

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 2	Апрель–Июнь 2022
----------------	-------------------------------	-----	---------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Татаурова А.А., Стефанов Ю.П. Развитие необратимой деформации и полос локализованного сдвига при горизонтальном сжатии осадочного слоя.....	4
Никитенко М.Н. Преобразования сигналов импульсных электромагнитных зондирований в частотную область для быстрой инверсии.....	15
Глинских А.В., Нечаев О.В. Развитие физико-математических моделей потенциалов самопроизвольной поляризации для каротажа нефтегазовых скважин	30
Бухтияров Д.А., Глинских В.Н. Предварительные результаты мониторинга состояния глинистых грунтов при помощи установки импульсного электромагнитного зондирования	44
Рзабекова А., Абраменков С.С., Яковлев А.В., Кулаков И.Ю. Анализ спектральных особенностей микросейсмичности в районе фумарольных полей Мутновского вулкана.....	65
Канаков М.С., Лапковский В.В., Конторович В.А., Канакова К.И., Шорохов Ю.С. Программный комплекс интерпретации сейсмических и скважинных данных W-SEIS	77
Федорович М.О., Ивашиненко С.С., Космачева А.Ю. Сейсмогеологическая модель мезозойско–кайнозойского осадочного чехла западной части Вилуйской гемисинеклизы (на примере Среднетунгуского месторождения)	92
Петrochenko Т.А., Задоев А.Ю., Дучков А.А., Митрофанов Г.М. Тестирование алгоритмов обработки сейсмических данных на результатах лабораторного моделирования	107
Леопольд Я.К., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Математическое моделирование импульсных характеристик вязкой намагниченности	118
Москаев И.А. Учет наклонной электрической анизотропии при численном моделировании и интерпретации данных скважинной электрометрии (аналитический обзор по материалам отечественной и зарубежной литературы)	129

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2022

ISSN 2619-1563 (Online)

Founded in 2004	Quarterly	No 2	April–June 2022
-----------------	-----------	------	--------------------

CONTENTS

Tataurova A.A., Stefanov Yu.P. Development of irreversible deformation and localized shear bands under horizontal compression of the sedimentary layer	4
Nikitenko M.N. TEM signal transformations to frequency domain for fast data inversion	15
Glinskikh A.V., Nechaev O.V. Development of physical and mathematical models of spontaneous polarization potentials for oil and gas well logging	30
Bukhtiyarov D.A., Glinskikh V.N. Preliminary results of clay soils state monitoring using transient electromagnetic sounding apparatus.....	44
Rzabekova A., Abramnikov S.S., Jakovlev A.V., Koulakov I.Yu. Microseismicity spectral features analysis of the Mutnovsky Volcano fumarole fields area	65
Kanakov M.S., Lapkovsky V.V., Kontorovich V.A., Kanakova K.I., Shorohov Yu.S. W-SEIS interpretation software for seismic and well drilling data	77
Fedorovich M.O., Ivashinenko S.S., Kosmacheva A.Yu. Seismogeological model of the Mesozoic–Cainozoic sedimentary cover of the western part of the Vilyui hemisyncline (by the example of the Srednetyungskoye field)	92
Petrochenko T.A., Zadoev A.Yu., Duchkov A.A., Mitrofanov G.M. Testing processing algorithms for seismic data from laboratory modeling	107
Leopold Ya.K., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Mathematical modeling of impulse response of viscous remanent magnetization	118
Moskaev I.A. Accounting for tilted electrical anisotropy in numerical simulation and interpretation of resistivity logging data (analytical review based on national and foreign literature).....	129



РАЗВИТИЕ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЖАТИИ ОСАДОЧНОГО СЛОЯ

А.А. Татаурова¹, Ю.П. Стефанов^{1,2}

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

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск, просп. Академический, 2/4, Россия,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

В рамках упругопластической модели рассмотрено развитие необратимой деформации при горизонтальном сжатии осадочного слоя, лежащего на жестком основании. Изучено влияние прочностных параметров среды и трения в основании на конфигурацию зон пластичности и локализацию деформации. Выполнены аналитические оценки глубин, на которых развивается необратимая деформация, а также их изменения в результате роста горизонтальных напряжений. С помощью численного моделирования показаны особенности зарождения и развития полос локализованного сдвига. Построены схемы, иллюстрирующие характер развития полос локализации в зависимости от свойств среды.

Пластическая деформация, локализация деформации, разлом, надвиговые структуры, трение, внутреннее трение, сдвиговая прочность, осадочный слой

DEVELOPMENT OF IRREVERSIBLE DEFORMATION AND LOCALIZED SHEAR BANDS UNDER HORIZONTAL COMPRESSION OF THE SEDIMENTARY LAYER

A.A. Tataurova¹, Yu.P. Stefanov^{1,2}

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

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Akademichesk Ave., 2/4, Tomsk, 634055, Russia,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

Within the framework of the elastoplastic model, the development of irreversible deformation during horizontal compression of a sedimentary layer lying on a rigid foundation is considered. The influence of strength parameters of the medium and friction in the base on the configuration of plasticity zones and localization of deformation has been studied. Analytical estimates are made of the depths at which irreversible deformation develops, as well as their changes as a result of an increase in horizontal stresses. With the help of numerical simulation, the features of the origin and development of localized shear bands are shown. Schemes are constructed illustrating the nature of the development of localization bands depending on the properties of the medium.

Plastic deformation, deformation localization, fault, thrust structures, friction, internal friction, shear strength, sedimentary layer

ВВЕДЕНИЕ

Развитие псевдопластической деформации, формирование зон локализации и разломов представляет огромный интерес в изучении деформационных структур земной коры. Данные процессы определяются условиями деформирования и множеством факторов, выяснение роли которых

необходимо для понимания протекающих процессов, объяснения наблюдаемых явлений, формулировке и уточнения гипотез. Процессы, протекающие в условиях горизонтального сжатия, широко распространены в земной коре и наблюдаются на различных масштабах, от локального до регионального. В качестве примеров таких зон можно указать предгорные области [Парфенов, Кузьмин, 2001; Яковлев, 2012; Малышев и др., 2018; Ребецкий, 2020].

Важным обстоятельством является то, что нередко наблюдается неравномерность горизонтального сжатия по глубине. Это приводит к разрыву смещений и формированию детачмента. При деформировании осадочного чехла, лежащего на жестком фундаменте, имеет место существенное различие их механических свойств и, соответственно, значительное различие деформации.

В настоящее время численное геомеханическое моделирование стало одним из важнейших инструментов изучения процессов деформации, расчета напряженно-деформированного состояния литосферы на разных пространственных и временных масштабах [Schmalholz, Podladchikov, 2001; Stockmal et al., 2007; Ruh, Kaus, 2012; Полянский и др., 2014; Wu et al., 2015]. Во многих случаях расчеты проводятся в рамках упруго-вязкой постановки, которая позволяет рассматривать процессы длительной эволюции и при этом является относительно простой с точки зрения численных расчетов. В настоящее время все больше используют варианты упругопластических моделей [Chemenda et al., 2015; Стефанов, Бакеев, 2015], в том числе с учетом вязкости, поврежденности и других характеристик.

В данной работе в рамках упругопластической модели рассмотрим задачу о сжатии клиновидного осадочного слоя, который залегает на жестком основании. Такую геометрию широко используют для описания процессов деформации в пределах предгорных областей [Davis et al., 1983; Dahlen, 1990]. В работах [Стефанов, Татаурова, 2018; Tataurova et al., 2019] на основе результатов численного моделирования показан ряд особенностей зарождения и развития полос локализованной деформации в условиях горизонтального сжатия клиновидного осадочного слоя. В частности, было показано, что протяженное продвижение области развития необратимой деформации возможно лишь при низком трении в основании, а также при его снижении в ходе развития деформации.

Для описания процесса деформации будет использован вариант упругопластической модели среды, которая позволяет описывать развития необратимой деформации с учетом формирования полос локализованного сдвига. Основная цель работы заключается в исследовании роли упругих и прочностных параметров геологической среды на развитие необратимой деформации и образование полос локализованного сдвига, а также влияние трения в основании осадочной толщи на развитие процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим процесс деформации однородного осадочного слоя в условиях горизонтального сжатия для модели усеченного клина, который лежит на жестком основании (рис. 1). Верхняя граница клина горизонтальна и свободна от напряжений. Деформирование слоя осуществляется в результате горизонтального смещения левой границы, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема нагружения осадочного слоя среды

Предполагалось, что при смещении среды по жесткому фундаменту действует базальное трение, описываемое при помощи закона Амонтона–Кулона

$$|\sigma_\tau| \leq -\mu_b \sigma_n,$$

где σ_τ , σ_n – касательная и нормальная компонента напряжений, μ_b – коэффициент трения. При $|\sigma_\tau| < -\mu_b \sigma_n$ имеет место полное сцепление: $u_\tau = 0$. При $|\sigma_\tau| = -\mu_b \sigma_n$ возможно смещение вдоль основания. Изменение коэффициента трения в ходе развития необратимой деформации опишем при помощи соотношения, предложенного в работах [Стефанов, Татаурова, 2018; Tataurova et al., 2019]:

$$\mu_b(\gamma^p) = \mu_0 \left(1 - \frac{\gamma^p - \gamma^1}{\gamma^f} \right)$$

для $\gamma^1 \leq \gamma^p \leq \gamma^f$, где γ^p , γ^1 и γ^f – соответственно интенсивность сдвиговой пластической деформации, величина деформации начала и завершения снижения трения вследствие дробления породы, μ_0 – начальное трение. Данное выражение достаточно близко к уравнению, предложенному в [Andrews, 1976], с той разницей, что вместо смещения используется величина необратимой сдвиговой деформации.

При заданных размерах расчетной области напряжения, вызванные действием силы тяжести, в значительной мере определяют эффективную прочность среды и оказывают огромное влияние на развитие деформации. Поэтому рассмотрение процесса деформации необходимо осуществлять в два этапа. На первом этапе рассчитывается начальное напряженно-деформированное состояние, обусловленное гравитацией при отсутствии горизонтальных смещений на боковых границах расчетной области. Заметим, что уже на этом этапе нагружения возможно развитие необратимой деформации в нижней части слоя.

На втором этапе осуществляется моделирование процесса деформации под действием смещения левой боковой границы слоя. При этом на правой границе слоя сохраним горизонтальные напряжения, которые были рассчитаны на первом этапе: $\sigma_{ij}(x_2, z, t) = \sigma_{ij}(x_2, y, z, t = 0)$. Указанные условия не препятствуют деформации на правой границе слоя в ходе развития процесса и имитируют его продолжение.

Моделирование процесса деформации среды в интересующих нас условиях будем осуществлять при помощи численного решения системы уравнений механики, включающей уравнения движения и неразрывности:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,i} = 0,$$

где ρ – плотность материала; $u_{i,j}$ – компоненты вектора скорости; σ_{ij} – компоненты тензора напряжения Коши; F_i – массовые силы, в нашем случае – ускорение свободного падения g .

Описание процесса деформации и разрушения горных пород осуществляется в рамках упругопластической модели. Под пластической деформацией в данной работе будет подразумеваться необратимая деформация независимо от ее природы. Предполагается, что скорости деформации состоят из упругой d_{ij}^e и пластической d_{ij}^p частей. Соответственно, напряжения определяются из уравнения

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\theta - \theta^p)\delta_{ij} + 2\mu(d_{ij} - d_{ij}^p),$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши, $\theta = d_{ii}$, δ_{ij} – символ Кронекера.

Приращение неупругой или пластической части тензора деформации, которое рассчитывается при достижении напряжениями предельной поверхности, определяется уравнением:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \frac{t}{t^{rel}},$$

где $G(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$ – пластический потенциал; $d\lambda$ определяется в ходе деформирования из условия пластичности, t^{rel} – параметр. Применение такого соотношения в модели соответствует вязкопластическому элементу Бинагама и решает проблему регуляризации [Prevost, Loret, 1990]. Это нивелирует влияние пространственного шага расчетной сетки и обеспечивает сходимость решений на закритической стадии, когда возникает локализация деформации.

Уравнения предельной поверхности и пластического потенциала [Друккер, Прагер, 1975; Николаевский, 1971] запишем в виде:

$$f = \tau - \alpha\sigma - Y, \quad G = \tau - \beta\sigma,$$

где $\sigma = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – первый инвариант тензора напряжений; $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений, β – коэффициент дилатансии, α и Y – коэффициенты, которые могут быть выражены через углы внутреннего трения и дилатансии φ, ϕ и когезию C модели Кулона-Мора, хотя данные параметры моделей не являются полными аналогами.

Начальная предельная поверхность соответствует пределу упругости и описывает лишь начало процесса, дает первые оценки зарождения пластической деформации. Изменения предельной поверхности в ходе развития необратимой деформации на стадиях упрочнения и разупрочнения задается с помощью уравнения [Стефанов, 2002]

$$Y(\gamma^p) = Y_0[1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p))],$$

где h – коэффициент упрочнения, $d\gamma^p$ – интенсивность сдвиговой пластической деформации, $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$, $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$, γ^* – критическая деформация, после которой преобладает деградация материала.

Система уравнений, решалась при помощи явной конечно-разностной схемы [Wilkins, 1999]. Основные детали использованного подхода описаны в работах [Стефанов, Бакеев, 2015].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Аналитические оценки

На разных этапах деформирования образуется свое характерное напряженное состояние, которое задает распределение прочности в среде. Поскольку данные характеристики взаимосвязаны, их распределение определяет общее строение и геометрию деформированной области. Поэтому анализ распределения этих областей дает важную информацию о развитии процесса.

Итогом первого этапа нагружения среды являются напряжения, возникающие вследствие действия силы тяжести. На рисунке 2 показаны графики изменения эффективной прочности $\tau^* = Y + \alpha\sigma$ и

интенсивности касательных напряжений с глубиной в условиях действия гравитационной нагрузки при отсутствии горизонтальных смещений среды для упругого состояния среды, а также их изменения с ростом горизонтальных напряжений на 45 и 90 МПа при коэффициенте Пуассона $\nu = 0.25$ и плотности $\rho = 2.2$. Там, где интенсивность касательных напряжений превышает величину эффективной прочности, состояние среды находится за пределом упругости. Данные области выделены цветом. Точка пересечения графиков соответствует глубине перехода в неупругое состояние. На графиках видно, что в рассматриваемых условиях, начиная с некоторой глубины, определяемой параметрами внутреннего трения α и когезии Y , возможен переход среды в неупругое состояние. В упругопластическом состоянии напряжения значения прочности будут меняться по другому закону и должны рассчитываться с учетом необратимой деформации. Величина необратимой деформации на первом этапе нагружения остается достаточно малой, чтобы не принимать ее во внимание при дальнейшем анализе.

