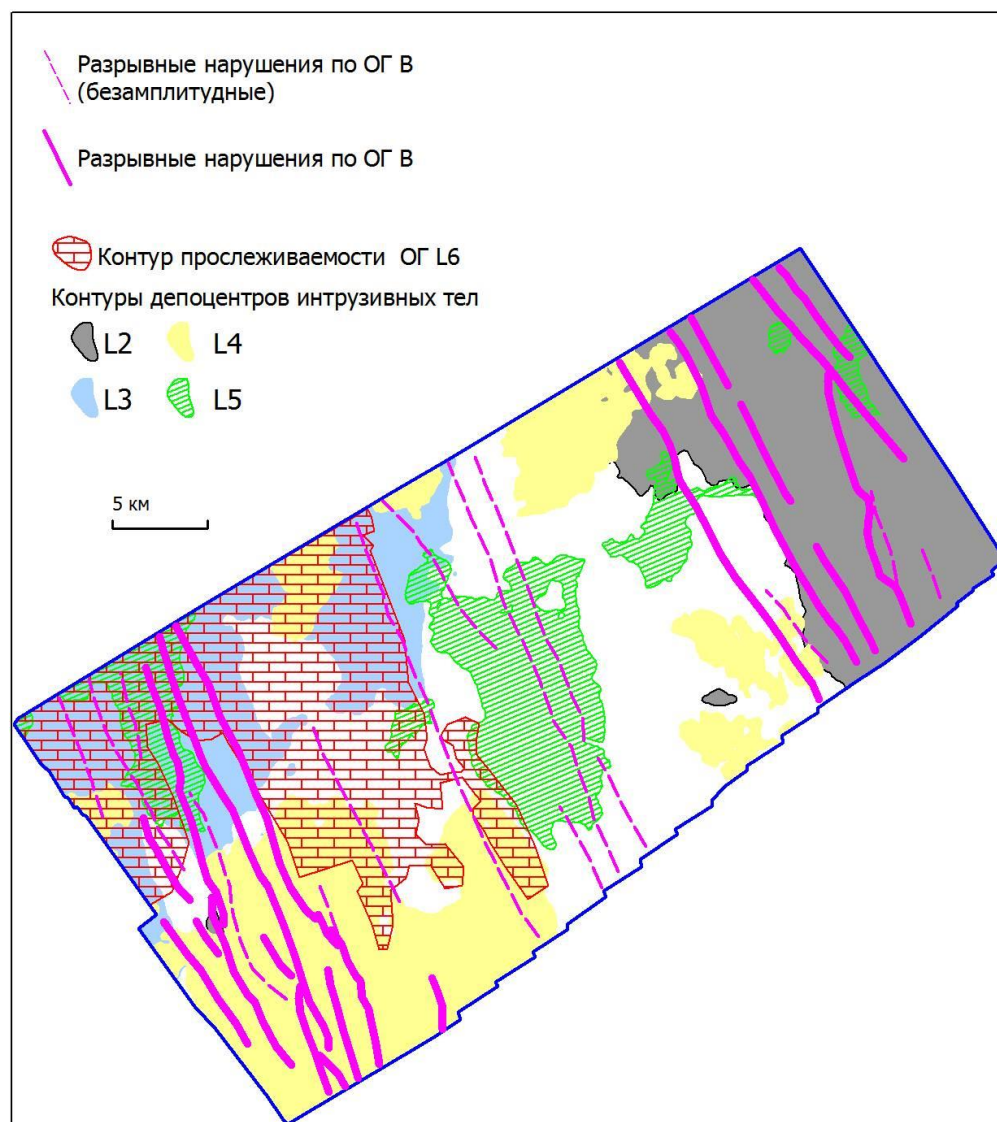


Рис. 10. Сопоставление основных депоцентров магматических сейсмокомплексов юрско-мелового возраста

Влияние глубинных магматических процессов на продуктивность в рамках данной статьи не рассматривалась. Однако стоит отметить, что вне зависимости от того, какой теории происхождения УВ придерживаются исследователи (органической или неорганической), все признают существенной роль интрузий на формирование залежей нефти и газа в Баренцевом море. Это либо увеличение газогенерационного потенциала «нефтематеринских» пород под воздействием разогретых магматических инъекций [Шпилов, 2018], либо интрузии выступают индикатором глубинной флюидодинамической активности региона, одним из факторов которой является наличие в разрезе УВ [Кудрявцев, 1973; Нежданов и др., 2023].

ВЫВОДЫ

Выделяемые аномальные объекты в сейсмическом поле триасовых отложений Ледового месторождения, обусловленные наличием интрузий (силлов), доступны для прослеживания и последующего изучения их особенностей с использованием современных данных сейсморазведки МОГТ 3D. Частично несогласное с вмещающей осадочной толщей залегание магматических пород (силлы залегают параллельно вмещающей толще [Planke et al., 2005, Fig. 8]), отличающихся повышенной акустической контрастностью, относительно терригенных, существенно затрудняет прослеживание последних, но вовлечение в интерпретационный процесс анализа седиментационных срезов увеличивает вероятность корректной идентификации объектов волнового поля.

В пределах изученного участка выделяется сеть разломных элементов северо-западного простирания, контролирующая толщины магматических сейсмокомплексов. Отсутствие признаков даек, столбообразных зон потери когерентности, в сейсмическом поле позволяет рассматривать тектонические нарушения в качестве основных путей внедрения магмы в осадочный чехол.

Установлено закономерное смещение раздувов временных толщин сейсмокомплексов, сложенных магматическими породами, что подтверждает полистадийный характер внедрения глубинных флюидов в осадочный чехол.

ЛИТЕРАТУРА

- Бургуто А.Г., Журавлев В.А., Заварзина Г.А., Зинченко А.Г., Зуйкова О.Н., Морозова М.В., Костин Д.А., Радченко М.С., Солонина С.Ф., Шкарубо С.И.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист S-(36),37 – Баренцево море (зап., центр. части). Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 144 с. + 7 вкл.
- Короновский Н.В.** Общая геология: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения. – М.: КДУ, Добросвет, 2018.
- Кудрявцев Н.А.** Генезис нефти и газа. – Ленинград: Недра Пресс, 1973. – 216 с.
- Мифтахов Р.Ф., Авдеев П.А., Гогоненков Г.Н., Базанов А.К., Ефремов И.И.** Картирование тектонических нарушений на основе машинного обучения и нейронных сетей // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 123–136, doi: 10.31087/0016-7894-2021-3-123-136.
- Нежданов А.А., Огибенин В.В., Смирнов А.С., Сподобаев А.А.** Флюидодинамическая интерпретация сейсморазведочных данных МОВ ОГТ для поисков и разведки нефти и газа // Бурение и нефть. – 2023. – № 2. – С. 14–21.
- Ольнева Т.В., Овечкина В.Ю.** Объектно-ориентированная корреляция как новый методический подход в процессе подготовки данных для сейсмофациального анализа // Геофизика. – 2016. – № 4. – С. 9–14.
- Структурно-тектоническая** схема Баренцево-Карского региона. Составлена по материалам ВНИИОкеанологии (Т. 5, кн. 1 Арк. Мор.) с изменениями и дополнениями. – Санкт-Петербург, 2004.
- Шельфовые** осадочные бассейны Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал / Под ред. д-ра техн. наук Г.С. Казанина; АО «МАГЭ». – Мурманск, СПб.: Реноме, 2020. – 544 с., doi: 10.25990/dhw6-9x41.
- Шипилов Э.В.** О периодичности проявлений основного магматизма в пределах Западно-Арктической окраины Евразии в фанерозое // Вестник МГТУ. – 1998. – № 1 (3). – С. 97–104.