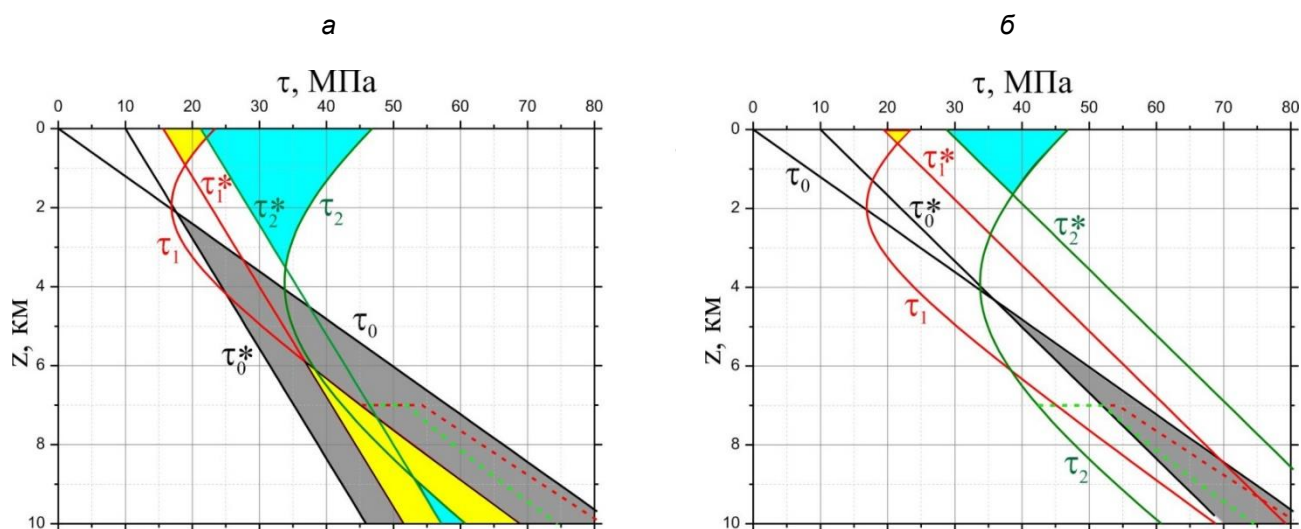


Рис. 2. Распределения прочности τ^* и интенсивности касательных напряжений τ с глубиной после первого этапа нагружения индекс (0), при дополнительном горизонтальном сжатии $\Delta\sigma = 45$ МПа – (1) и $\Delta\sigma = 90$ МПа – (2): а – $\alpha = 0.3$, б – $\alpha = 0.5$. Пунктиром показаны графики с учетом возможного влияния трения. Цветом выделены области неупругого состояния

Заметим, что данные оценки приведены для «сухой» среды, без учета порового давления. При использовании эффективных напряжений Терцаги необходимы данные о распределении порового давления σ^{por} . Для проницаемой среды их можно определить как вес столба жидкости.

Для оценки влияния сжатия по горизонтали на втором этапе нагружения допустим, что область исследования прямоугольная и трение в основании отсутствует. Тогда горизонтальное сжатие будет равномерным по всей глубине. Одинаковое приращение горизонтальной компоненты напряжений по всей глубине приводит к пропорциональному увеличению сдвиговой прочности за счет увеличения давления и изменению распределения интенсивности касательных напряжений с глубиной. На данных рис. 2 хорошо видно, что увеличение горизонтальной компоненты напряжений приводит к быстрому росту интенсивности касательных напряжений в верхней части среды, при значительно меньшем увеличении давления. В то же время в нижних слоях на первых этапах горизонтального сжатия, пока горизонтальные напряжения меньше вертикальных, происходит обратный процесс, интенсивность касательных напряжений снижается при росте средних напряжений или давления среды. Это приводит к тому, что на этом этапе нагружения

интенсивное развитие псевдопластической деформации происходит в верхней части среды с поверхности, в то время как развитие необратимой деформации на глубине тормозится. Лишь после того, как горизонтальные напряжения становятся больше вертикальных, увеличение интенсивности касательных напряжений по всей глубине происходит равномерно. Заметим, что данные оценки проведены без учета трения в основании слоя и они справедливы лишь для начальных этапов зарождения и развития необратимой деформации.

На основе полученных оценок распределения зон пластичности с глубиной можно построить общую схему развития областей необратимой деформации в клиновидном слое и выделить участки возможного зарождения полос локализованного сдвига (рис. 3). На рисунке выделен ряд зон: **S**, **G** – области необратимой деформации, вызванные горизонтальным и вертикальным сжатием, соответственно, под действием гравитации, **F** – обусловлена условиями трения на поверхности детачмента и сжатием, **T** – зона интенсивного разрушения и образования детачмента, **SB1** – полосы локализованного сдвига формирующиеся на поверхности, **SB2** – полосы формирующиеся на основании и в вершине детачмента. Представленная схема согласуется с оценками, полученными в работе [Gerbault et al., 1998]. Очевидно, что формирование полос и характер их развития будет зависеть от конкретных параметров среды. Такими параметрами являются внутреннее трение и трение в основании. Исследование их влияния может быть выполнено лишь с помощью численного моделирования.

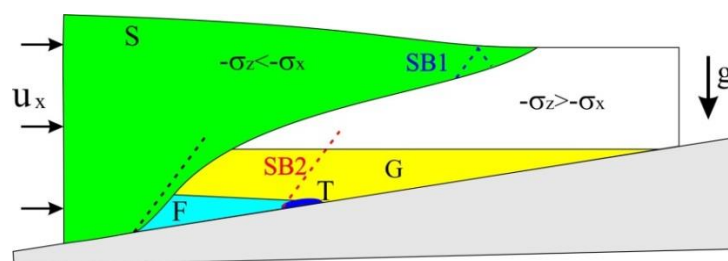


Рис 3. Схема развития процесса необратимой деформации при латеральном сжатии деформируемого слоя

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Размеры исследуемой области составляли 10.5 км по вертикали и 150 км по горизонтали. Наклон основания составлял 1.5°. Расчеты проводились на адаптированной сетке 750 x 52 ячеек. Параметры модели, описывающие поведение среды, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели, описывающие поведение среды

ρ , г/см ³	K , ГПа	μ , ГПа	γ_0 , МПа	α	β	γ^* , %	h	γ_0 , %	μ_b
2.37	0.208	0.117	5–20	0.1–0.6	0.1 α	0.01	0.5	0.5	0.1–0.5

Численное моделирование позволило выявить ряд характерных картин развития деформации и формирования полос локализованного сдвига, которые определялись прочностными параметрами среды и трением в основании слоя. Отметим факторы, определяющие зарождение, характер распространения и форму полос локализации деформации в среде с учетом и без учета порового давления с помощью эффективных напряжений Терцаги.

Различие формы области необратимой деформации на начальном этапе деформирования в сухой и насыщенной средах возникает за счет разной скорости роста прочности с глубиной, по сути – разным значениям коэффициента внутреннего трения. Под действием горизонтального сжатия в сухой среде с высоким внутренним трением формируется зона пластичности, которая в верхней части слоя более протяженная чем в нижней. В этом случае полосы малой интенсивности в среде могут зарождаться на поверхности во фронте необратимой деформации, они могут иметь разную направленность и обычно не достигают основания. В насыщенной среде, а также при низком значении коэффициента внутреннего трения, пластическая зона выглядит наоборот: нижняя часть находится в пластическом состоянии. Данный эффект соответствует оценкам на рис. 2, 3.

На рисунке 4 показаны результаты численного моделирования, иллюстрирующие характерные конфигурации полос локализованного сдвига, которые формируются в средах с разным внутренним трением. Зарождение полос чаще происходит в местах искажения геометрии и в области резкого изменения трения в основании. Наибольшее изменение геометрии, как правило, связано с выходом на поверхность полосы локализации. Это приводит к эстафетному характеру формирования и распространения новых полос сдвига. Изменение трения, согласно предложенной модели, также связано с необратимой деформацией и обеспечивает периодический характер формирования полос локализации. Заметим, что в рамках принятой модели формирования детачмента в основании вследствие снижения трения при развитии необратимой деформации, первоначальный коэффициент трения практически перестает играть значение. Скольжение происходит лишь в зоне, где коэффициент трения стал ниже 0.1, в то время как в недеформированной области при коэффициенте трения более 0.2 скольжение быстро затухает.

На основе результатов моделирования построены две основные схемы формирования и развития полос локализованного сдвига в однородной среде (рис. 5). Первый случай (рис. 5, а) наиболее четко соответствует эстафетному характеру продвижения полос локализации, они образуются в местах искажения геометрии. В основании это может быть зона перехода скольжения с низким трением и зоны высокого трением или место «отражения» развивающейся полосы локализации. На поверхности обычно это место «отражения» полосы локализации, которая достигла поверхности, там образуется ступенька или участок искривления поверхности на границе утолщения среды в результате сжатия. Чаще всего, такая схема наблюдается при высоком внутреннем трении. Полосы локализации деформации имеют почти прямолинейный вид. Искривления возникают в местах разнонаправленных полос сдвига. Часто формируются призматические блоки, которые выдавливаются вверх. Смещения вдоль полос локализованного сдвига имеют большую амплитуду, а зона деформации обычно имеет не слишком большую протяженность вдоль слоя, часто не более 2–3 толщин слоя.

Вторая схема, показанная на рис. 5, б, реализуется в пластичной среде с низким внутренним трением ($\alpha < 0.2$) или в насыщенной среде, где снижение влияния внутреннего трения связано с поровым давлением. В этом случае полосы локализации обычно имеют листрическую форму. Нередко места зарождения полос достаточно близко расположены и в результате формируется веерообразная или чешуйчатая картина разломов. Причем изменение рельефа в зонах выхода полос локализации на поверхность также играет существенную роль. Поверхность приобретает ступенчатый вид, и на каждой ступеньке образуется новая полоса локализованного сдвига, которая распространяется вниз эстафетным образом. Причем сначала она достигает восходящей полосы – разлома и лишь на следующих этапах продвигается вниз, после чего продолжается эстафетное продолжение новой восходящей полосы.

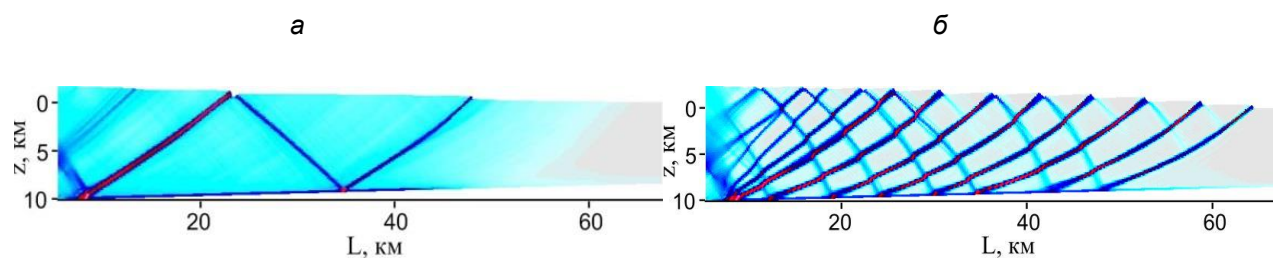


Рис. 4. Характерный вид образования полос локализованного сдвига: *а* – в сухой среде, $\alpha = 0.3$; *б* – в насыщенной среде, $\alpha \leq 0.2$

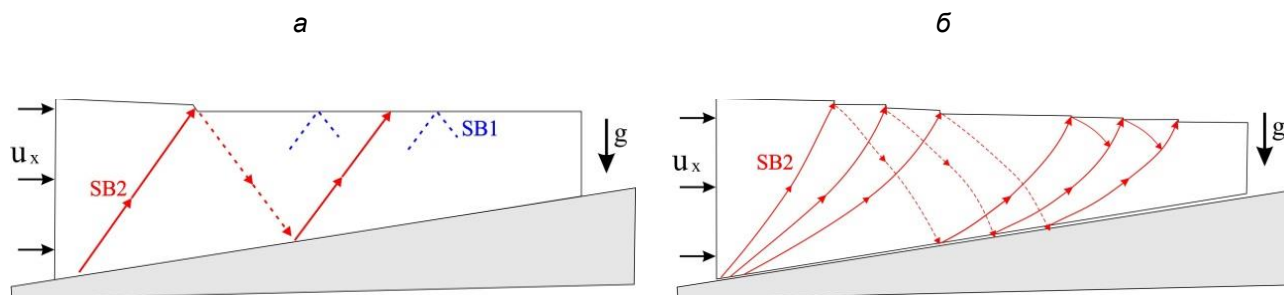


Рис. 5. Схема формирования полос локализованного сдвига: *а* – в среде с высоким коэффициентом внутреннего трения; *б* – в пластичной среде с низким внутренним трением и в насыщенной среде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании аналитических оценок и результатов численного моделирования построена схема формирования и развития необратимой деформации при горизонтальном сжатии осадочного слоя. Она включает клинообразную зону в верхней части, связанную с горизонтальным сжатием, зону в нижней части, связанную с силой тяжести, и клинообразную зону, связанную с трением в основании.

Полосы локализованного сдвига могут развиваться как от дневной поверхности, так и от подошвы осадочной толщи. Их зарождение определяется внутренним трением в среде и трением в основании. В среде с высоким внутренним трением полосы локализованного сдвига малой интенсивности зарождаются на дневной поверхности и не всегда достигают основания. В пластичной среде с низким внутренним трением и в насыщенной среде они развиваются от detachment к поверхности.

Выделено два типа конфигурации деформационных структур, в которых полосы локализованного сдвига имеют «листрическую» или «зигзагообразную» форму. Формирование и развития полос локализованного сдвига в зависимости от упругопластических свойств среды чаще всего происходит эстафетным образом, зарождаясь в местах искажения геометрии по одной из двух схем. В основании это может быть граница участка скольжения с низким трением и области с более высоким трением или место «отражения» развивающейся полосы локализации. Как правило, такая схема развивается в сухой среде, при высоких значениях коэффициента внутреннего трения, когда формируется одна или несколько почти прямолинейных полос локализации, которые пересекают весь слой от основания к поверхности.

Вторая схема, реализуется в пластичной среде с низким значением внутреннего трения или в насыщенной среде, где снижение влияния внутреннего трения может быть связано с поровым давлением или наличием вязких фракций. В этом случае полосы локализации обычно имеют листрическую форму.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

ЛИТЕРАТУРА

- Друккер Д., Прагер В.** Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – С. 166–177.
- Малышев С.В., Худолей А.К., Гласмахер У.А., Казакова Г.Г., Калинин М.А.** Определение этапов формирования юго-западной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита и циркона // Геотектоника. – 2018. – № 6. – С. 55–68, doi: 10.1134/S0016853X1806005X.
- Николаевский В.Н.** Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // Прикладная математика и механика. – 1971. – № 35 (6). – С. 1017–1029.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И.** Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. – 571 с.
- Полянский О.П., Коробейников С.Н., Бабичев А.В., Ревердатто В.В., Свердлова В.Г.** Численное моделирование мантийного диапиризма как причины внутриконтинентального рифтогенеза // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 124–137, doi: 10.7868/S0002333714060052.
- Ребецкий Ю.Л.** Поле глобальных коровых напряжений земли // Геотектоника. – 2020. – № 6. – С. 3–24, doi: 10.31857/S0016853X20060119.
- Стефанов Ю.П.** Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5 (5). – С. 107–118.
- Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А.** Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 81–93, doi: 10.7868/S0002333715040110.
- Стефанов Ю.П., Татаурова А.А.** Влияние трения и прочностных свойств среда на формирование зон локализации деформации в надвиговых структурах // Физическая мезомеханика. – 2018. – № 21 (5). – С. 46–55, doi: 10.24411/1683-805X-2018-15005.
- Яковлев Ф.Л.** Опыт построение сбалансированной структуры восточной части Альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 1 (19). – С. 191–214.
- Andrews D.J.** Rupture velocity for plane strain shear cracks // Journal of Geophysical Research. – 1976. – Vol. 81 (32). – P. 5679–5687, doi: 10.1029/JB081i032p05679.
- Chemenda A.I., Cavalié O., Vergnolle M., Bouissou S., Delouis B.** Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system // Comptes Rendus Geoscience. – 2015. – Vol. 348 (1). – P. 61–69, doi: 10.1016/j.crte.2015.09.008.
- Dahlen F.A.** Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedge // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 1990. – Vol. 18. – P. 55–99, doi: 10.1146/ANNUREV.EA.18.050190.000415.
- Davis D., Suppe J., Dahlen F.** Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges // Journal of Geophysical Research. – 1983. – Vol. 82. – P. 1153–1172, doi: 10.1029/JB088iB02p01153.
- Gerbault M., Poliakov A.N., Daignieres M.** Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: What are the limits? // Journal of Structural Geology – 1998. – Vol. 20 (2). – P. 301–320, doi: 10.1016/S0191-8141(97)00089-8.

- Prevost J.H., Loret B.** Dynamic strain localization in elasto-(visco) plastic solids, part 2. Plane strain examples // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1990. – Vol. 83. – P. 275–294, doi: 10.1016/0045-7825(90)90074-V.
- Ruh J.B., Kaus B.J.** Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belt: influence of rheology of single and multiple décollements // *Tectonics*. – 2012. – Vol. 31. – P. 1–23, doi: 10.1029/2011TC003047.
- Schmalholz S.M., Podladchikov Y.Y.** Viscoelastic Folding: Maxwell versus Kelvin Rheology // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – Vol. 28 (9) – P. 1835–1838, doi: 10.1029/2000GL012158.
- Stockmal G.S., Beaumont C., Nguyen M., Lee B.** Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts: Insights from numerical models // *GSA Special Paper*. – 2007. – Vol. 433. – P. 63–98, doi: 10.1130/2007.2433(04).
- Tataurova A., Stefanov Y., Suvorov V.** Effect of changing basal friction on the formation of thrust // *Trigger Effects in Geosystems*. – Springer, Cham, 2019. – P. 169–177, doi: 10.1007/978-3-030-31970-0_19.
- Wilkins M.L.** Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
- Wu G., Lavier L.L., Choi E.** Modes of continental extension in a crust wedge // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 421. – P. 89–97, doi: 10.1016/j.epsl.2015.04.005.

REFERENCES

- Andrews D.J.** Rupture velocity for plane strain shear cracks // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Vol. 81 (32). – P. 5679–5687, doi: 10.1029/JB081i032p05679.
- Chemenda A.I., Cavalié O., Vergnolle M., Bouissou S., Delouis B.** Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2015. – Vol. 348 (1). – P. 61–69, doi: 10.1016/j.crte.2015.09.008.
- Dahlen F.A.** Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedge // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1990. – Vol. 18. – P. 55–99, doi: 10.1146/ANNUREV.EA.18.050190.000415.
- Davis D., Suppe J., Dahlen F.** Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges // *Journal of Geophysical Research*. – 1983. – Vol. 82. – P. 1153–1172, doi: 10.1029/JB088iB02p01153.
- Drucker D.C., Prager W.** Soil mechanics and plastic analysis or limit design // *Quarterly of Applied Mathematics* – 1952 – Vol. 10 (2) – P. 157–165, doi: 10.1090/qam/48291.
- Gerbault M., Poliakov A.N., Daignieres M.** Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: What are the limits? // *Journal of Structural Geology* – 1998. – Vol. 20 (2). – P. 301–320, doi: 10.1016/S0191-8141(97)00089-8.
- Malyshev S.V., Khudoley A.K., Glasmacher U.A., Kazakova G.G., Kalinin M.A.** Constraining age of deformation stages in the south-western part of Verkhoyansk fold-and-thrust belt by apatite and zircon fission-track analysis // *Geotectonics*. – 2018. – Vol. 52 (6). – P. 634–646, doi: 10.1134/S0016852118060055.
- Nikolaevskii V.N.** Governing equations of plastic deformation of a granular medium // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1971. – Vol. 35 (6). – P. 1017–1029, doi: 10.1016/0021-8928(71)90106-7.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I.** Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). – MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, 2001. – 571 p.
- Polyansky O.P., Babichev A.V., Reverdatto V.V., Sverdlova V.G., Korobeynikov S.N.** Numerical modeling of mantle diapirism as a cause of intracontinental rifting // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50 (6). – P. 839–852, doi: 10.1134/S1069351314060056.

- Prevost J.H., Loret B.** Dynamic strain localization in elasto-(visco) plastic solids, part 2. Plane strain examples // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1990. – Vol. 83. – P. 275–294, doi: 10.1016/0045-7825(90)90074-V.
- Rebetsky Yu. L.** Pattern of Global Crustal Stresses of the Earth // Geotectonics. – 2020. – Vol. 54 (6). – P. 723–740, doi: 10.1134/S0016852120060114.
- Ruh J.B., Kaus B.J.** Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belt: influence of rheology of single and multiple decollements // Tectonics. – 2012. – Vol. 31. – P. 1–23, doi: 10.1029/2011TC003047.
- Schmalholz S.M., Podladchikov Y.Y.** Viscoelastic Folding: Maxwell versus Kelvin Rheology // Geophysical Research Letters. – 2001. – Vol. 28 (9) – P. 1835–1838, doi: 10.1029/2000GL012158.
- Stefanov, Yu. P.** Deformation localization and fracture of geomaterials: Numerical simulation // Physical Mesomechanics. – 2002. – Vol. 5. – P. 103–114.
- Stefanov Y.P., Tataurova A.A.** Effect of friction and strength properties of the medium on shear band formation in thrust structures // Physical Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22 (6) – P. 463–472, doi: 10.1134/S1029959919060031.
- Stefanov Y.P., Bakeev R.A.** Formation of flower structure in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2015. – Vol. 4. – P. 535–547, doi: 10.1134/S1069351315040114.
- Stockmal G.S., Beaumont C., Nguyen M., Lee B.** Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts: Insights from numerical models // GSA Special Paper. – 2007. – Vol. 433. – P. 63–98, doi: 10.1130/2007.2433(04).
- Tataurova A., Stefanov Y., Suvorov V.** Effect of changing basal friction on the formation of thrust // Trigger Effects in Geosystems. – Springer, Cham, 2019. – P. 169–177, doi: 10.1007/978-3-030-31970-0_19.
- Wilkins M.L.** Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
- Wu G., Lavier L.L., Choi E.** Modes of continental extension in a crust wedge // Earth and Planetary Science Letters. – 2015. – Vol. 421. – P. 89–97, doi: 10.1016/j.epsl.2015.04.005.
- Yakovlev F.L.** Reconstruction of the balanced structure of the eastern part of Alpine Greater Caucasus using data from quantitative analysis of linear folding – case study // Bulletin KRAUNTS. Earth Sciences. – 2012. – Vol. 1 (19). – P. 191–214.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ТАТАУРОВА Антонина Андреевна – научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геомеханическое моделирование, напряженно-деформированное состояние геосреды.

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – д.ф.-м.н., профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследования в области геомеханики; разработка моделей, описывающих поведение горных пород за пределом упругости, включая процессы необратимой деформации и формирования зон локализации, численного исследования деформационных процессов в земной коре.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.,
принята к публикации 14 ноября 2022 г.



ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ ДЛЯ БЫСТРОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ

М.Н. Никитенко

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

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

e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

В работе представлен новый метод инверсии данных метода переходных процессов (МПП) путем преобразования измеренных сигналов в частотную область. Инверсия предполагает поиск таких параметров модели геологической среды, чтобы синтетические данные соответствовали экспериментальным. При этом используется оптимизационный метод, на каждой итерации которого с помощью численного моделирования определяются синтетические данные в соответствии с изменяемыми модельными параметрами. Численное моделирование для МПП является затратной процедурой, поскольку сигнал во временной области обычно вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье частотного сигнала, и по сравнению с частотным сигналом время вычисления временного сигнала возрастает в сотни раз. Предлагается трансформировать измеренные сигналы в частотную область и в ней выполнять инверсию, что существенно сокращает временные затраты. Трансформация в частотную область с помощью преобразования Фурье включает извлечение из сигнала первичного поля, вычисленного по специальному алгоритму, что позволяет использовать для преобразования относительно небольшой, реально используемый в МПП временной интервал вместо бесконечного.

Метод переходных процессов, измерения во временной и частотной области, трансформация сигналов, первичное поле, быстрая инверсия

TEM SIGNAL TRANSFORMATIONS TO FREQUENCY DOMAIN FOR FAST DATA INVERSION

M.N. Nikitenko

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

e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

The paper presents a new data inversion technique for the transient electromagnetic method (TEM) by converting the measured signals into the frequency domain. The inversion involves a search for such earth model parameters that there is a consistency between the synthetic and field data. We use an optimization method, where through numerical simulation at each iteration the synthetic data are determined in accordance with the changing model parameters. Numerical simulation of TEM signals is a computationally expensive procedure, since the time-domain signal is usually calculated via the inverse Fourier transform of the frequency signal. Consequently, compared to the frequency signal, the time needed to calculate the time signal increases hundreds of times. It is proposed to transform the measured signals into the frequency domain and perform inversion therein, which significantly reduces the time expenditures. Transition into the frequency domain by the Fourier transform includes the extraction of the primary field from the signal, calculated by means of a special algorithm. This fact makes it possible to employ for the transformation a relatively small time interval actually used in TEM instead of an infinite one.

Transient electromagnetic method, time- and frequency-domain measurements, signal transformation, primary field, fast inversion

ВВЕДЕНИЕ

Метод переходных процессов (МПП) имеет большие перспективы во многих задачах как промышленной, так и экологической геофизики. Среди них: геонавигация [Tabarovsky et al., 1996; Seydoux et al., 2003; Besspalov et al., 2006; Dutta et al., 2012; Itskovich, Nikitenko, 2017; Itskovich, 2018; Itskovich et al., 2018; Никитенко и др., 2021а; Никитенко, Мосин, 2022], дефектоскопия обсадных колонн скважин [Сидоров, 1996; Эпов и др., 2002], картирование баженовской свиты [Никитенко и др., 2021б; Эпов и др., 2021, 2022], мониторинг резервуаров [Dutta et al., 2012], мониторинг состояния криолитозоны [Glinskikh et al., 2021] и другие. Для количественного определения электрофизических параметров исследуемой среды зарегистрированные данные инвертируются. Традиционно инверсия заключается в подборе модельных параметров так, чтобы синтетические данные соответствовали экспериментальным. Модельные параметры меняются по какому-либо правилу в зависимости от выбранного метода оптимизации, при этом на каждой итерации с помощью численного моделирования определяются синтетические данные (сигналы). Численное моделирование для МПП является затратной процедурой, поскольку сигнал во временной области обычно вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье частотного сигнала [Ваньян, 1965], что позволяет получить высокоточный результат в широком временном диапазоне. Таким образом, по сравнению с частотным сигналом, время вычисления временного сигнала возрастает в сотни раз. Задача состоит в сокращении временных затрат при моделировании данных, чтобы инверсия производилась в реальном времени, что особенно актуально для каротажа в процессе бурения. Один из путей решения данной проблемы заключается в трансформации измеренных сигналов в частотную область [Nikitenko, 2017]. В частотной области и будет выполняться инверсия; таким образом, время инверсии сократится в сотни раз.

Трансформация в частотную область с помощью преобразования Фурье включает извлечение из сигнала первичного поля (поля в однородной среде). Это позволяет использовать для преобразования Фурье относительно небольшой, реально используемый в МПП временной интервал вместо бесконечного. Эта составляющая алгоритма особенно важна, так как запись сигнала во времени производится на ограниченном временном интервале, исключая ранние времена, где велико влияние формы импульса тока, а также поздние времена, где сигнал ниже установленного значения.

После трансформации экспериментальных данных к ним должен быть применен алгоритм инверсии, разработанный и используемый для измерений в частотной области, с целью восстановления параметров геоэлектрической модели.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СИГНАЛА В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ

Источниками электромагнитного поля являются катушки с током, применяемые в каротаже скважин. В приемных катушках измеряется э.д.с. в зависимости от времени.

Для трансформации э.д.с. в частотную область используется следующая формула:

$$\vec{H}^*(f) = -\frac{1}{\mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \frac{d\vec{B}(t)}{dt} e^{i2\pi ft} dt. \quad (1)$$

Здесь $\frac{d\vec{B}(t)}{dt}$ – э.д.с., измеренная после выключения постоянного тока в генераторной катушке; $[t_1, t_n]$ – временной интервал измерений, причем время отсчитывается от момента выключения; $\vec{H}^*(f)$ – магнитное поле, зависящее от частоты f (Гц); μ_0 – магнитная проницаемость.

В случае произвольного импульса тока, уравнение (1) записывается в следующем виде:

$$\vec{H}^*(f) = -\frac{1}{i(f)} \cdot \frac{1}{i2\pi f \mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \frac{d\vec{B}(t)}{dt} e^{i2\pi f t} dt. \quad (2)$$

Здесь $\frac{d\vec{B}(t)}{dt}$ – э.д.с. от произвольного импульса $I(t)$, $i^*(f)$ – спектр (или преобразование Фурье) токового импульса.

Сложность состоит в том, чтобы получить точное значение преобразований (1) или (2) на конечном интервале от t_1 до t_n , в то время как отрезок интегрирования при преобразовании Фурье – от нуля до бесконечности. Поведение подынтегрального выражения на отрезке $[0, t_1]$ неизвестно, за исключением того, что на нулевом времени подынтегральное выражение равно нулю. Вопрос преобразования сигнала будет рассмотрен на конкретном примере для реального трехкатушечного зонда.

Регистрируемый сигнал – это разность сигналов в двух измерительных катушках:

$$\vec{G}(t) = \frac{d\vec{B}_1(t)}{dt} - \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{d\vec{B}_2(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $\frac{d\vec{B}_1(t)}{dt}$, $\frac{d\vec{B}_2(t)}{dt}$ – э.д.с. в двухкатушечных зондах с длинами (расстояниями между источниками и приемниками) L_1 и L_2 ; M_1 и M_2 – моменты зондов, обратные к величине магнитного поля в воздухе.

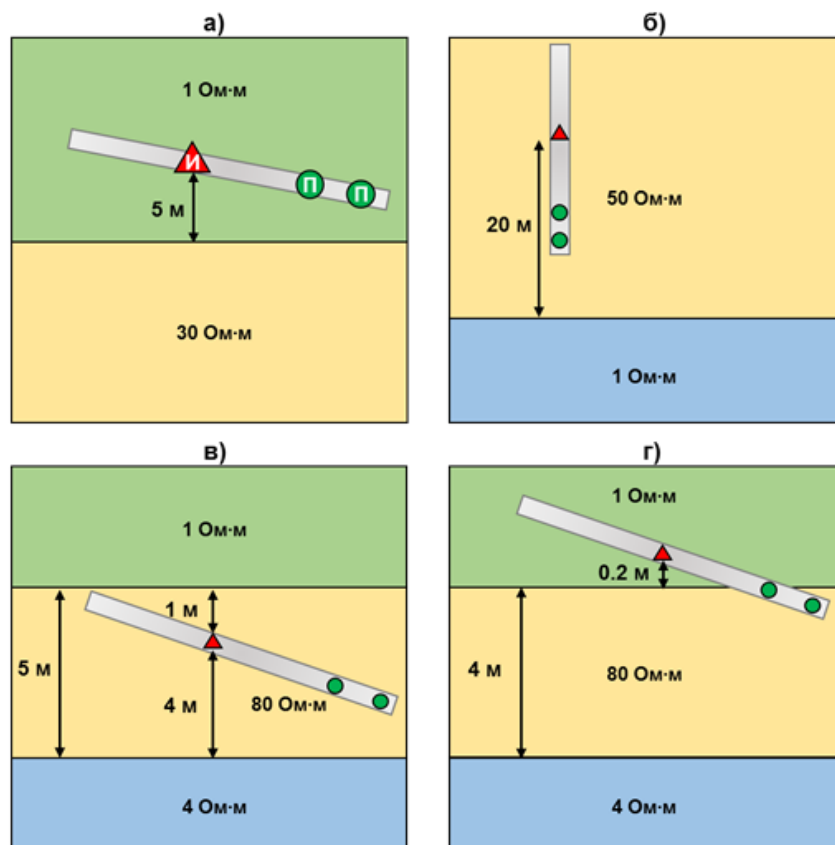


Рис. 1. Модель среды А (а): зонд находится в глинистом пласте с УЭС 1 Ом·м на расстоянии 5 м от границы с нефтенасыщенным песчаником с УЭС 30 Ом·м, $\theta = 85^\circ$. Модель среды Б (б): зонд в нефтенасыщенном песчанике с УЭС 50 Ом·м на расстоянии 20 м от границы с водонасыщенным песчаником с УЭС 1 Ом·м, $\theta = 0^\circ$. Модель среды В (в): зонд в нефтенасыщенном песчанике с УЭС 80 Ом·м на расстоянии 1 м от границы с глинистым пластом с УЭС 1 Ом·м и на расстоянии 4 м от границы с водонасыщенным песчаником с УЭС 4 Ом·м, $\theta = 80^\circ$. Модель среды Г (г): зонд пересекает границу, разделяющую нефтенасыщенный песчаник с УЭС 80 Ом·м и глинистый пласт с УЭС 1 Ом·м, расстояние до границы – 0.2 м; ниже на расстоянии 4 м находится водонасыщенный песчаник с УЭС 4 Ом·м, $\theta = 80^\circ$

Моменты не зависят от времени, и их отношение определяется выражением $\frac{M_1}{M_2} = -\left(\frac{L_2}{L_1}\right)^3$, $M_1 = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^4$.