Шипилов Э.В. Базальтоидный магматизм и проблема газоносности Восточно-Баренцевского мегабассейна // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 2 (30). – С. 94–106, doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-94-106.

Шипилов Э.В., Шкарубо С.И. Современные проблемы геологии и тектоники осадочных бассейнов Евразийско-Арктической континентальной окраины. Том 1. Литолого- и сейсмостратиграфические комплексы осадочных бассейнов Баренцево-Карского шельфа. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010. – 266 с.

Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И. Природа региональных магнитных аномалий северо-востока Баренцево-Карской континентальной окраины по результатам интерпретации сейсмических данных // Арктика: экология и экономика. – 2021. – № 11 (2). – С. 195–204, doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-195-204.

Chen H., Zhu X., Gawthorpe R.L., Wood L.J., Liu Q., Li S., Shi R., Li H. The interactions of volcanism and clastic sedimentation in rift basins: Insights from the Palaeogene–Neogene Shaleitian uplift and surrounding sub-basins, Bohai Bay Basin, China // Basin Research. – 2022. – Vol. 34 (3). – P. 1084–1112, doi: 10.1111/bre.12651.

Grogan P., Nyberg K., Fotland B., Myklebust R., Dahlgren S., Riis F. Cretaceous magmatism south and east of Svalbard: evidence from seismic reflection and magnetic data // Polarforschung. – 2000. – Vol. 68. – P. 25–34.

Planke S., Symonds P., Alvestad E., Skogseid J. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basalt extrusive complexes on rifted margins // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. – 2000. – Vol. 105 (B8). – P. 19335–19352, doi: 10.1029/1999JB900005.

Planke S., Rasmussen T., Rey S., Myklebust R. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal complexes in the Vøring and Møre Basins // Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. – 2005. – Vol. 6. – P. 833–844, doi: 10.1144/0060833.

Posamentier H.W., Paumard V., Lang S.C. Principles of seismic stratigraphy and seismic geomorphology I: Extracting geologic insights from seismic data // Earth-Science Reviews. – 2022. – Vol. 228. – 103963, doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103963.

REFERENCES

Burguto A.G., Zhuravlev V.A., Zavarzina G.A., Zinchenko A.G., Zuikova O.N., Morozova M.V., Kostin D.A., Radchenko M.S., Solonina S.F., Shkarubo S.I. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (3d generation). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List S-(36),37. – Barents Sea (west, central parts). Explanatory notes [in Russian]. – Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, St. Petersburg, 2016. – 144 p. + 7 suppl.

Chen H., Zhu X., Gawthorpe R.L., Wood L.J., Liu Q., Li S., Shi R., Li H. The interactions of volcanism and clastic sedimentation in rift basins: Insights from the Palaeogene–Neogene Shaleitian uplift and surrounding sub-basins, Bohai Bay Basin, China // Basin Research. – 2022. – Vol. 34 (3). – P. 1084–1112, doi: 10.1111/bre.12651.

Grogan P., Nyberg K., Fotland B., Myklebust R., Dahlgren S., Riis F. Cretaceous magmatism south and east of Svalbard: evidence from seismic reflection and magnetic data // Polarforschung. – 2000. – Vol. 68. – P. 25–34.

Koronovskiy N.V. General geology [in Russian]. – KDU, Dobrosvet, Moscow, 2018.

Kudryavtsev N.A. Genesis of oil and gas [in Russian]. – Nedra Press, Leningrad, 1973. – 216 p.

Miftakhov R.F., Avdeyev P.A., Gogonenkov G.N., Bazanov A.K., Efremov I.I. Mapping of faults based on machine learning and neural networks // Russian Oil and Gas Geology. – 2021. – Vol. 3. – P. 123–126, doi: 10.31087/0016-7894-2021-3-123-136.

Nezhdanov A.A., Ogibenin V.V., Smirnov A.S., Spodobaeв A.A. Fluid dynamic interpretation seismic survey data MRV CDP for oil and gas prospecting and exploration // Bureniye i Neft'. – 2023. – Vol. 2. – P. 14–21.

Olneva T.V., Ovechkina V.Yu. Object-oriented correlation as a new methodological approach in the preparation of data for seismic facies analysis // Geofizika. – 2016. – Vol. 4. – P. 9–14.

Planke S., Symonds P., Alvestad E., Skogseid J. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basalt extrusive complexes on rifted margins // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. – 2000. – Vol. 105 (B8). – P. 19335–19352, doi: 10.1029/1999JB900005.

Planke S., Rasmussen T., Rey S., Myklebust R. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal complexes in the Vøring and Møre Basins // Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. – 2005. – Vol. 6. – P. 833–844, doi: 10.1144/0060833.

Posamentier H.W., Paumard V., Lang S.C. Principles of seismic stratigraphy and seismic geomorphology I: Extracting geologic insights from seismic data // Earth-Science Reviews. – 2022. – Vol. 228. – 103963, doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103963.

Shelf sedimentary basins of the Russian Arctic: geology, geo-ecology, mineral resources potential / Kazanin G.S. (Ed.), JSC MAGE. – Murmansk, Renome, St. Petersburg, 2020. – 544 p., doi: 10.25990/dhw6-9x41.

Shipilov E.V. About demonstration cycle of the basic magmatism in the Phanerozoic in West Arctical edge of Eurasia // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. – 1998. – Vol. 1 (3). – P. 97–104.

Shipilov E.V. Bazaltoid magmatism and the problem of the gas potential of the east-Barents megabasin // Arctic: Ecology and Economy. – 2018. – Vol. 2 (30). – P. 94–106, doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-94-106.

Shipilov E.V., Shkarubo S.I. Current issues of geology and tectonics of sedimentary basins of Eurasian-Arctic continental margin. Vol. 1. Lithologic- and seismostratigraphic complexes of sedimentary basins of the Barents-Kara shelf [in Russian]. – KNTs RAN, Apatity, 2010. – 266 p.

Shipilov E.V., Lobkovskiy L.I., Shkarubo S.I. The nature of regional magnetic anomalies in the northeast of the Barents-Kara continental margin based on the results of seismic data interpretation // Arctic: Ecology and Economy. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 195–204, doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-195-204.