В случае каротажа в процессе бурения с целью геонавигации, в разностном сигнале таким образом подавляется влияние бурильной колонны [Itskovich, 2018]. Аналогично в частотной области используется разностный сигнал: $\vec{F}(f) = \vec{H}_1^*(f) - \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^3 \cdot \vec{H}_2^*(f)$, чтобы компенсировать поле в воздухе.

Рассмотрим способ трансформации в частотную область на конкретных примерах. Пусть $L_1 = 7 \text{ м}$, $L_2 = 5 \text{ м}$ и $t_n = 0.5 \text{ мс}$. Моменты генераторной и приемной катушек направлены вдоль прибора или соединяющей их линии. Измеряется компонента ZZ в системе координат прибора: $F_z(f)$. Необходимо выяснить, каково максимально возможное значение t_1 , обеспечивающее требуемую точность вычисления $F_z(f)$. Рассматривается горизонтально-слоистая модель среды (рис. 1), используемая в некоторых указанных в начале работы задачах. Расстояния до границ пластов отсчитывается от генераторной катушки (источника) И, приемные катушки П находятся впереди генераторной; θ – угол наклона зонда относительно вертикали.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КАЖУЩЕГОСЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Важным вопросом является исследование поведения кажущегося сопротивления, которое вычисляется по однородной среде для $G_z(t)$. На рисунке 2 приведены кривые э.д.с. $G_z(t)$ в однородной среде на временах от 0.05 мкс до 0.5 мс.

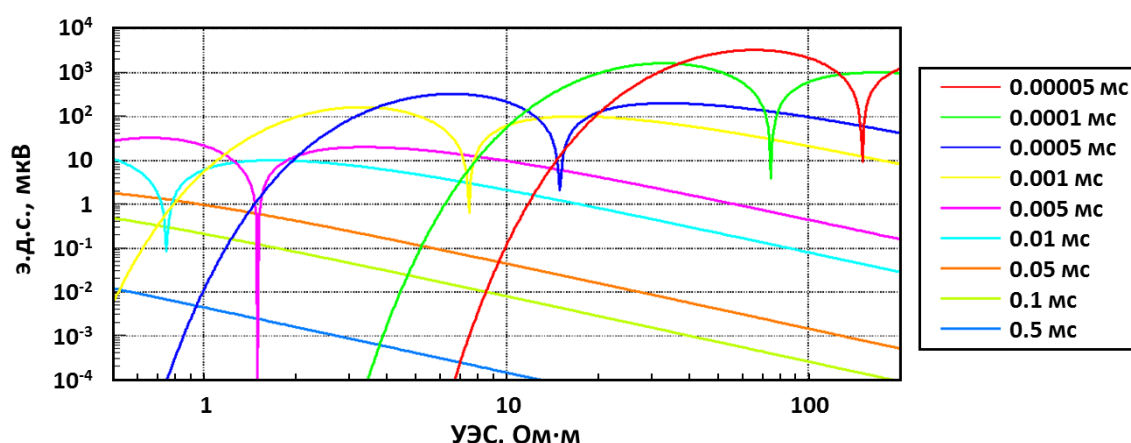


Рис. 2. Кривые э.д.с. в однородной среде в зависимости от УЭС на временах 0.00005–0.5 мс.

На временах до 0.01 мс кривые э.д.с. немонотонны в зависимости от УЭС однородной среды, изменяющегося от 0.5 до 200 Ом·м. Это значит, что на ранних временах для одного значения э.д.с. могут быть найдены несколько значений кажущегося УЭС. Поскольку кривые э.д.с. монотонны на поздних временах и, следовательно, дают только одно значение кажущегося УЭС, алгоритм вычисления истинного кажущегося УЭС в зависимости от времени состоит в следующем:

1. Последовательно вычисляются кажущиеся сопротивления, начиная с последнего временного отсчета в порядке убывания времени.
2. Когда два или более решений появляются на каком-то времени, выбирается то, которое обеспечивает монотонность кривой кажущегося УЭС, или ближайшее к кажущемуся УЭС на предыдущем времени.
3. Если решение отсутствует (такое может происходить, когда э.д.с. переходит через ноль), то и кажущееся УЭС считается не определенным.

На рисунке 3 представлена э.д.с. $G_z(t)$ и кажущееся УЭС для модели среды А (см. рис. 1) на временном интервале [5 мкс, 0.5 мс].

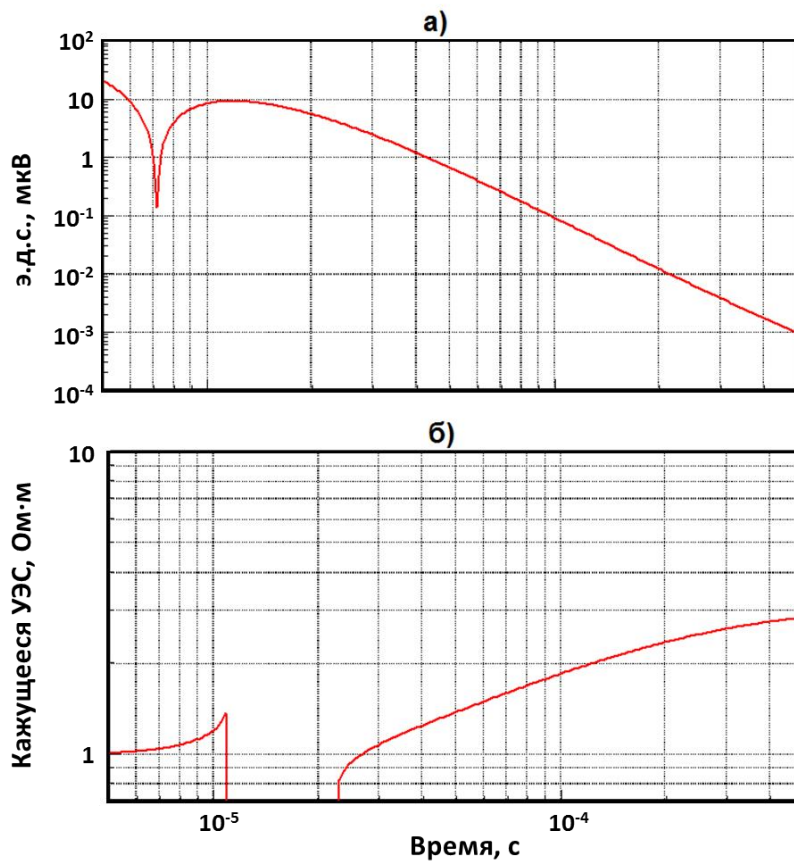


Рис. 3. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды А

Из рисунка 3 следует, что при уменьшении времени кажущееся УЭС стремится к некоторому фиксированному значению. В данном случае – это УЭС слоя, в котором находится прибор: глинистый пласт с УЭС 1 Ом·м.

ВЫЧИТАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Попытка напрямую применить формулу (1) для определения частотно-зависимого сигнала приводит к большим ошибкам в вычисленном магнитном поле из-за недостатка, главным образом, ранних времен в отрезке интегрирования. Новый подход к вычислению Фурье-трансформации временного сигнала основан на вычитании из преобразуемого сигнала первичного поля, которое определяется как поле в однородной среде с УЭС, равным кажущемуся УЭС на первых временах регистрации. Формула преобразования имеет следующий вид:

$$\vec{H}^*(f) = \vec{H}^{*0}(f) - \frac{1}{\mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \left(\frac{d\vec{B}(t)}{dt} - \frac{d\vec{B}^0(t)}{dt} \right) e^{i2\pi ft} dt, \quad (4)$$

где $\frac{d\vec{B}^0(t)}{dt}$ – первичное поле.

Для модели А, когда зонд находится в проводящем слое, необходимый для преобразования интервал будет меньше, так как сигнал быстро затухает.

Выбранные конструктивные параметры зонда (длины и времена регистрации) ориентированы на глубинные исследования, поэтому частотный интервал для преобразования сигнала будет соответствовать глубинным частотным измерениям: от 2 до 600 кГц.

На следующей блок-схеме (рис. 4) представлен алгоритм преобразования сигналов для последующей инверсии.



Рис. 4. Алгоритм преобразования сигналов для последующей инверсии

На рис. 5 изображено восстановленное магнитное поле $F_z(f)$ и ошибки его восстановления для модели А.

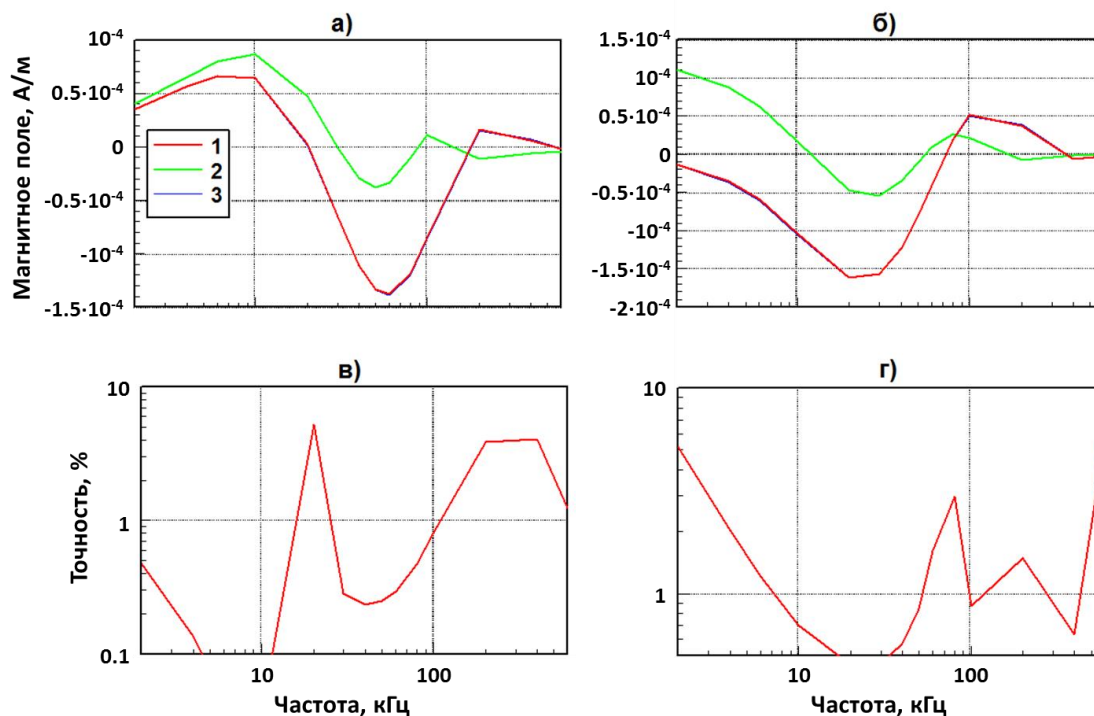


Рис. 5. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели А: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

Из рисунка 5 следует, что мнимая часть магнитного поля восстановлена с погрешностью меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль. Для реальной части погрешность меньше 1 %, за исключением также низких (<10 кГц) частот.

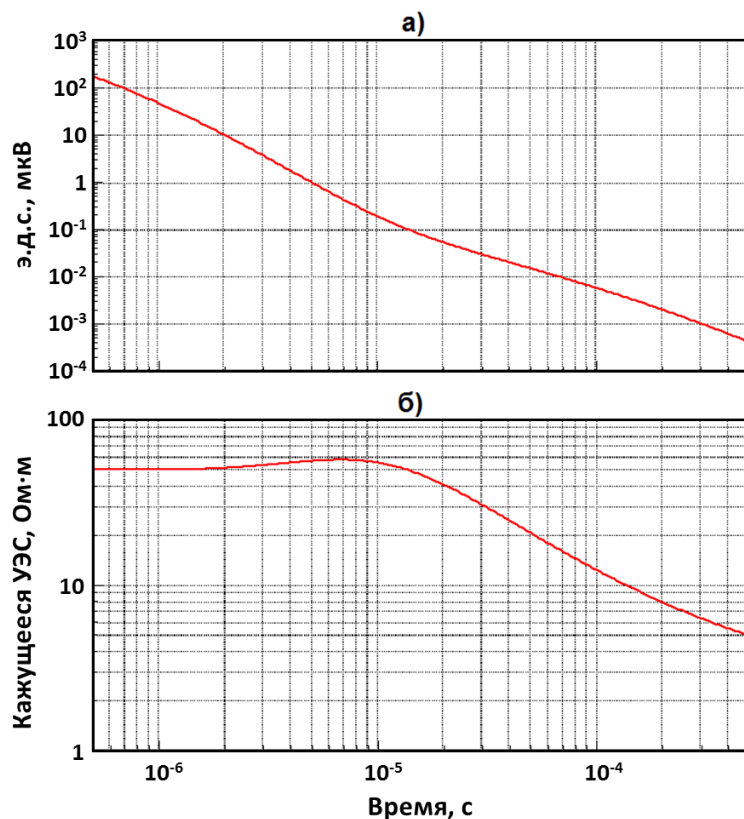


Рис. 6. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды Б

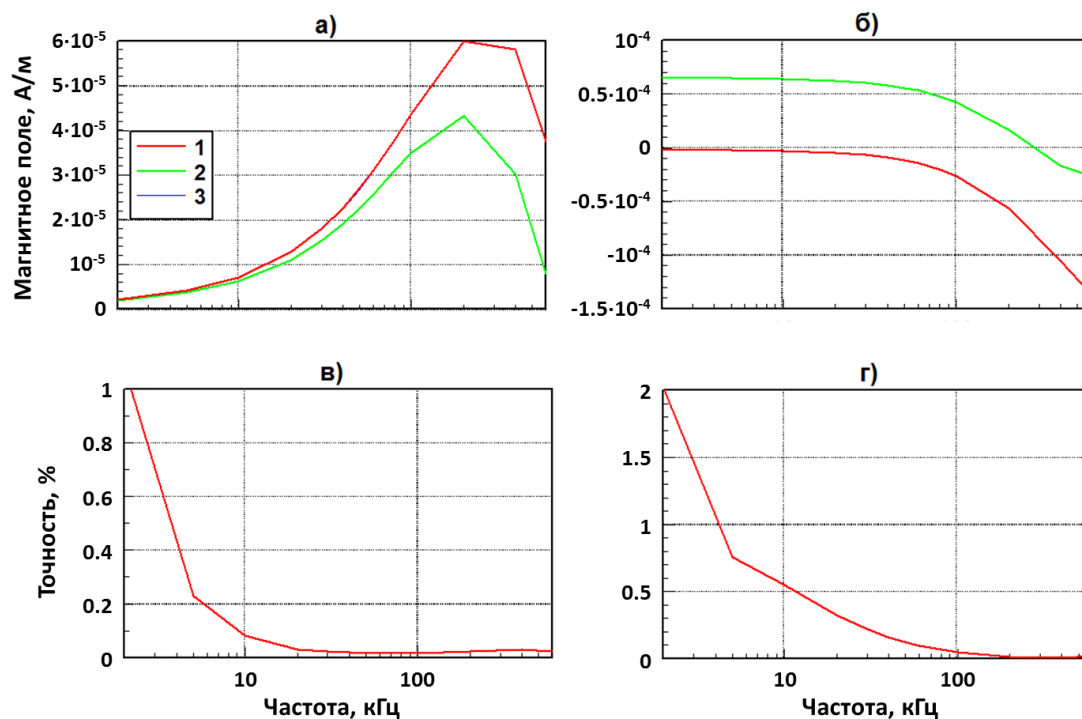


Рис. 7. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели Б: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

На рисунках 6–11 представлены э.д.с. $G_z(t)$ и кажущееся УЭС на необходимом для преобразования временном интервале, а также восстановленное магнитное поле $F_z(f)$ и ошибки восстановления для моделей Б, В и Г (см. рис. 1). Временной интервал был выбран таким образом, чтобы кажущееся УЭС стремилось к некоторому пределу при $t \rightarrow t_1$. Если зонд не пересекает границ пластов (находится целиком в пласте на достаточном расстоянии от границ), то кажущееся УЭС стремится на ранних временах к УЭС этого пласта. Это можно наблюдать на рис. 6 и 8 для моделей Б и В. Для модели Г (рис. 10), где зонд пересекает границу, кажущееся УЭС стремится на ранних временах к эффективному УЭС пространства, где находится зонд.