Structural and tectonic scheme of the Barents-Kara region, VNIIOkeanologii with modifications (Vol. 5, Book 1, Arc. Seas). – St. Petersburg, 2004.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СМИРНОВ Александр Сергеевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геофизики Тюменского индустриального университета. Начальник центра обработки и интерпретации данных разведочной геофизики ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Основные научные интересы: комплексная обработка и интерпретация геолого-геофизических данных.

СПОДОБАЕВ Александр Анатольевич – старший научный сотрудник центра обработки и интерпретации данных разведочной геофизики ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Основные научные интересы: комплексная интерпретация данных сейсморазведки.

НЕЖДАНОВ Алексей Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. Заслуженный геолог РФ. Советник по геологии ФАУ «ЗапСибНИИГГ». Основные научные интересы: геология и геофизика Западной Сибири, интерпретация геолого-геофизических данных.

*Статья поступила 8 февраля 2023,
принята к печати 16 марта 2023*



ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ВЫЧИТАНИЯ КРАТНЫХ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН

А.М. Камашев^{1,2}, А.А. Дучков^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: a.kamashev@g.nsu.ru*

Данная работа посвящена разработке и тестированию алгоритма адаптивного вычитания кратных отраженных волн с помощью сверточной нейронной сети. Алгоритм является одним из основных этапов в методе подавления кратных отраженных волн, основанном на разделении волновых форм в области Радона. В работе рассматривается постановка задачи для нейронной сети, подготовка обучающего и тестового наборов данных и тестирование алгоритма. Использование сверточной нейронной сети позволяет автоматизировать и ускорить процедуру адаптивного вычитания. Тестирование алгоритма проводилось на синтетических данных и показало эффективную адаптацию кратных волн, а также важность корректного построения модели кратных отраженных волн.

Сверточная нейронная сеть, высокоразрешающее преобразование Радона, кратные волны

APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR ADAPTIVE SUBTRACTION OF MULTIPLE REFLECTED WAVES

A.M. Kamashev^{1,2}, A.A. Duchkov^{1,2}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: a.kamashev@g.nsu.ru*

This work is devoted to the development and testing of an algorithm for adaptive subtraction of multiple reflected waves using a convolutional neural network. The algorithm is one of the main steps in the method of suppression of multiple reflected waves based on the separation of wave forms in the Radon region. The paper considers the formulation of a problem for a neural network, the preparation of training and test data sets and the testing of the algorithm. Using a convolutional neural network allows to automate and speed up the adaptive subtraction procedure. The algorithm was tested on synthetic data. Testing shows the effective adaptation of multiple waves, as well as the importance of correctly constructing a model of multiples.

Convolution neural network, high-resolution Radon transform, multiple waves

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) является ключевым методом изучения структуры осадочных бассейнов. В МОВ полезными волнами являются однократно отраженные волны. Помимо полезных волн в сейсмической записи присутствуют также волны-помехи. К интенсивным

помехам относятся кратные волны – волны, совершившие два или более отражений от границ раздела геологических сред, включая поверхность Земли [Боганик, Гурвич, 2006]. Наличие кратных волн приводит к появлению ложных границ на сейсмическом разрезе. Поэтому подавление подобных помех является важной процедурой в обработке сейсморазведочных данных.

Техники подавления кратных отраженных волн могут быть разделены на две категории [Verschuur, 2013]:

- методы, основанные на различии кратных и однократных по кинематическим характеристикам (например, разделение волн в области Радона);
- методы, основанные на предсказании кратных волн (например, SRME).

Данная работа посвящена методу подавления кратных отраженных волн, основанному на разделении волновых форм в области Радона – область (t, p) , где t – время прихода волны, p – кривизна [Hampson, 1986]. Использование преобразования Радона позволяет разделить интерферирующие волны по кривизне. Зачастую для упрощения задачи разделения волновых форм предварительно спрямляют волновые формы путем введения кинематической поправки. Таким образом, все целевые отражения (спрямленные волновые формы) должны быть сконцентрированы в области с низким значением кривизны, а кратные отражения (недо- или переспрямленные) должны быть в области с большими значениями кривизны. В итоге мы можем выделить основные этапы процедуры подавления кратных:

- 1) введение кинематической поправки по известному скоростному закону;
- 2) переход в область Радона;
- 3) подавление целевых отражений;
- 4) сопряженное преобразование Радона – получение модели кратных;
- 5) адаптивное вычитание модели кратных из исходной сейсмической записи.

Существует несколько типов преобразования Радона, в зависимости от типа траектории, по которой происходит суммирование: 1) линейный; 2) параболический; 3) гиперболический. Однако отраженные волны имеют гиперболическую форму, поэтому для повышения точности целесообразнее использовать именно гиперболическое преобразование Радона. Также для повышения точности используется высокоразрешающее преобразование Радона, суть которого заключается в минимизации разницы между исходными данными и данными после сопряженного преобразования Радона [Chen et al., 2021]. И тем не менее модель кратных отраженных волн является всего лишь приближением к истинным кратным отражениям. На практике высокоразрешающее преобразование Радона позволяет достаточно точно восстановить кинематику волн, но при этом динамические показатели получаются неточными. Из-за невозможности прямого вычитания модели кратных из сейсмической записи, необходимо использовать адаптивное вычитание.

Существует несколько подходов адаптивного вычитания и большое количество их вариаций. Выделим две основные группы: 1) адаптация сигнала в окне на основе фильтра Винера и [Yilmaz, 2001]; 2) разложение сейсмических данных по базисным функциям, например, разложение по кёрвлетам [Neelamani et al., 2010].

Наиболее распространенный метод адаптивного вычитания основан на использовании двумерных фильтров. Параметры фильтра подбираются таким образом, чтобы при применении к модели кратных он наилучшим образом совпадал с исходной сейсмической записью с точки зрения наименьших квадратов. Однако если внутри окна фильтра на исходной сейсмограмме будут присутствовать не только кратные отражения, но и однократные, то скорее всего они будут вычтены. Поэтому размер фильтра по временной

компоненте должен быть меньше интервала между двумя событиями. На практике же используют комбинацию фильтров больших и маленьких размеров. Глобальные фильтры используются для получения грубой оценки, а фильтры маленьких размеров для локальных уточнений [Verschuur, 2013].

Суть вейвлет-преобразования состоит в разложении сейсмической записи на волновые пакеты различных размеров, ориентации и положения [Никитин и др., 2013]. Существует большое количество вейвлетов, на основе формы сейсмического импульса выбирается подходящее преобразование. Полученные вейвлет-спектрограммы принципиально отличаются от обычных спектров Фурье тем, что дают четкую привязку спектра различных особенностей сигналов ко времени. Алгоритм адаптивного вычитания с использованием вейвлет-преобразований состоит в разложении сейсмической записи на волновые пакеты и последующим удалением пакетов, относящихся к волнам-помехам. Преимущество данного подхода заключается в независимости от динамических характеристик модели кратных. Однако на практике подобные преобразования требуют тяжелых вычислений, а также большого количества памяти для хранения весов каждого из пакетов.