Точность восстановления реальной части магнитного поля (рис. 7, г) хуже по сравнению с точностью для мнимой части (рис. 7, в).

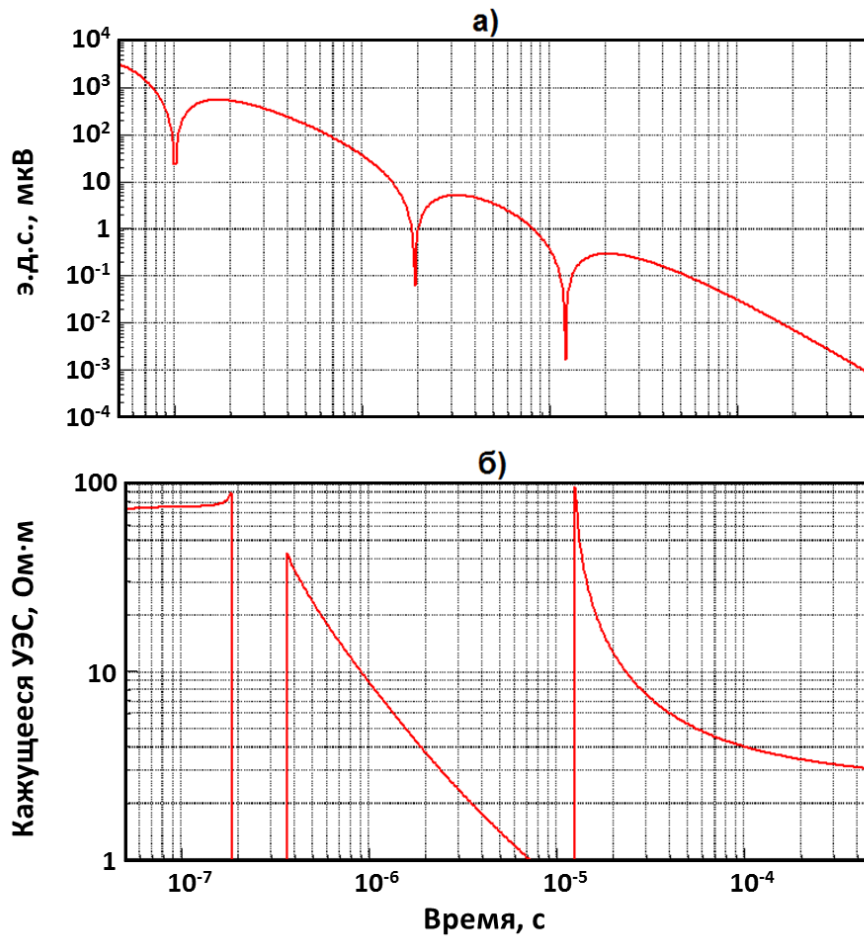


Рис. 8. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды В

Для мнимой части магнитного поля погрешность восстановления меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль (рис. 9, в). Точность восстановления реальной части неудовлетворительная (рис. 9, г). Это можно объяснить следующим образом. В формуле (4) при интегрировании для реальной части берется $\cos(2\pi ft)$. Эта функция не убывает, когда t стремится к нулю и неиспользуемый интервал $[0, t_1]$ вносит ошибку в виде аддитивной составляющей, как видно из рис. 9, б. Для модели В (и для следующей модели Г) эта составляющая достаточно велика.

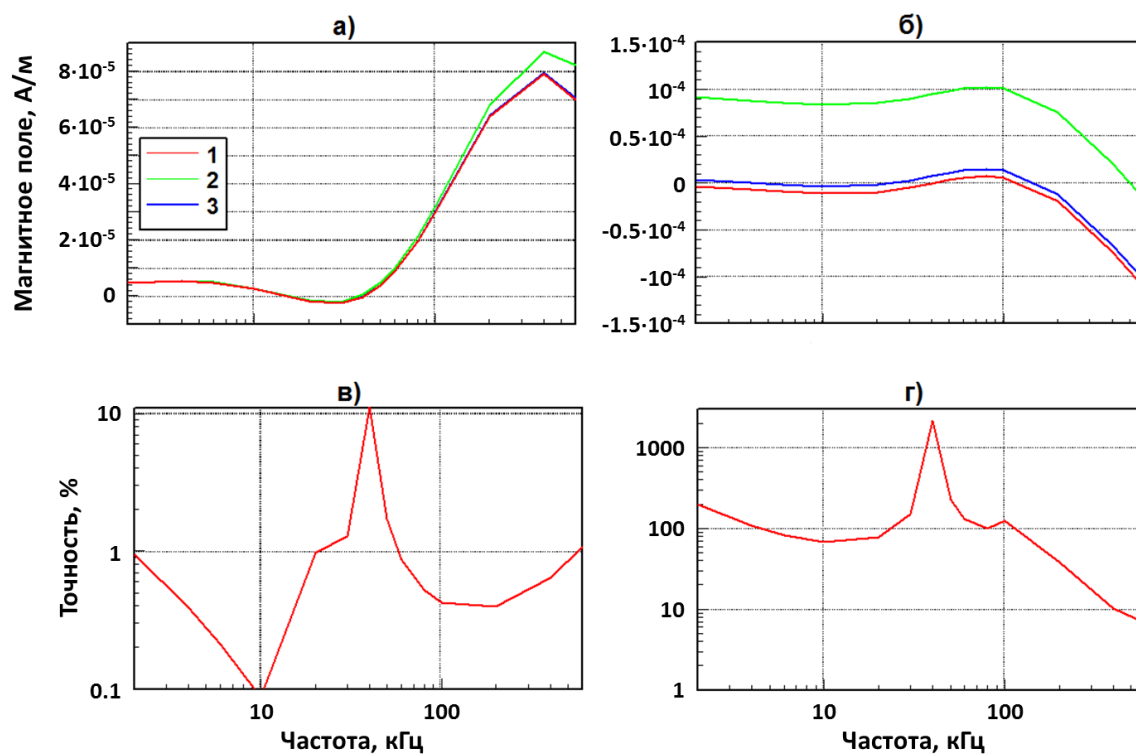


Рис. 9. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели В: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

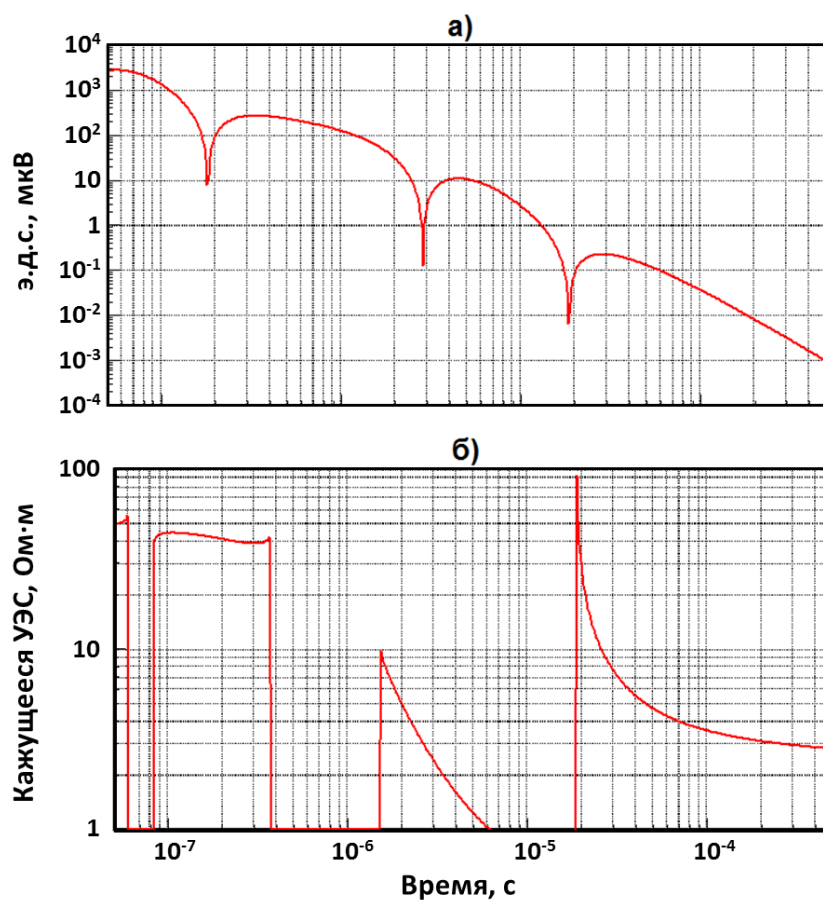


Рис. 10. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды Г

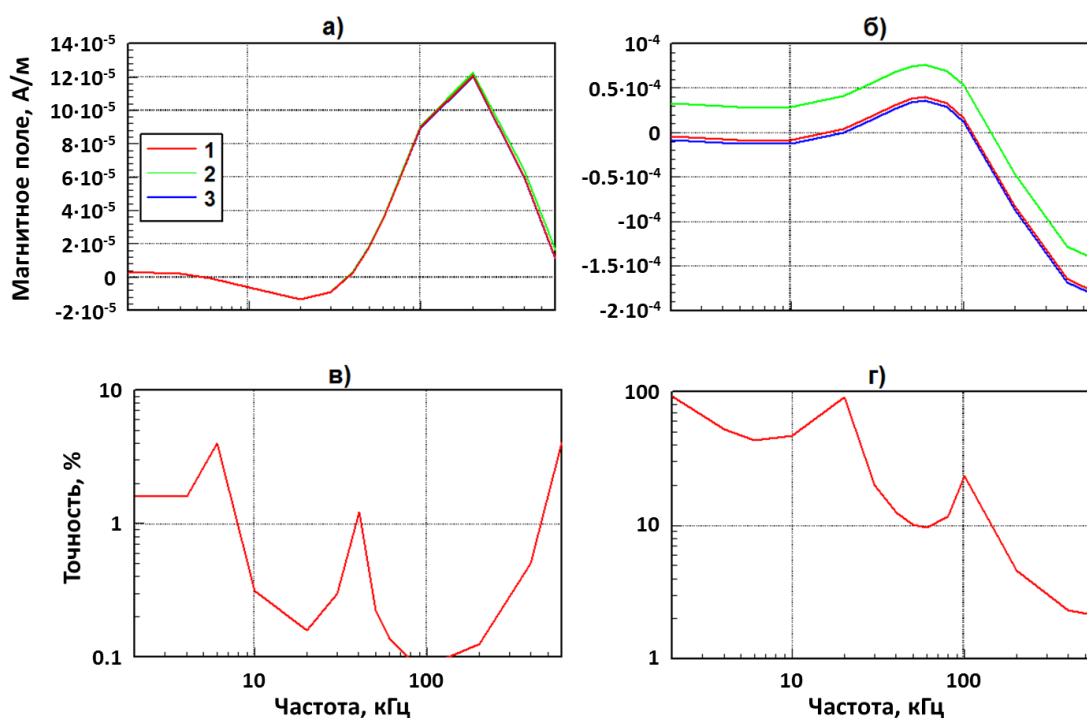


Рис. 11. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели Г: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

Как и для предыдущих моделей, для мнимой части магнитного поля погрешность восстановления меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль (рис. 11, в). Точность восстановления реальной части неудовлетворительная, как и для модели В (рис. 11, г): сигналы различаются на некоторую величину.

АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ: СРАВНЕНИЕ Э.Д.С. ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В таблицах 1–4 представлены ожидаемые погрешности определения параметров моделей и угла наклона зонда относительно вертикали θ по э.д.с. и по мнимой части магнитного поля. Оценка выполнена в линейном приближении [Nardi et al., 2010]. Выбраны следующие частоты: 2, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 кГц. Использована только одна глубина. В случае нескольких глубин, чувствительность улучшается. Пусть систематическая ошибка составляет 0.5 % для э.д.с. и 1 % для магнитного поля (с учетом дополнительной ошибки при преобразовании сигнала).

Таблица 1

Погрешности определения параметров для модели А

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.34 %	0.005 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	30 Ом·м	16 %	40 %
Расстояние до границы	5 м	0.28 м	0.32 м
θ	85°	3.6°	3.9°

Таблица 2

Погрешности определения параметров для модели Б

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС нефтенасыщенного песчаника	50 Ом·м	0.52 %	1.3 %
УЭС водонасыщенного песчаника	1 Ом·м	2.1 %	6.5 %
Расстояние до границы	20 м	0.07 м	0.7 м
θ	0°	6.2°	3.6°

Таблица 3

Погрешности определения параметров для модели В

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.62 %	1.7 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	80 Ом·м	0.16 %	2.7 %
УЭС водонасыщенного песчаника	4 Ом·м	2.5 %	5.6 %
Расстояние до верхней границы	1 м	0.013 м	0.031 м
Расстояние до нижней границы	4 м	0.15 м	0.27 м
θ	80°	0.33°	0.33°

Таблица 4

Погрешности определения параметров для модели Г

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.41 %	1.7 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	80 Ом·м	1.2 %	4.5 %
УЭС водонасыщенного песчаника	4 Ом·м	3.1 %	7.8 %
Расстояние до верхней границы	1 м	0.003 м	0.005 м
Расстояние до нижней границы	4 м	0.056 м	0.32 м
θ	80°	0.18°	0.58°

Представленные в табл. 1–4 результаты свидетельствуют о том, что в целом чувствительность частотно-зависимых сигналов к параметрам среды несколько хуже, чем для временных измерений, но является достаточно хорошей для уверенной оценки УЭС пластов, расстояний до границ, а также угла наклона зонда. Тестовые инверсии подтверждают это утверждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод инверсии данных зондирования МПП. Он состоит в трансформации измеренных сигналов в частотную область и применении к ним алгоритма инверсии, разработанного и используемого для частотной области, с целью определения параметров исследуемой среды. Этот метод позволяет существенно снизить время вычислений – так, что инверсия будет проводиться в реальном времени. Важной особенностью метода является вычитание первичного поля из измеренной э.д.с. Это дает возможность использования относительно небольшого временного интервала для преобразования Фурье и восстановления частотного сигнала с хорошей точностью.

Следующие выводы справедливы для реального глубинного зонда с расстояниями между генераторными и приемными катушками до 10 м:

- чтобы восстановить мнимую часть магнитного поля в частотном диапазоне от 2 до 600 кГц, соответствующем глубинным исследованиям, в общем случае необходимы времена измерения от 0.05 мкс до 0.5 мс (4 порядка);
- в проводящей среде временной интервал сокращается и может составлять 2 порядка: от 5 мкс до 0.5 мс;
- для инверсии в частотной области необходимо выбирать мнимую часть магнитного поля вне ее переходов через ноль.

Показано, что разрешающая способность преобразованных сигналов сравнима с разрешающей способностью исходных сигналов. Метод применим для диагональных компонент поля XX , YY и ZZ . Для перекрестных компонент поле в однородной среде равно нулю, и способ трансформации их в частотную область должен быть модифицирован на основе детального численного анализа поведения сигналов в базовых моделях.

Разработанный компьютерный алгоритм быстрой инверсии будет применяться, прежде всего, для решения актуальной проблемы экологического мониторинга состояния многолетнемерзлых пород на основе импульсных электромагнитных зондирований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны», <https://rscf.ru/project/22-17-00181/>.

ЛИТЕРАТУРА

Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1965. – 105 с.

Никитенко М.Н., Мосин А.П. Методы сжатия данных прибора каротажа в процессе бурения методом переходных процессов // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 4–16, doi: 10.18303/2619–1563–2022–1–4.