В последнее время в обработке сейсмических данных широкой популярностью пользуются методы машинного обучения. С их помощью решают такие задачи, как подавление случайного шума [Zhu et al., 2019], пикировка первых вступлений [Loginov et al., 2019], подавление поверхностной волны [Zheng et al., 2022] и т. д. И как мы видим на практике использование машинного обучения зачастую приводит к положительным результатам.

В данной работе будет проверена концепция использования сверточной нейронной сети (СНС) для адаптивного вычитания кратных отраженных волн на синтетическом наборе данных. Использование СНС позволит решить основные проблемы стандартных подходов: 1) ручной подбор параметров фильтров; 2) низкая скорость процедуры адаптивного вычитания. Успешный результат в работе с синтетическим набором данных позволит в дальнейшем перейти к работе с реальными полевыми данными.

МЕТОД

Сверточные нейронные сети. Примечательно, что чаще всего в задачах обработки сейсмических сигналов применяются именно сверточные нейронные сети (СНС). Концепция СНС заключается в использовании сверточных фильтров с ядрами различных размеров и значений. Обучая нейронную сеть (НС), мы решаем задачу оптимизации, подбирая веса таким образом, чтобы результат применения НС наилучшим образом совпадал с правильным результатом с точки зрения функционала невязки (обучение с учителем).

Постановка задачи. Для корректной работы НС необходимо правильно поставить задачу. Для этого необходимо учесть ряд факторов:

- апробация подхода адаптивного вычитания с помощью НС на синтетическом наборе данных с последующим переходом к работе с реальным набором данных;
- выбор региона исследования;
- выбор этапа обработки сейсморазведочных данных, после которого будет использована процедура адаптивного вычитания с помощью НС;
- выбор входных и выходных параметров НС.

Перед тем как перейти к работе с реальными данными, необходимо проверить работоспособность метода на синтетических данных. Генерация синтетических данных будет рассмотрена ниже.

Несмотря на то что все кратные волны можно отнести к общей категории волн-помех, они отличаются по своей природе возникновения и траекториям. Так, например, в морской сейсморазведке применяют несколько процедур подавления кратных: 1) подавление кратных в водном слое; 2) подавление кратных от свободной поверхности. Однако в данной работе будет рассматриваться только наземная сейсморазведка.

По типу траектории кратные волны делят на полнократные, частично-кратные, внутрикратные (рис. 1). Несмотря на это после введения скоростного закона все типы кратных волн останутся не спрямленными, а это значит, что мы сможем их выделить в области Радона. Процедура подавления будет применяться после следующих этапов обработки: 1) введение статической поправки; 2) мьютинг; 3) подавление прямой волны; 4) подавление поверхностной волны; 5) подавление случайного шума; 6) введение кинематической поправки. Таким образом в сейсмической записи в основном останется только полезный сигнал и интересующие нас сейсмические помехи.

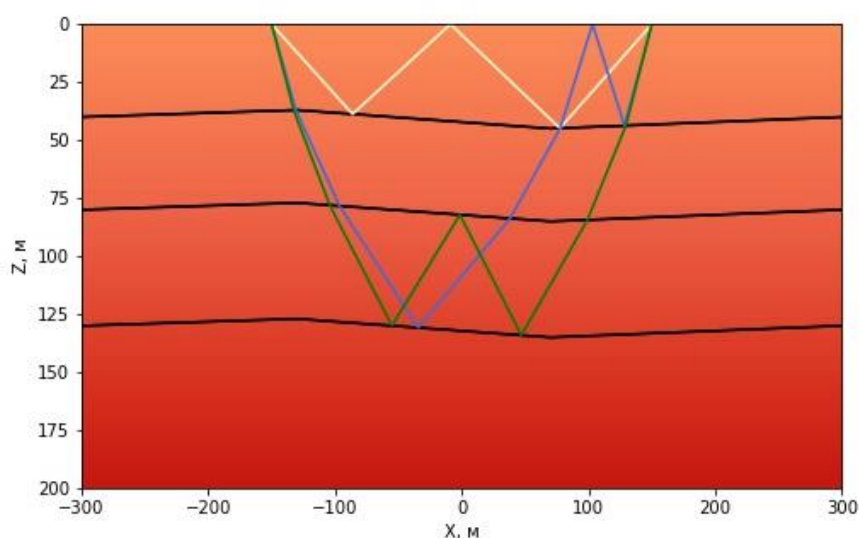


Рис. 1. Лучевая схема для разных типов кратных волн (желтый цвет – полнократная; синий цвет – частично-кратная; зеленый цвет – внутрикратная)

Входные данные для НС состоят из двух сейсмограмм общей глубинной точки (ОГТ): 1) полная сейсмическая запись; 2) модель кратных отраженных волн. На выходе НС мы получим три изображения: 1) очищенная сейсмограмма; 2) адаптированная модель кратных отраженных волн; 3) шум, который содержался в исходной сейсмической записи и модели кратных. Наличие шума обусловлено следующими причинами: 1) несмотря на то что предварительно уже были применены процедуры подавления различных шумов, эти процедуры не являются идеальными, а значит в сейсмической записи все еще остались артефакты; 2) наличие дополнительного изображения на выходе позволит повысить сходимость нейронной сети; 3) добавление случайного шума к синтетическим данным позволит увеличить размер обучающей и тестовой выборки.

Архитектура нейронной сети. Как уже говорилось выше, наибольшей популярностью для задач шумоподавления (обработка изображений) пользуются сверточные нейронные сети. За основу СНС, используемой в данной работе, была взята архитектура U-Net [Ronneberger et al., 2015]. Принцип работы данной модели СНС основан на последовательном использовании слоев свертки, пуллинга, а также остаточных связей. Сначала исходные данные преобразуются путем использования сверточных фильтров с различными ядрами свертки (построение карт признаков), затем размер преобразованных

данных уменьшается с помощью слоев пуллинга. После нескольких итераций понижения размерности данных используется обратная процедура восстановления изображения. Чтобы избежать потерю важных признаков, вводятся остаточные связи (skip connections), которые связывают изображения одинакового размера.

Архитектура состоит из 28 сверточных слоев, 4 слоев пуллинга, 4 слоев ап-семплинга, 4 пропускных связей (рис. 2). На вход подается трехмерный массив размера (400,800,2). Первая ось отвечает за номер трассы, вторая за номер отсчета по времени, третья за номер изображения. Каждый слой свертки возвращает n -ое количество карт признаков (количество фильтров). Количество фильтров для каждого слоя свертки соответствует:

4,8,8,16,16,16,32,32,32,64,64,64,128,128,128,64,64,64,32,32,32,16,16,16,8,8,8,4,3. Для всех слоев свертки кроме последнего используется функция активации ReLU. На последнем слое, используется функция активации tanh. На выходе СНС мы получаем три сейсмограммы исходного размера. В качестве функции потерь используется среднеквадратичная невязка.