Никитенко М.Н., Рабинович М.Б., Свиридов М.В. Определение элементов залегания пластов по данным каротажа в процессе бурения методом переходных процессов // Геофизические технологии. – 2021а. – № 2. – С. 36–48, doi: 10.18303/2619-1563-2021-2-36.

Никитенко М.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Импульсные электромагнитные зондирования баженовской свиты из нижнемеловых и юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // EAGE Геомодель 2021 (г. Геленджик, 6–10 сентября 2021): Тезисы докладов. – Геленджик, 2021б. – С. 59.

Сидоров В.А. Скважинные дефектоскопы-толщиномеры для исследования многоколонных скважин // Каротажник. – 1996. – № 24. – С. 83–94.

Эпов М.И., Морозова Г.М., Антонов Е.Ю. Электромагнитная дефектоскопия обсадных колонн нефтегазовых скважин. – Новосибирск: Гео, 2002. – 104 с.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Новый метод импульсного электромагнитного каротажного зондирования: картирование баженовской свиты из юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 3 (47). – С. 31–39.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Петров А.М., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Межскважинное импульсное электромагнитное просвечивание баженовской свиты из нижнемеловых и верхнеюрских коллекторов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 1 (49). – С. 73–79.

Bespalov A., Rabinovich M., Tabarovskiy L. Deep resistivity transient method for MWD application using asymptotic filtering // US Patent No. 7027922, publ. April 11, 2006.

Dutta S., Reiderman A., Schoonover L.G., Rabinovich M.B. New borehole transient electromagnetic system for reservoir monitoring // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 222–232.

Glinkikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // Geosciences. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 1–15, doi: 10.3390/geosciences11020060.

Itskovich G. Downhole transient resistivity measurements // US Patent No. 9857499, publ. January 2, 2018.

Itskovich G., Nikitenko M. Fast inversion of MWD transient EM data excited by a pulse of an arbitrary shape // US Patent No. 9562990, publ. February 7, 2017.

Itskovich G., Lee F., Nikitenko M. Hybrid image of earth formation based on transient electromagnetic measurements // US Patent No. 10139517, publ. November 27, 2018.

Nardi G., Martakov S., Nikitenko M., Rabinovich M. Evaluation of parameter uncertainty utilizing resolution analysis in reservoir navigation increases the degree of accuracy and confidence in well-bore placement // The SPWLA 51st Annual Logging Symposium (Perth, Australia, June 19–23, 2010): Transactions. – Perth, 2010. – SPWLA-2010-78038.

Nikitenko M. Apparatus and method for downhole transient resistivity measurement and inversion // US Patent No. 9841527, publ. December 12, 2017.

Seydoux J., Tabanou J., Ortenzi L., Denichou J.M., De Laet Y., Omeragic D., Iversen M., Fejerskov M. A deep-resistivity logging-while-drilling device for proactive geosteering // The Offshore Technology Conference (Houston, Texas, USA, May 5–8, 2003): Proceedings. – Houston, 2003. – OTC-15126-MS, doi: 10.4043/15126-MS.

Tabarovsky L.A., Goldman M.M., Rabinovich M.B., Strack K.-M. 2.5-D modeling in electromagnetic methods of geophysics // *Journal of Applied Geophysics*. – 1996. – Vol. 35 (4). – P. 261–284, doi: 10.1016/0926-9851(96)00025-0.

REFERENCES

Bespalov A., Rabinovich M., Tabarovsky L. Deep resistivity transient method for MWD application using asymptotic filtering // US Patent No. 7027922, publ. April 11, 2006.

Dutta S., Reiderman A., Schoonover L.G., Rabinovich M.B. New borehole transient electromagnetic system for reservoir monitoring // *Petrophysics*. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 222–232.

Epov M.I., Morozova G.M., Antonov E.Yu. Electromagnetic defectoscopy of casing strings of oil and gas wells [in Russian]. – Geo, Novosibirsk, 2002. – 104 p.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. New method of pulsed electromagnetic logging sounding: mapping the Bazhenov Formation from Jurassic reservoirs penetrated by inclined-horizontal wells // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. – 2021. – No. 3 (47). – P. 31–39.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. Cross-well pulsed electromagnetic exploration of the Bazhenov Formation from Lower Cretaceous and Upper Jurassic reservoirs // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. – 2022. – Vol. 1 (49). – P. 73–79.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // *Geosciences*. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 1–15, doi: 10.3390/geosciences11020060.

Itskovich G. Downhole transient resistivity measurements // US Patent No. 9857499, publ. January 2, 2018.

Itskovich G., Nikitenko M. Fast inversion of MWD transient EM data excited by a pulse of an arbitrary shape // US Patent No. 9562990, publ. February 7, 2017.

Itskovich G., Lee F., Nikitenko M. Hybrid image of earth formation based on transient electromagnetic measurements // US Patent No. 10139517, publ. November 27, 2018.

Nardi G., Martakov S., Nikitenko M., Rabinovich M. Evaluation of parameter uncertainty utilizing resolution analysis in reservoir navigation increases the degree of accuracy and confidence in well-bore placement // *The SPWLA 51st Annual Logging Symposium (Perth, Australia, June 19–23, 2010): transactions*. – Perth, 2010. – SPWLA-2010-78038.

Nikitenko M. Apparatus and method for downhole transient resistivity measurement and inversion // US Patent No. 9841527, publ. December 12, 2017.

Nikitenko M.N., Mosin A.P. Methods of transient EM data compression // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2022. – Vol. 1. – P. 4–16, doi: 10.18303/2619-1563-2022-1-4.

Nikitenko M.N., Rabinovich M.B., Sviridov M.V. Determination of formation dip and strike from transient LWD electromagnetic measurements // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2021a. – Vol. 2. – P. 36–48, doi: 10.18303/2619-1563-2021-2-36.

Nikitenko M.N., Epov M.I., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. Transient Electromagnetic Sounding of Bazhenov Formation from Lower Cretaceous and Jurassic Reservoirs Penetrated by Deviated and Horizontal Wells // *EAGE Geomodel 2021 (Gelendzhik, September 6–10, 2021): Extended abstracts*. – Gelendzhik, 2021b. – P. 59.

Seydoux J., Tabanou J., Ortenzi L., Denichou J.M., De Laet Y., Omeragic D., Iversen M., Fejerskov M. A deep-resistivity logging-while-drilling device for proactive geosteering // The Offshore Technology Conference (Houston, Texas, USA, May 5–8, 2003): Proceedings. – Houston, 2003. – OTC-15126-MS, doi: 10.4043/15126-MS.

Sidorov V.A. Borehole defectoscopes-calipers for studying multi-column wells // Karotazhnik. – 1996. – Vol. 24. – P. 83–94.

Tabarovsky L.A., Goldman M.M., Rabinovich M.B., Strack K.-M. 2.5-D modeling in electromagnetic methods of geophysics // Journal of Applied Geophysics. – 1996. – Vol. 35 (4). – P. 261–284, doi: 10.1016/0926-9851(96)00025-0.

Vanyan L.L. Fundamentals of Electromagnetic Sounding [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1965. – 105 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НИКИТЕНКО Марина Николаевна – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, обоснование новых методов исследования скважин, новые способы интерпретации, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных.

*Статья поступила в редакцию 18 июля 2022 г.,
принята к публикации 7 октября 2022 г.*



РАЗВИТИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОТЕНЦИАЛОВ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ КАРОТАЖА НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

А.В. Глинских, О.В. Нечаев

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

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

e-mail: GlinskikhAV@ipgg.sbras.ru

В работе представлен обзор основных исследований, посвященных развитию теоретической модели явления самопроизвольной поляризации (ПС) и созданию алгоритмов численного моделирования данных каротажа ПС. Обсуждаются как ранние работы в области метода ПС, заложившие основы теоретического описания, так и работы последних лет, направленные на создание количественных физико-математических моделей ПС, а также посвященные развитию численных подходов к моделированию каротажных данных. Для демонстрации эффективности современных вычислительных методов в работе представлен оригинальный алгоритм, позволяющий рассчитывать сигналы ПС в интервалах заглинизированных пластов-коллекторов. Сравнение результатов моделирования сигналов ПС и практических каротажных данных показывает высокое качество используемой теоретической модели. Представленный обзор демонстрирует возможности задачи ПС для новых актуальных направлений практического применения.

Самопроизвольная поляризация, каротаж ПС, численное моделирование, метод конечных элементов

DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF SPONTANEOUS POLARIZATION POTENTIALS FOR OIL AND GAS WELL LOGGING

A.V. Glinskikh, O.V. Nechaev

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

e-mail: GlinskikhAV @ipgg.sbras.ru

Among a large number of geophysical well logging methods, the spontaneous potential (SP) logging is a most demanded one for studying geological sections, and is widely used in all drilled wells. This paper presents a brief review of the main studies on the enhancement of a theoretical model for the SP phenomenon, and on the creation of algorithms for numerical modeling of SP logging data. First of all, we discuss the studies that were conducted shortly after the discovery of the phenomenon and became fundamental in the field of SP method theory. Most of the first works were aimed at identifying the key factors that influence the shape and amplitude of SP signals. The research vector of these works contributed to the creation of interpretation charts, which are widely used even today. This review also analyses the main results of the more recent theoretical works aimed at developing a quantitative SP logging model that takes into account the petrophysical properties of the geological environment, and works related to numerical approaches for the modeling of well logging data. In addition, to demonstrate the effectiveness of modern computational methods, the paper presents an original algorithm based on the finite element method and utilizing a correct physical and mathematical model of the SP phenomenon. The proposed approach makes it possible to calculate SP signals in the intervals of clayed reservoirs, with consideration to their porosity, water saturation, as well as the type and content of clay minerals. Comparison of the SP modeling results and field logging data obtained from wells in Western Siberian fields shows a high quality of our theoretical model. The presented review of key

works devoted to the theoretical description of the SP method, as well as modern numerical approaches for analysing SP logging curves in complex geological conditions, demonstrates the potential of the SP method for new areas of practical application.

Spontaneous polarization, SP logging, numerical modeling, finite element method

ВВЕДЕНИЕ

Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) входит в стандартный комплекс геофизических исследований в скважинах и играет ведущую роль при выделении и оценке фильтрационно-емкостных свойств пластов-коллекторов, содержащих углеводороды. Как известно, в основе каротажа ПС лежит регистрация вдоль ствола скважины электрических сигналов, обусловленных физико-химическими процессами, протекающими в околоскважинном пространстве. Традиционно при описании сигнала ПС рассматривают электрокинетические, электрохимические и окислительно-восстановительные вклады, которые соответствуют образованию на границе «скважина – пласт» градиентов давления [Hunt, Worthington, 2000; Minsley et al., 2007; Revil et al., 2007], активности ионных частиц [Stoll et al., 1995; MacAllister et al., 2019] и окислительно-восстановительного потенциала [Maineult et al., 2006; Arora et al., 2007].

Открытие явления самопроизвольной поляризации братьями Шлюмберже и Г.Дж. Доллем в начале 30-х годов прошлого века привело к созданию каротажного метода, который незамедлительно нашел широкое производственное применение [Schlumberger et al., 1933]. Несмотря на то что подходы к анализу данных, полученных в результате каротажа ПС, имели исключительно эмпирический характер и основывались прежде всего на построении корреляционных зависимостей между сигналами ПС и фильтрационно-емкостными свойствами горных пород, метод ПС показал свою высокую эффективность и подтолкнул исследователей к созданию последовательной физической модели, способной вывести его на новый уровень.

Основы теоретического описания метода ПС заложили работы Г.Дж. Долля, В.М. МакКарделла и коллег, а также В.Н. Дахнова, в которых показана зависимость формы и амплитуды сигналов от геометрических параметров скважины и таких петрофизических параметров среды, как пористость и газонефтенасыщенность [Doll, 1948; McCardell et al., 1953; Дахнов, 1959]. Среди современных работ особое внимание заслуживают исследования А. Ревила, в которых проведен наиболее комплексный анализ фундаментальных физических основ ионной диффузии в пористых средах, содержащих поверхностные электрические заряды [Revil, 1999, 2007]. Представленная А. Ревилом модель позволяет связать величину сигналов ПС с целым набором петрофизических параметров – пористостью, водонасыщенностью, удельным электрическим сопротивлением пластовой воды и емкостью катионного обмена.

С развитием вычислительной техники важнейшей задачей в области геофизических исследований скважин стала разработка эффективных численных алгоритмов для моделирования и инверсии каротажных данных. Первые работы по моделированию каротажа ПС были выполнены Ф. Сегезманом с помощью аналоговых электрических схем [Segesman, 1962]. Возможности численного моделирования данных каротажа ПС, в том числе с помощью сеточных методов, включая методы конечных элементов и конечных разностей, продемонстрированы Г.Ж. Чжаном и Г.Л Ваном [Zhang, Wang, 1999], а также в более поздних работах [Bautista-Anguiano et al., 2020; Epov et al., 2022]. Эффективный подход к анализу данных

каротажа ПС, включающий как использование подробной физико-математической модели ПС, так и алгоритмы численной инверсии, представлен в работе В.Ф. Вудрофа с соавторами [Woodruff et al., 2010].

Несмотря на большой прогресс в области теории метода ПС, интерпретация каротажных данных в большинстве случаев до сих пор основывается на использовании эмпирических зависимостей и упрощенных модельных подходов, что в значительной степени ограничивает информативность метода. По этой причине создание эффективных алгоритмов многомерного численного моделирования в совокупности с использованием детальных физико-математических моделей остается важным и актуальным направлением исследования.

Целью данной работы является краткий аналитический обзор ключевых работ по методу ПС – его физико-химической теории и численному моделированию. В качестве теоретико-алгоритмического развития метода ПС рассматривается обобщенное модельное описание процессов, приводящих к формированию сигналов ПС, и численное решение прямой задачи ПС методом конечных элементов в рамках осесимметричной модели флюидонасыщенного пласта-коллектора с учетом типа и содержания глинистого материала.

ОТКРЫТИЕ ЯВЛЕНИЯ ПС И ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ МЕТОДА

Явление самопроизвольной поляризации обнаружено в 1931 г. сотрудниками компании «Schlumberger» во время записи каротажа сопротивления [Schlumberger et al., 1933]. Как отмечал Г.Дж. Долль, каротажный отклик, наблюдаемый при пропускании электрического тока в околоскважинном пространстве, возникал и в его отсутствии. Это открытие привело к созданию каротажного метода потенциалов самопроизвольной поляризации, который, несомненно, не уступал по своей информативности каротажу сопротивления.

Внедрение каротажа ПС началось в том же году в Азербайджане во время совместных работ советских и французских электроразведчиков на месторождениях «Азнефти». Главным образом метод ПС позволял судить о пористости горных пород, тем самым упрощая поиск и выявление проницаемых интервалов. Основной причиной возникновения самопроизвольной поляризации К. Шлюмберже рассматривал явление электрофильтрации, при котором разность потенциалов между измерительным и обратным электродами обусловлена проникновением бурового раствора в пласт. Однако позже было установлено, что ключевой вклад в формирование сигналов ПС вносят электрохимические процессы, вызванные различиями соленостей бурового раствора и пластовой воды [Schlumberger et al., 1933].

В 1940-х годах появились исследования, направленные на создание последовательной теоретической модели метода ПС, которая могла бы способствовать повышению его информативности. В 1948 году Г.Дж. Долль публикует свою работу, в которой впервые вводит понятие статического потенциала самопроизвольной поляризации, а также рассматривает влияние мощности пласта-коллектора и его удельного сопротивления на характер кривой ПС [Doll, 1948]. Безусловно работы Г.Дж. Долля во многом определили основные принципы интерпретации каротажных кривых ПС, в частности многие современные исследователи до сих пор при анализе сигналов ПС ограничиваются рассмотрением статического потенциала. Однако предложенная Г.Дж. Доллем модель не учитывает физико-химические процессы, участвующие в формировании сигналов ПС, и не позволяет связать форму и амплитуду аномалии ПС с петрофизическими параметрами пласта-коллектора.