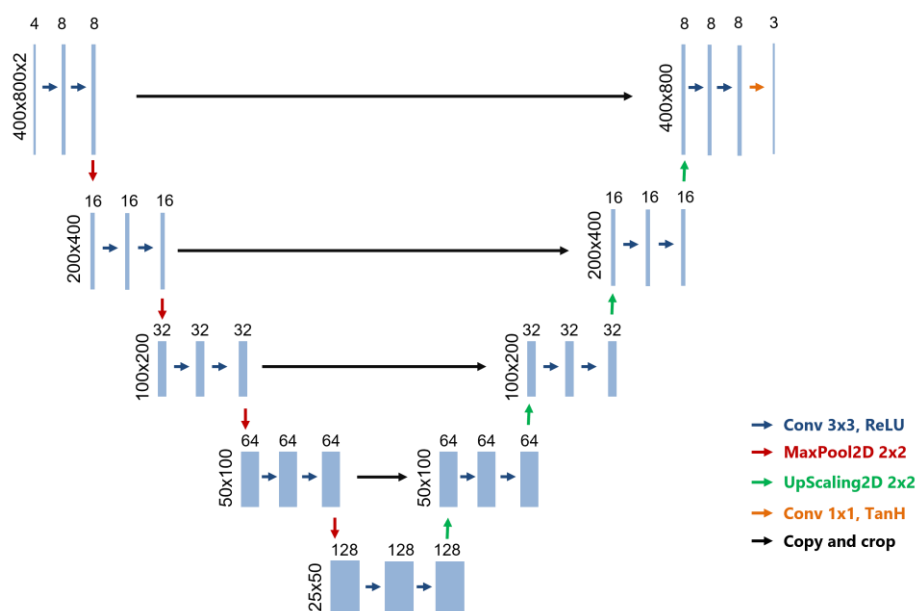


Рис. 2. Сверточный автоэнкодер с остаточными связями

Подготовка данных и обучение нейронной сети. Для генерации синтетического набора данных был использован метод моделирования, основанный на наложении одинаковой формы сигнала на годографы отраженных волн, полученных с помощью лучевого трассирования. Таким образом амплитуда сигнала остается постоянной для каждой волновой формы. Глубинно-скоростная модель представляет собой совокупность однородных слоев с криволинейными границами между ними (рис. 3). Для линейного профиля было смоделировано 284 сейсмограммы с длиной записи 4 с (шаг дискретизации 8 мс) и количеством трасс равным 322, максимальное удаление 8000 м.

Для обучения НС было предложено использовать одну сейсмограмму из набора. Для увеличения размера обучающей выборки, а также для повышения надежности работы НС к исходному набору данных был добавлен случайный Гауссов шум. Помимо этого, размер тренировочных данных был увеличен путем поворота сейсмограмм. Углы поворота принимали значения от 0 до 350 градусов включительно с шагом 10 градусов. В итоге было получено 36 изображений. Для построения модели кратных использовалась

быстрая библиотека высокоразрешающего гиперболического преобразования Радона [Nikitin et al., 2017]. Каждая сейсмограмма была нормирована на максимум по модулю. Так как размер смоделированных сейсмограмм меньше нужного размера, то по краям были добавлены нули. На рисунке 4 изображен пример входных данных НС.

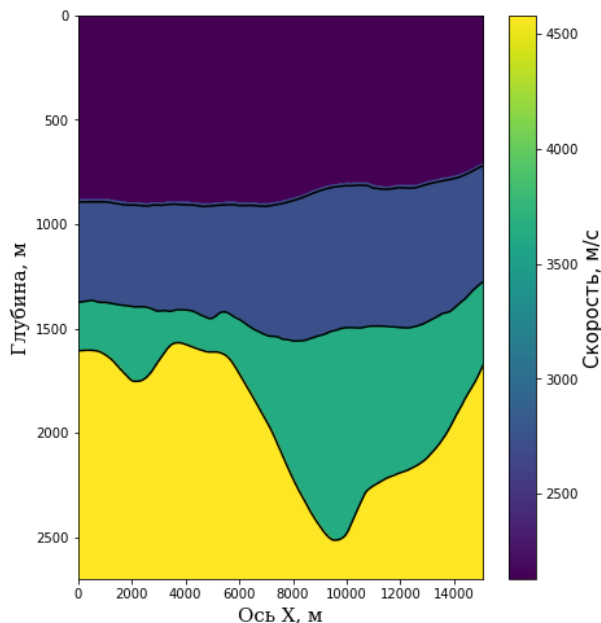


Рис. 3. Моделирование синтетических данных: глубинно-скоростная модель

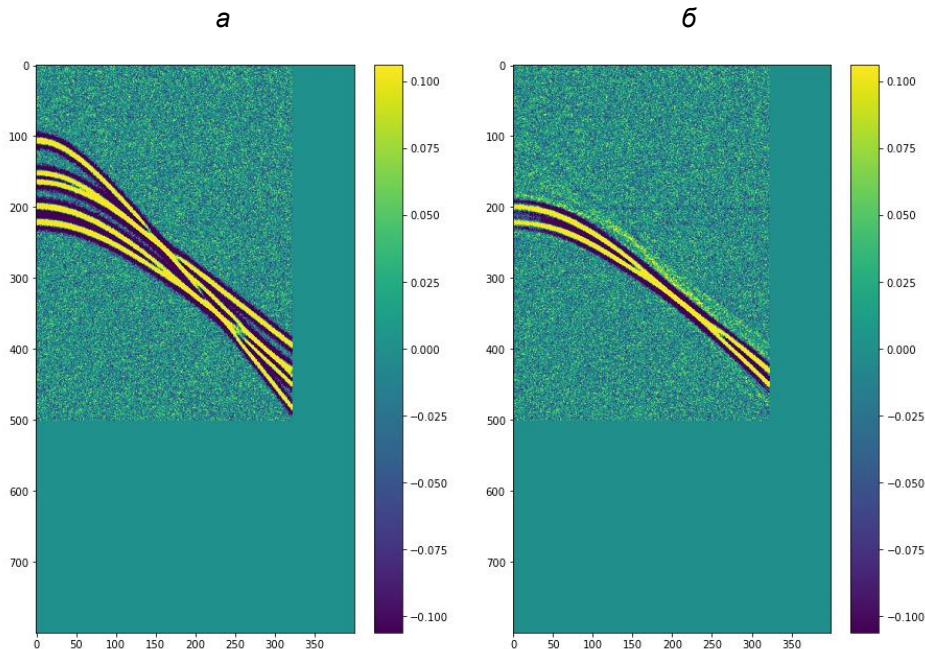


Рис. 4. Моделирование синтетических данных: пример входных данных для НС: а – исходная сейсмограмма; б – модель кратных отраженных волн

В качестве выходных данных для обучения НС, использовались предварительно смоделированные очищенная сейсмограмма, сейсмограмма кратных волн, сейсмограмма, содержащая в себе только Гауссов шум. Пример выходных данных изображен на рис. 5.

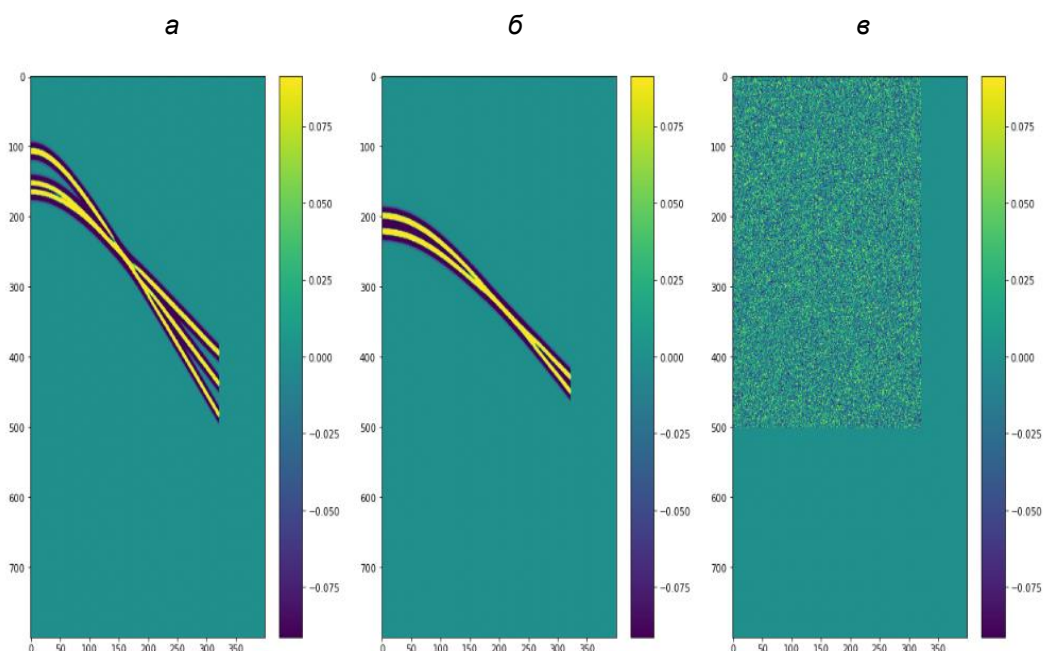


Рис. 5. Моделирование синтетических данных, пример выходных данных для НС: а – результат адаптивного вычитания; б – адаптированная модель кратных отраженных волн; в – сейсмограмма случайного шума

Обучалась НС в течение 1500 эпох. Размер валидационной выборки составил три изображения (что составляет 8.3 % от размера обучающей выборки). Кривая обучения изображена на рис. 6.

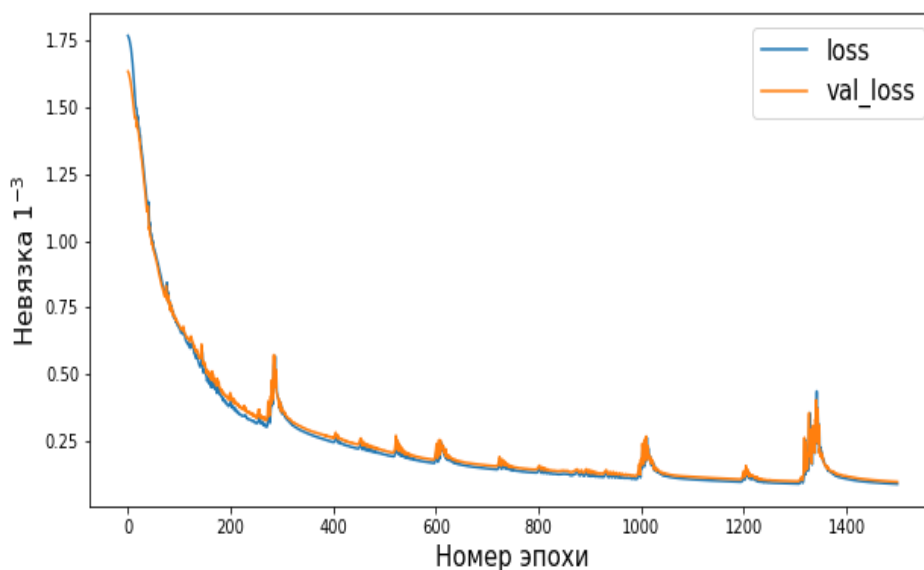


Рис. 6. Обучение НС: кривая обучения: синяя кривая – значение функционала невязки для обучающего набора данных; оранжевая кривая – значение функционала невязки для валидационной выборки

Тестирование нейронной сети. Для тестирования НС использовалось 283 предварительно смоделированных сейсмограмм. Для каждой из сейсмограмм был добавлен случайный Гауссов шум. Как видно на рис. 7, а, модель кратных отраженных волн, полученная с помощью высокоразрешающего преобразования Радона, не является идеальной. Однако с помощью НС удалось достигнуть разницы среднеквадратичных амплитуд равной 1.5 %.

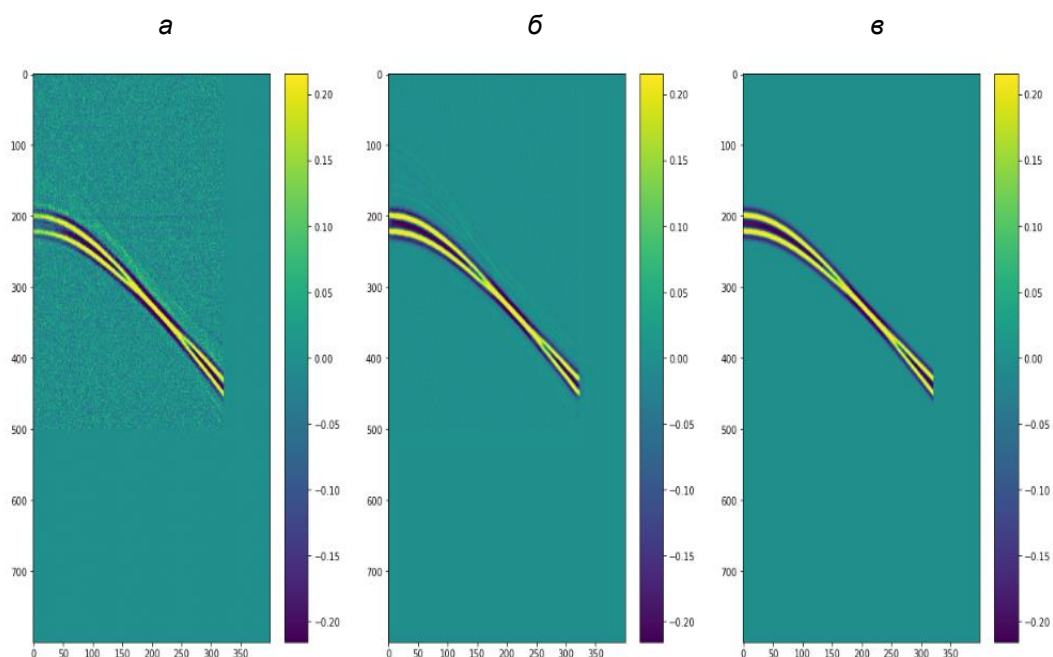


Рис.7. Тестирование работы НС: *а* – исходная модель кратных отраженных волн; *б* – адаптированная модель кратных отраженных волн; *в* – идеальная сейсмограмма кратных

Одна из главных проблем, возникающая при обучении НС, является проблема переобучения. Нужно проверить была ли НС обучена на адаптацию модели кратных или она научилась адаптировать только кратные волны, находящиеся в определенном месте. Что если бы кратные волны имели нормальные времена прихода – t_0 , удаленные друг от друга? Как видно на рис. 8, НС справляется и с подобной моделью кратных отраженных волн.