В 1953 году В.М. МакКарделл с коллегами проводят исследование, в котором устанавливают влияние содержащихся в горных породах глинистых минералов на наблюдаемые сигналы ПС [McCardell

et al., 1953]. В работе показано, что разность потенциалов между двумя растворами, содержащими соли в разных концентрациях и глинистый материал, определяется свойствами двойного электрического слоя, возникающего на поверхности глинистых частиц. Проведенный анализ позволил на качественном уровне установить влияние на сигналы ПС глинистых минералов, содержащихся в породе, и с хорошей точностью описать имеющиеся на тот момент результаты лабораторных исследований ПС. Однако предложенная модель не давала возможности связать величину сигналов ПС с конкретными петрофизическими свойствами горных пород на количественном уровне.

Наряду с зарубежными коллегами теоретические исследования в области каротажа ПС активно проводили и советские ученые. Так, значительный вклад в развитие теории метода ПС сделан В.Н. Дахновым. В его работах описаны основные физико-химические процессы, приводящие к возникновению сигналов ПС, включая диффузию, адсорбцию, фильтрацию и протекание окислительно-восстановительных реакций [Дахнов, 1959]. Наиболее подробно рассмотрены условия формирования сигналов ПС, которые обусловлены диффузионным переносом ионов в пористых средах, в том числе содержащих заряженные частицы. Полученное Дахновым аналитическое выражение для диффузионно-адсорбционного потенциала позволяет связать сигнал ПС с такими параметрами коллектора, как удельная поверхность твердых частиц, влажность, коэффициент пористости и коэффициент газонефтенасыщенности.

Несмотря на активное развитие теоретического описания метода ПС, ранние модели в значительной степени опирались на эмпирические зависимости и упрощенные подходы. В результате интерпретация данных каротажа ПС долгое время носила преимущественно качественный характер.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ПС

Для более поздних работ по теории метода ПС характерны попытки модельного описания явления самопроизвольной поляризации, имеющего прежде всего количественный характер и основанного на фундаментальных положениях коллоидной химии и физики поверхностных явлений.

Существенным вкладом в развитие данного направления стали работы А. Ревила. Основной вектор его исследований направлен на построение детальной теоретической модели процессов переноса вещества, электрического заряда и тепла в заряженных пористых средах [Revil, 1999, 2007; Revil, Linde, 2006]. Для метода ПС наибольшее значение имеет работа, посвященная анализу ионной диффузии в коллоидных растворах и пористых средах, а также связанных с ней явлений электропроводности, мембранного и термоэлектрического потенциалов [Revil, 1999]. А. Ревил рассматривает полную диффузию ионов как совокупность диффузии через объемный раствор, занимающий поры, и дрейфа ионов на границе раздела фаз «твердая частица – вода в двойном электрическом слое». Стоит отметить, что большинство моделей, предложенных ранее, предполагали отсутствие влияния микрогеометрии пор на мембранный потенциал в гранулированных пористых средах. Модель Ревила, напротив, учитывает этот эффект и не имеет ограничений предшествующих подходов, например, таких как необходимость введения большого количества трудно измеряемых параметров в модели П.Н. Сэна [Sen, 1989]. Кроме того, им приводится точное решение для случая произвольной солености электролита. Важным достоинством модели Ревила является связь величины мембранного потенциала с пористостью и емкостью катионного обмена твердых частиц, образующих матрицу породы, что делает ее удобной для практического применения.

В последующих работах А. Ревилом и Н. Линде создана унифицированная модель для описания переноса воды и ионов в заряженных микропористых материалах путем масштабирования локальных уравнений (уравнений Нернста-Планка и Навье-Стокса) с помощью оператора усреднения по объему [Revil, Linde, 2006; Revil, 2007]. Полученные аналитические выражения устанавливают ряд простых и теоретически обоснованных связей между измеряемыми свойствами материала, ключевыми микроструктурными параметрами пористой среды (извилистостью порового пространства и внутренней проницаемостью) и электрохимическими свойствами двойного электрического слоя глинистых частиц. Позднее модель расширена для описания диффузии ионов в средах с произвольной степенью флюидонасыщения [Revil, Jougnot, 2008].

К числу значимых работ по теории метода ПС можно отнести исследования В.В. Кормильцева, посвященные разработке физико-химической теории самопроизвольной поляризации с помощью аналитического расчета диффузионно-адсорбционных потенциалов в неоднородных средах. Главным образом его работы основываются на классической теории двойного электрического слоя применительно к случаю капиллярнопористой среды [Кормильцев, 1995]. Это, в свою очередь, показывает, что величина равновесного адсорбционного потенциала связана напрямую с размером пор и косвенно с гранулометрическим составом породы [Кормильцев, Ратушняк, 2007].

Начиная с первых наблюдений явления самопроизвольной поляризации, непрерывно совершенствовалось описание процессов, отвечающих за возникновение сигналов ПС. Описанные в разделе физические модели стали основой для разработки численных алгоритмов моделирования и инверсии сигналов ПС, которые открыли новые возможности применения метода каротажа ПС.

ЧИСЛЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДАННЫХ КАРОТАЖА ПС

Использование численных подходов к моделированию каротажных данных ПС является основой современной интерпретации комплекса методов геофизических исследований скважин. Однако уже работы Г.Дж. Долля по теории метода ПС включают расчеты кривых ПС, используемые для оценки влияния геометрических параметров модели среды [Doll, 1948]. Первые результаты по моделированию сигналов ПС, направленные на практическое использование, получены Ф. Сегезманом с помощью аналоговой резисторной цепи, отражающей распределение УЭС и источников напряжения в прискважинной области [Segesman, 1962]. Выполненные им расчеты позволили оценить влияние на амплитуду сигнала ПС различных факторов, включая УЭС и толщину проницаемого пласта, а также учесть эффекты проникновения бурового раствора в пласт, что стало основой при создании корректировочных палеток.

Несмотря на то, что использование различных поправок и палеток для коррекции до сих пор распространено на практике, такой способ анализа каротажных данных имеет множество недостатков и значительно уступает по эффективности применения подходам, основанным на численных методах. В 1997 году Г.Ж. Чжан и Г.Л. Ван разработали алгоритм, использующий метод конечных элементов для моделирования сигналов ПС в рамках теории скалярного, а впоследствии и векторного, потенциала [Zhang, Wang, 1999]. Их алгоритм успешно воспроизводит модель Сегезмана и показывает высокую вычислительную эффективность. Позднее в работе Дж.М. Салазара и коллег проводится совместная численная инверсия данных каротажа ПС, рассчитанных с помощью алгоритма Чжана и Вана, и данных каротажа сопротивления, полученных методом численного согласования мод [Salazar et al., 2008]. Это позволило найти значения УЭС пластовой воды и показателя цементации для набора практических

данных. Подробное описание численного моделирования сигналов ПС с помощью сеточных методов представлено также в работах Дж. Баутиста-Ангуиано с соавторами [Bautista-Anguiano et al., 2020], в которой используется метод конечных разностей, и М.И. Эпова с соавторами [Епов et al., 2022], основанной на методе конечных элементов с применением детальной физической модели ПС для заглинизированного пласта-коллектора. В данных работах физико-математическая модель ПС А. Ревила применяется с помощью формализма связанных потоков, рассмотренного В.Р. Силлом [Sill, 1983].

Один из наиболее комплексных подходов к интерпретации данных каротажа ПС предложен в работе [Woodruff et al., 2010], в которой для моделирования и инверсии приводится механистическая модель, основанная на единой петрофизической модели электропроводности и ионной диффузии. Данная модель во многом построена на результатах Ревила, описанных в предыдущем разделе [Revil, 1999]. Отличительной особенностью подхода, представленного в работе, является одновременная инверсия целого набора скважинных измерений, включающих кривые ПС, каротажа сопротивления, а также информацию, найденную по данным ядерных методов каротажа (объемной плотности, водородной пористости, естественной радиоактивности). В.Ф. Вудрофом и коллегами разработан алгоритм для инверсии следующих петрофизических параметров пласта-коллектора: солёности пластовой воды, пористости, водонасыщенности, емкости катионного объема, показателей цементации и насыщения. Получение такого количества информации в результате анализа каротажных данных является значительным результатом, однако недостатком предложенного подхода можно считать сложность практической реализации.

Таким образом, несмотря на большой прогресс за последние десятилетия, дальнейшее развитие подходов и методов для моделирования данных каротажа ПС в классе реалистичных моделей, а также создание соответствующих эффективных вычислительных алгоритмов остается актуальным направлением.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ КАРОТАЖА ПС В МОДЕЛИ ГЛИНИСТОГО ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСЧАНИКА

Описанные теоретические модели и численные методы применяются в практических приложениях каротажа ПС, в первую очередь для интерпретации данных применительно к изучению флюидонасыщенного заглинизированного пласта-коллектора. Перспективным подходом к решению данной задачи становится создание вычислительного алгоритма для моделирования данных каротажа ПС с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с учетом последовательной физико-математической модели, адекватно описывающей явление самопроизвольной поляризации.

Основой такого алгоритма является решение прямой задачи ПС, формальная постановка которой значительно не изменилась со времени первых работ по теории метода и заключается в нахождении электростатического потенциала внутри скважины при заданном распределении геоэлектрических параметров среды. В работах В.Р. Силла [Sill, 1983] и А. Ревила [Revil, 2007] показано, что для наиболее корректной постановки прямой задачи ПС необходимо формализовать ее в терминах метода связанных потоков, что позволяет получить уравнение Пуассона для искомого потенциала в следующем виде:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot (j_s),$$

где σ – удельная электрическая проводимость (УЭП), φ – электростатический потенциал (потенциал ПС), j_s – плотность тока стороннего источника.

Данное уравнение формулируется как следствие требования сохранения полного заряда среды и отражает тот факт, что источником ПС является сторонний физико-химический процесс, протекающий в прискважинной области и приводящий к появлению электрического тока. Конкретный вид функции правой части определяется типом процесса, в качестве которого могут выступать диффузия ионов солей, фильтрация бурового раствора и пластовой воды, а также окислительно-восстановительные реакции. Однако в большинстве ситуаций в стандартных скважинных условиях величина последних двух вкладов в величину ПС оказывается существенно меньше вклада ионной диффузии. При пренебрежении этими эффектами плотность тока стороннего источника принимает следующий вид:

$$j_s = -\frac{k_b T}{e} \sigma (2T_{(+)} - 1) \nabla \ln \sigma_w,$$

где σ_w – УЭП пластовой воды, $T_{(+)}$ – макроскопическое число Хитторфа (доля электрического тока, переносимого катионами в пористой среде), k_b – постоянная Больцмана, T – температура, e – элементарный заряд.

Удельная электрическая проводимость пластовой воды прямо пропорциональна ее солёности ($\sigma_w = e C_w (\beta_{(+)} + \beta_{(-)})$), где C_w – солёность пластовой воды, $\beta_{(\pm)}$ – подвижности катионов и анионов соответственно), в то время как связь остальных параметров модели с петрофизическими величинами является более сложной. Используя зависимость Арчи–Дахнова, а также модель Ваксмана–Смита для заряженной пористой среды, можно получить следующие соотношения:

$$\sigma = \sigma_{(+)} + \sigma_{(-)},$$

$$\sigma_{(+)} = s_w^n \phi^m \left(t_{(+)} \sigma_w + \beta_s \tilde{\rho}_s \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) CEC \right),$$

$$\sigma_{(-)} = s_w^n \phi^m (1 - t_{(+)}) \sigma_w,$$

$$T_{(+)} = \frac{\sigma_{(+)}}{\sigma},$$

где $\sigma_{(\pm)}$ – вклад в УЭП от катионов/анионов, ϕ – пористость, s_w – водонасыщенность пласта, m – показатель цементации, n – показатель насыщения, β_s – эффективная подвижность катионов на минеральной поверхности, ρ_s – плотность твердой фазы, CEC – ёмкость катионного обмена (Кл/кг), $t_{(+)}$ – микроскопическое число Хитторфа, равное относительной подвижности катионов в свободном растворе электролита. Однако стоит отметить, что для практического применения данной модели удобнее оперировать значениями удельного электрического сопротивления $\rho = \sigma^{-1}$.

Достоинством предложенного подхода к определению модельных параметров в задаче ПС является явная зависимость между расчетными сигналами и реальными петрофизическими параметрами среды [Revil, 1999; Woodruff et al., 2010]. При этом количество и тип глинистых минералов, содержащихся в пласте, определяются через параметр ёмкости катионного обмена. Данная величина отражает количество противоионов двойного электрического слоя глинистых частиц на единицу массы пористого материала. Если песчаный пласт-коллектор содержит один тип глинистого минерала, то его ёмкость катионного обмена можно выразить следующим образом:

$$CEC = CEC_r k_r,$$

где k_r – коэффициент заглинизированности пласта, CEC_r – емкость катионного обмена глины. В случае нескольких типов глинистых минералов необходимо использовать обобщенную величину средней емкости катионного обмена.

Дальнейшим предположением, применимым для большинства практических случаев, является аксиально-симметричная модель среды, включающая вертикальную скважину и пласты с горизонтальными плоскопараллельными границами, каждый из которых может содержать одну или несколько цилиндрических зон. В качестве базисных функций для МКЭ выбраны билинейные функции, определенные на прямоугольной сетке. Для аппроксимации радиального распределения удельной проводимости используются сигмоидальные функции, являющиеся гладкими, что позволяет вычислить первые и вторые производные в правой части уравнения Пуассона. С помощью МКЭ численное решение исходного уравнения Пуассона сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженной матрицей большой размерности. Для решения полученной СЛАУ используется метод Холецкого, который позволяет сначала разложить матрицу в произведение двух треугольных матриц, а затем найти нескольких решений рассматриваемой СЛАУ. Это значительно повышает эффективность расчета при численном моделировании сигналов ПС в реалистичных моделях геологической среды.

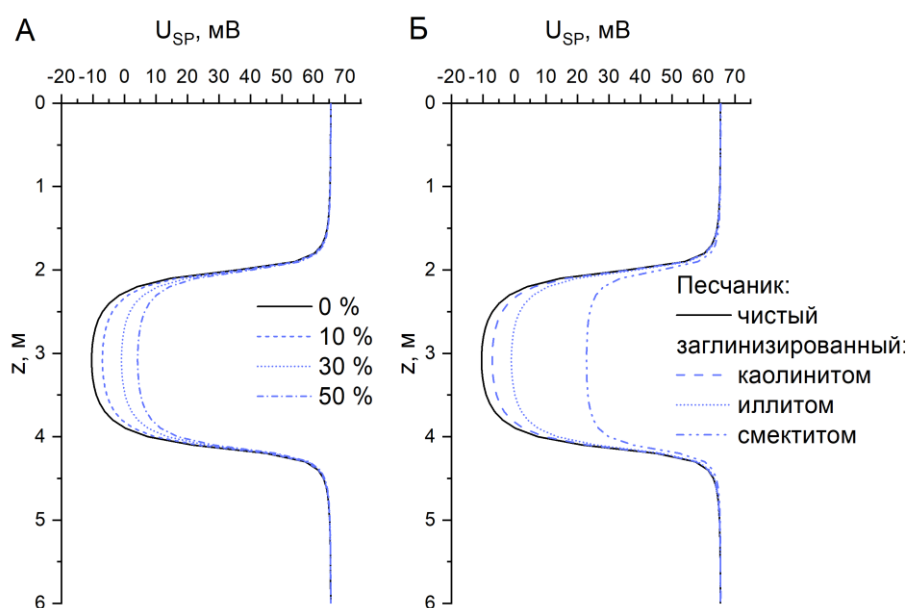


Рис. 1. Влияние количества глинистого минерала (иллит), содержащегося в пласте-коллекторе, на сигнал ПС (А). Влияние типа глинистого минерала на сигнал ПС при его 30 % содержании в пласте-коллекторе (Б). Рассмотренные типы глинистых минералов: каолинит ($CEC = 8700$ Кл/кг), иллит ($CEC = 26500$ Кл/кг) и смектит ($CEC = 144000$ Кл/кг). Параметры модели: УЭС бурового раствора – 2 Ом·м, радиус скважины – 0.108 м, соленость пластовой воды – 20 г/л, $\phi = 0.1$, $s_w = 1$, $m = 2$, $n = 2$

Разработанный вычислительный алгоритм используется для расчета сигналов ПС в модели заглинизированного пласта-коллектора ограниченной мощности, перекрытого и подстилаемого глинистыми отложениями. Результаты моделирования показывают зависимость сигнала ПС как от количества глинистого материала, так и от типа глинистых минералов (рис. 1). Как видно, повышение заглинизированности пласта-коллектора и выбор глинистых минералов с большей величиной CEC_r приводят к уменьшению амплитуды аномалии ПС. Из представленного теоретического описания следует,

что данная зависимость обусловлена увеличением значения емкости катионного обмена пласта-коллектора, однако для оценки индивидуального влияния данных факторов необходимо дополнительно использовать другие методы ГИС, например, гамма-каротаж.