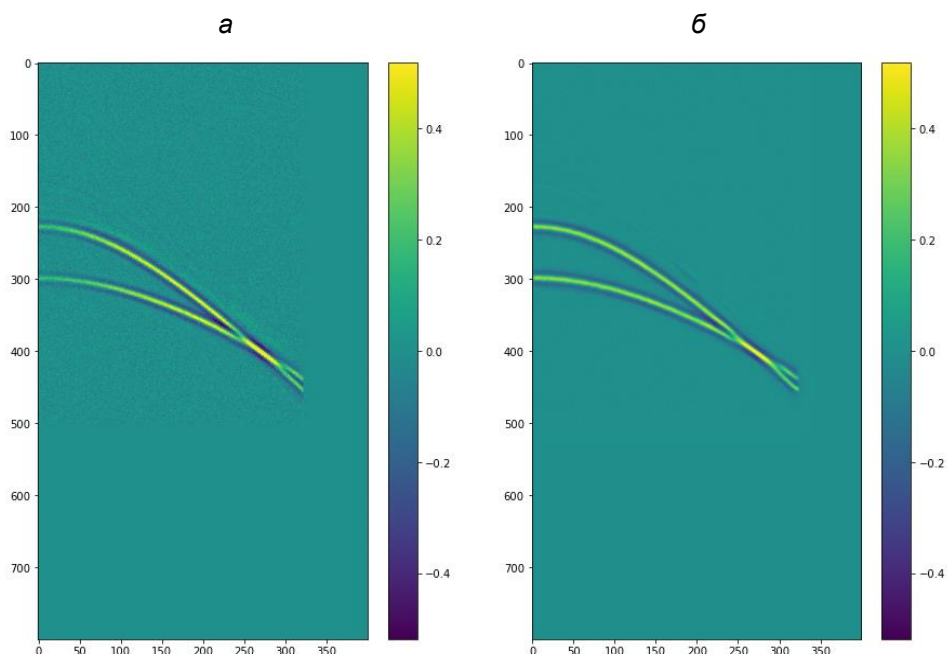


Рис. 8. Тестирование работы НС на новых данных: *а* – исходная модель кратных отраженных волн; *б* – адаптированная модель кратных отраженных волн

Рассмотрим случай присутствия целевого сигнала в модели кратных отраженных волн. Протестируем работу НС, подав на вход модель кратных отраженных волн, содержащую в себе остатки

целевого сигнала (рис. 9, а). Как мы видим на рис. 9, б НС пытается адаптировать артефакты целевого сигнала. Подобные результаты говорят о том, что НС была обучена именно на адаптацию сигнала, и не имеет значения присутствуют в записи какие-то конкретные кратные волны или целевой сигнал.

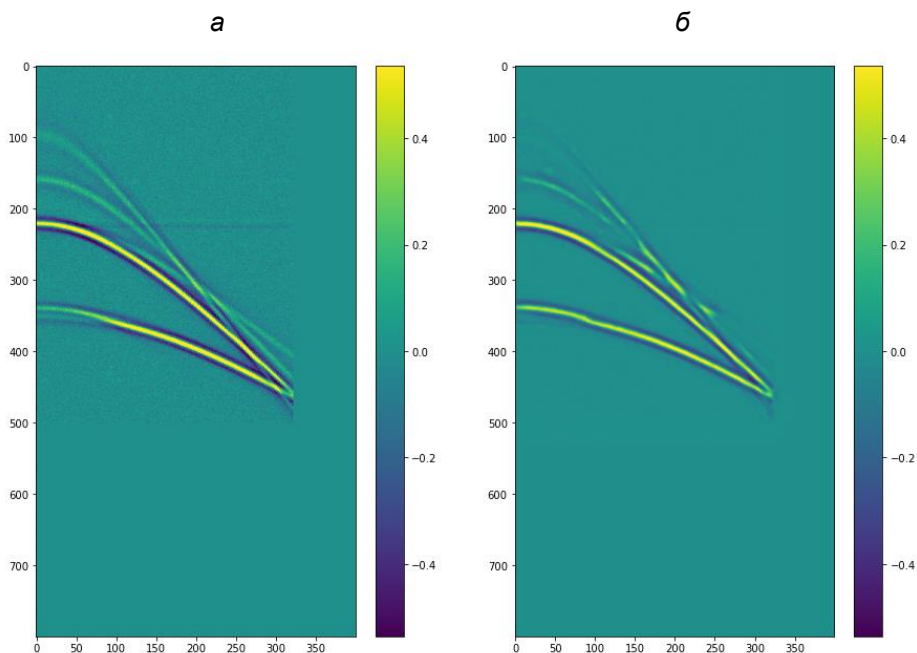


Рис. 9. Тестирование работы НС на некондиционных данных: а – исходная модель кратных отраженных волн; б – адаптированная модель кратных отраженных волн

Для наглядности работы НС давайте посмотрим на исходный и результирующий временные разрезы, изображенные на рис. 10. Как видно на этом рисунке с помощью НС удалось подавить ложные горизонты. При этом прослеживаются две проблемные зоны в районе 230 трассы на временах 1.7 и 2.8 с соответственно. Однако подобные проблемные зоны связаны с некорректностью модели кратных.

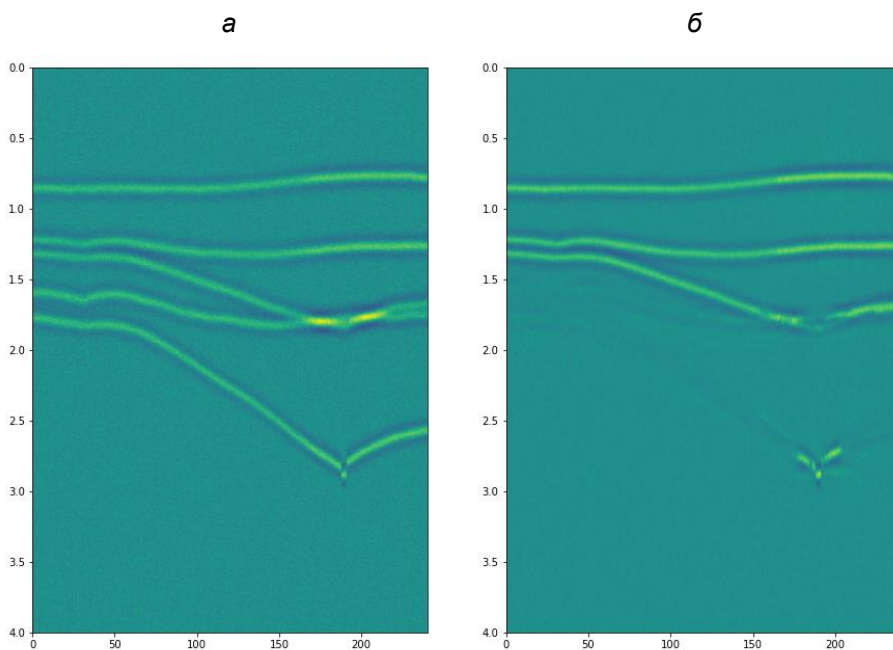


Рис. 10. Тестирование работы НС на общем наборе данных: а – исходный временной разрез; б – результирующий временной разрез

ВЫВОДЫ

Для решения задачи адаптивного вычитания была использована сверточная нейронная сеть. Разработанная структура СНС аналогична структуре U-Net. В качестве аналога остаточного шума после процедур предварительной обработки к сейсмической записи был добавлен случайный Гауссов шум. Также была использована процедура поворота данных путем умножения на матрицу поворота. Подобные процедуры позволили увеличить размер обучающей выборки, повысить гибкость работы СНС, а также уменьшить риск переобучения СНС.

Наличие остаточных целевых волн в модели кратных приводит к подавлению целевого сигнала, что говорит о чувствительности СНС к модели кратных. Также подобный результат говорит о том, что СНС не была обучена на подавление двух определенных кратных отраженных волн, и она пытается адаптировать ту модель кратных отраженных волн, которая была подана на вход.

Использование обученной СНС показало хороший результат для адаптивного вычитания кратных отраженных волн на синтетическом наборе данных. Подобный результат позволяет в дальнейшем перейти к работе с реальными полевыми данными.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка алгоритма адаптивного вычитания кратных отраженных волн осуществлялась при поддержке исследовательского проекта FSUS-2022-0019.

Тестирование работы алгоритма осуществлялось при поддержке исследовательского проекта FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 743 с
- Никитин В.В., Дучков А.А., Романенко А.А., Андерссон Ф.** Параллельный алгоритм разложения функций по волновым пакетам для GPU и его применение в геофизике // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2013. – № 11 (1). – С. 93–104.
- Chen W., Yang L., Wang H., Chen Y.** Fast high-resolution hyperbolic radon transform // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 60. – P. 1–10, doi: 10.1109/TGRS.2021.3084612.
- Hampson D.** Inverse velocity stacking for multiple elimination // Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists. – 1986. – P. 44–55.
- Loginov G., Duchkov A., Litvichenko D., Alyamkin S.** The first-break detection for real seismic data with use of convolutional neural network // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. – 2019. – Vol. 2019 (1). – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201901614.
- Neelamani R., Baumstein A., Ross W.S.** Adaptive subtraction using complex-valued curvelet transforms // Geophysics. – 2010. – Vol. 75 (4) – P. V51–V60, doi: 10.1190/1.3453425.
- Nikitin V.V., Anderson F., Carlsson M., Duchkov A.A.** Fast hyperbolic Radon transform represented as convolutions in log-polar coordinates // Computers & Geosciences. – 2017. – Vol. 105. – P. 21–33, doi: 10.1016/j.cageo.2017.04.013.
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T.** U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – Springer, Cham, 2015. – P. 234–241.

Verschuur D.J. Seismic multiple removal techniques: past, present and future. – EAGE Publications, Houten, 2013. – 300 p.

Yilmaz Ö. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. – SEG, 2001. – 2065 p., doi: 10.1190/1.9781560801580.

Zheng Y., He D.K., Hou J., Feng X. Surface wave suppressing and decomposition using deep neural networks // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. – 2022. – Vol. 2022 (1). – P. 1–5.

Zhu W., Mousavi S.M., Beroza G.C. Seismic signal denoising and decomposition using deep neural networks // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 57 (11). – P. 9476–9488, doi: 10.1109/TGRS.2019.2926772.

REFERENCES

Boganik G.N., Gurvich I.I. Seismic prospecting [in Russian]. – AIS, Tver, 2006. – 743 p.

Nikitin V.V., Duchkov A.A., Romanenko A.A., Andersson F. Parallel algorithm for the expansion of functions in wave packets for GPU and its application in geophysics // NSU Bulletin. Series: Information Technology. – 2013. – Vol. 11 (1) – P. 93–104.

Chen W., Yang L., Wang H., Chen Y. Fast high-resolution hyperbolic radon transform // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 60. – P. 1–10, doi: 10.1109/TGRS.2021.3084612.

Hampson D. Inverse velocity stacking for multiple elimination // Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists. – 1986. – P. 44–55.

Loginov G., Duchkov A., Litvichenko D., Alyamkin S. The first-break detection for real seismic data with use of convolutional neural network // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. – 2019. – Vol. 2019 (1). – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201901614.

Neelamani R., Baumstein A., Ross W.S. Adaptive subtraction using complex-valued curvelet transforms // Geophysics. – 2010. – Vol. 75 (4) – P. V51–V60, doi: 10.1190/1.3453425.

Nikitin V.V., Anderson F., Carlsson M., Duchkov A.A. Fast hyperbolic Radon transform represented as convolutions in log-polar coordinates // Computers & Geosciences. – 2017. – Vol. 105. – P. 21–33, doi: 10.1016/j.cageo.2017.04.013.

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – Springer, Cham, 2015. – P. 234–241.

Verschuur D.J. Seismic multiple removal techniques: past, present and future. – EAGE Publications, Houten, 2013. – 300 p.

Yilmaz Ö. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. – SEG, 2001. – 2065 p., doi: 10.1190/1.9781560801580.

Zheng Y., He D.K., Hou J., Feng X. Surface wave suppressing and decomposition using deep neural networks // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. – 2022. – Vol. 2022 (1). – P. 1–5.

Zhu W., Mousavi S.M., Beroza G.C. Seismic signal denoising and decomposition using deep neural networks // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 57 (11). – P. 9476–9488, doi: 10.1109/TGRS.2019.2926772.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КАМАШЕВ Александр Максимович – сотрудник лаборатории динамических проблем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разложение сейсмических изображений по волновым пакетам, методы подавления кратных отраженных волн, методы решения прямой задачи сейсморазведки.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамических проблем сейсмоки, заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая миграция; регуляризация сейсмических данных с помощью Гауссовских волновых пакетов, микросейсмический мониторинг гидроразрыва.

*Статья поступила 30 января 2023,
принята к печати 28 марта 2023*