Предложенное программное обеспечение для моделирования сигналов ПС позволяет выполнять количественный анализ практических каротажных данных в интервалах песчано-глинистых коллекторов. Демонстрация возможностей алгоритма проводится на практических материалах каротажа ПС со скважин месторождений Западной Сибири с привлечением результатов интерпретации данных ГИС и лабораторных исследований керна. Данные о пористости, водонасыщенности и емкости катионного обмена породы, используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Петрофизические параметры пластов-коллекторов, используемые при расчете синтетических сигналов ПС в интервале хх34–хх65

Кровля, м	Подошва, м	ϕ , д. ед.	S_w , д. ед.	CEC, Кл/кг
хх38	хх38.6	0.122	0.62	11550
хх39.4	хх40.1	0.183	0.584	9620
хх40.1	хх41.6	0.184	0.542	9620
хх41.6	хх42.2	0.181	0.611	9620
хх43.6	хх44.3	0.181	0.656	9610
хх44.3	хх44.8	0.188	0.660	9610
хх44.8	хх45.5	0.197	0.695	9610
хх45.5	хх46.4	0.188	0.806	9610
хх46.9	хх47.8	0.198	0.920	9610
хх48.5	хх49.3	0.176	0.969	9610
хх49.3	хх49.9	0.196	0.936	9610
хх49.9	хх51.5	0.162	0.999	9610
хх56.1	хх56.6	0.122	0.36	13850
хх60.6	хх61.3	0.166	0.604	13460
хх61.3	хх61.8	0.185	0.585	13460
хх61.8	хх62.6	0.214	0.535	13460
хх62.6	хх63.5	0.266	0.453	13460

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с практическими данными (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$), подтверждая эффективность разработанного алгоритма (рис. 2). В дальнейшем предложенный подход будет использован для разработки численного алгоритма решения обратной задачи ПС, который позволит восстанавливать петрофизические свойства пластов-коллекторов по практическим каротажным данным ПС.

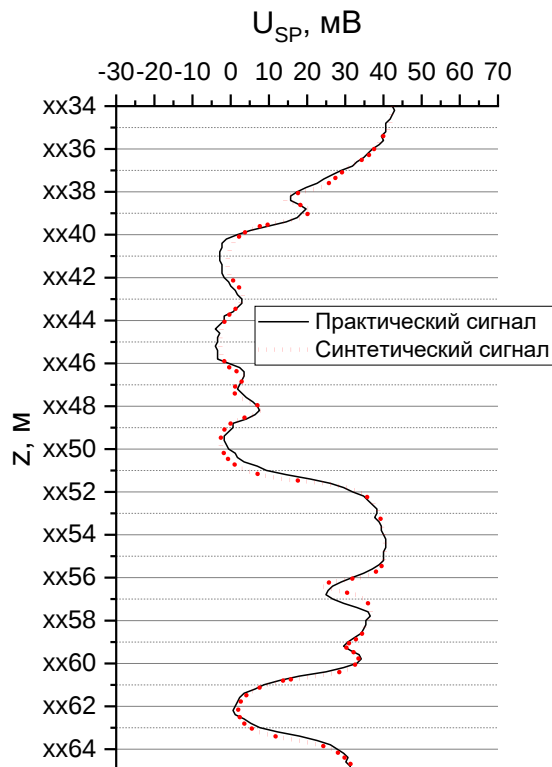


Рис. 2. Сравнение результатов численного моделирования сигналов ПС (пунктирная линия) и практических данных каротажа ПС (сплошная линия). Параметры модели: УЭС бурового раствора – 0.6 Ом·м, радиус скважины – 0.108 м, соленость пластовой воды – 25 г/л

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день каротаж ПС является одним из основных и востребованных на практике методов геофизических исследований геологических разрезов, вскрытых нефтегазовыми скважинами. В данной работе представлен обзор основных этапов создания последовательной и подробной физико-математической модели задачи ПС. Несмотря на то что первые теоретические исследования в области каротажа ПС были проведены вскоре после открытия явления в начале XX века, наиболее развитый подход к описанию сформировался только в последние десятилетия. На текущий момент выбор оптимальной модели задачи ПС позволяет связать наблюдаемые каротажные данные с петрофизическими свойствами геологической среды. Не менее важным аспектом развития метода ПС стало создание эффективных расчетных алгоритмов, необходимых для повышения качества интерпретации больших объемов каротажных данных. Представлен оригинальный алгоритм моделирования сигналов ПС, основанный на методе конечных элементов. По результатам численного моделирования показано, что предложенный алгоритм позволяет эффективно рассчитывать сигналы ПС в интервалах заглинизированных коллекторов. Проведено сравнение синтетических и практических данных каротажа ПС, полученных со скважин месторождений Западной Сибири. Выполненный анализ

ключевых работ, посвященных теоретическому описанию метода ПС, а также демонстрация возможностей современного программного обеспечения для анализа кривых каротажа ПС в сложных геологических условиях, позволяют сформулировать новые актуальные направления практического применения задачи ПС.

Исследовательская часть работы выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Дахнов В.Н.** Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 697 с.
- Кормильцев В.В.** Электрокинетические явления в пористых горных породах. – Екатеринбург, УНЦ АН СССР, 1995. – 48 с.
- Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н.** Теоретические и экспериментальные основы спонтанной поляризации горных пород в нефтегазовых скважинах. – Екатеринбург, УрО РАН, 2007. – 164 с.
- Arora T., Linde N., Revil A., Castermant J.** Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2007. – Vol. 92 (3–4). – P. 274–292, doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.01.018.
- Bautista-Anguiano J., Torres-Verdín C., Strobel J.** Mechanistic 3D finite-difference simulation of borehole spontaneous potential measurements // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85 (4). – P. D105–D119, doi: 10.1190/geo2019-0632.1.
- Doll H.G.** The S.P.Log: Theoretical analysis and principles of interpretation // *Transactions AIME*. – 1948. – Vol. 179. – P. 146–185, doi: 10.2118/949146-G.
- Епов М., Глинских А., Нечаев О.** Finite-element modeling of spontaneous potential in an axisymmetric reservoir model with account of its shale content // *Geosciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Article 30, doi: 10.3390/geosciences12010030.
- Hunt C.W., Worthington M.H.** Borehole electrokinetic responses in fracture dominated hydraulically conductive zones // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27 (9). – P. 1315–1318, doi: 10.1029/1999GL011099.
- MacAllister D.J., Graham M.T., Vinogradov J., Butler A.P., Jackson M.D.** Characterizing the self-potential response to concentration gradients in heterogeneous subsurface environments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124 (8). – P. 7918–7933, doi: 10.1029/2019JB017829.
- Maineult A., Bernabé Y., Ackerer P.** Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2006. – Vol. 86 (1–2). – P. 32–52, doi: 10.1016/j.jconhyd.2006.02.007.
- McCardell W.M., Winsauer W.O., Williams M.** Origin of the electric potential observed in wells // *Petroleum Transactions, AIME*. – 1953. – Vol. 198. – P. 41–50.
- Minsley B.J., Sogade J., Morgan F.D.** Three-dimensional source inversion of self-potential data // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112 (B2). – Article B02202, doi: 10.1029/2006JB004262.
- Revil A.** Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 212 (2). – P. 503–522, doi: 10.1006/jcis.1998.6077.
- Revil A.** Thermodynamics of ions and water transport in porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 307 (1). – P. 254–264, doi: 10.1016/j.jcis.2006.10.074.

- Revil A., Linde N.** Chemico-electromechanical coupling in microporous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 302 (2). – P. 682–694, doi: 10.1016/j.jcis.2006.06.051.
- Revil A., Jougnot D.** Diffusion of ions in unsaturated porous materials // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 319 (1). – P. 226–235, doi: 10.1016/j.jcis.2007.10.041.
- Revil A., Linde N., Cerepi A., Jougnot D., Matthäi S., Finsterle S.** Electrokinetic coupling in unsaturated porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 313 (1). – P. 315–327, doi: 10.1016/j.jcis.2007.03.037.
- Salazar J.M., Wang G.L., Torres-Verdín C., Lee H.J.** Combined simulation and inversion of SP and resistivity logs for the estimation of connate-water resistivity and Archie's cementation exponent // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73 (3). – P. E107–E114, doi: 10.1190/1.2890408.
- Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G.** A New contribution to subsurface studies by means of electrical measurements in drill holes // *Transactions of the AIME*. – 1933. – Vol. 110 (1). – P. 273–289.
- Segesman F.** New SP correction charts // *Geophysics*. – 1962. – Vol. 27 (6). – P. 815–828, doi: 10.1190/1.1439106.
- Sen P.N.** Unified model of conductivity and membrane potential of porous media // *Physical Review B*. – 1989. – Vol. 39 (13). – P. 9508–9517, doi: 10.1103/PhysRevB.39.9508.
- Sill W.R.** Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48 (1). – P. 76–86, doi: 10.1190/1.1441409.
- Stoll J., Bigalke J., Grabner E.W.** Electrochemical modelling of self-potential anomalies // *Surveys in Geophysics*. – 1995. – Vol. 16. – P. 107–120, doi: 10.1007/BF00682715.
- Woodruff W.F., Revil A., Jardani A., Nummedal D., Cumella S.** Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 183 (2). – P. 748–764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04770.x.
- Zhang G.J., Wang G.L.** A new approach to SP computation – vector potential approach // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 37 (4). – P. 2092–2098.

REFERENCES

- Arora T., Linde N., Revil A., Castermant J.** Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2007. – Vol. 92 (3–4). – P. 274–292, doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.01.018.
- Bautista-Anguiano J., Torres-Verdín C., Strobel J.** Mechanistic 3D finite-difference simulation of borehole spontaneous potential measurements // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85 (4). – P. D105–D119, doi: 10.1190/geo2019-0632.1.
- Dakhnov V.N.** Field geophysics. Methods of field geophysics, apparatus and equipment, electrical methods of wells investigation [in Russian]. – Gostoptekhizdat, Moscow, 1959. – 697 p.
- Doll H.G.** The S.P.Log: Theoretical analysis and principles of interpretation // *Transactions AIME*. – 1948. – Vol. 179. – P. 146–185, doi: 10.2118/949146-G.
- Epov M., Glinskikh A., Nechaev O.** Finite-element modeling of spontaneous potential in an axisymmetric reservoir model with account of its shale content // *Geosciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Article 30, doi: 10.3390/geosciences12010030.
- Hunt C.W., Worthington M.H.** Borehole electrokinetic responses in fracture dominated hydraulically conductive zones // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27 (9). – P. 1315–1318, doi: 10.1029/1999GL011099.

- Kormiltsev V.V.** Electrokinetic phenomena in porous rocks [in Russian]. – UNTS of the USSR Academy of Sciences, Yekaterinburg, 1995. – 48 p.
- Kormiltsev V.V., Ratushnyak A.N.** Theoretical and experimental bases of spontaneous polarization of rocks in oil and gas wells [in Russian]. – Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, 2007. – 164 p.
- MacAllister D.J., Graham M.T., Vinogradov J., Butler A.P., Jackson M.D.** Characterizing the self-potential response to concentration gradients in heterogeneous subsurface environments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124 (8). – P. 7918–7933, doi: 10.1029/2019JB017829.
- Maineult A., Bernabé Y., Ackerer P.** Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2006. – Vol. 86 (1–2). – P. 32–52, doi: 10.1016/j.jconhyd.2006.02.007.
- McCardell W.M., Winsauer W.O., Williams M.** Origin of the electric potential observed in wells // *Petroleum Transactions, AIME*. – 1953. – Vol. 198. – P. 41–50.
- Minsley B.J., Sogade J., Morgan F.D.** Three-dimensional source inversion of self-potential data // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112 (B2). – Article B02202, doi: 10.1029/2006JB004262.
- Revil A.** Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 212 (2). – P. 503–522, doi: 10.1006/jcis.1998.6077.
- Revil A.** Thermodynamics of ions and water transport in porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 307 (1). – P. 254–264, doi: 10.1016/j.jcis.2006.10.074.
- Revil A., Linde N.** Chemico-electromechanical coupling in microporous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 302 (2). – P. 682–694, doi: 10.1016/j.jcis.2006.06.051.
- Revil A., Jougnot D.** Diffusion of ions in unsaturated porous materials // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 319 (1). – P. 226–235, doi: 10.1016/j.jcis.2007.10.041.
- Revil A., Linde N., Cerepi A., Jougnot D., Matthäi S., Finsterle S.** Electrokinetic coupling in unsaturated porous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 313 (1). – P. 315–327, doi: 10.1016/j.jcis.2007.03.037.
- Salazar J.M., Wang G.L., Torres-Verdín C., Lee H.J.** Combined simulation and inversion of SP and resistivity logs for the estimation of connate-water resistivity and Archie's cementation exponent // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73 (3). – P. E107–E114, doi: 10.1190/1.2890408.
- Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G.** A New contribution to subsurface studies by means of electrical measurements in drill holes // *Transactions of the AIME*. – 1933. – Vol. 110 (1). – P. 273–289.
- Segesman F.** New SP correction charts // *Geophysics*. – 1962. – Vol. 27 (6). – P. 815–828, doi: 10.1190/1.1439106.
- Sen P.N.** Unified model of conductivity and membrane potential of porous media // *Physical Review B*. – 1989. – Vol. 39 (13). – P. 9508–9517, doi: 10.1103/PhysRevB.39.9508.
- Sill W.R.** Self-potential modeling from primary flows // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48 (1). – P. 76–86, doi: 10.1190/1.1441409.
- Stoll J., Bigalke J., Grabner E.W.** Electrochemical modelling of self-potential anomalies // *Surveys in Geophysics*. – 1995. – Vol. 16. – P. 107–120, doi: 10.1007/BF00682715.
- Woodruff W.F., Revil A., Jardani A., Nummedal D., Cumella S.** Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 183 (2). – P. 748–764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04770.x.

Zhang G.J., Wang G.L. A new approach to SP computation – vector potential approach // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 37 (4). – P. 2092–2098.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГЛИНСКИХ Анастасия Вячеславовна – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование данных электрокаротажа.

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование электромагнитных полей, решение обратных задач (методы глобальной оптимизации).

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2022 г.,
принята к публикации 15 декабря 2022 г.*



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ПОМОЩИ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Д.А. Бухтияров, В.Н. Глинских

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: dmitry.bukhtiyarov@yahoo.com*

В работе рассмотрены предпосылки создания установки электромагнитного зондирования грунта с приемной и передающей антеннами, разнесенными на расстояние до 100 метров. Температурные и частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости многослойного глинистого грунта исследованы в совокупности с результатами численного моделирования сверхширокополосных логопериодических антенн, погруженных в грунт на глубину 1.5 м. Обоснован выбор высоковольтного генератора и приемника импульсов, приведена структурная схема макетного образца установки. По результатам измерений осциллограмм и спектров сигналов с разносом антенн на 30 м с привязкой к температуре грунта даны оценки возможных пределов изменения электрофизических параметров глинистого грунта на геофизическом полигоне. Сделаны выводы о способах совершенствования установки для создания новой технологии импульсного электромагнитного мониторинга криолитозоны.

Сверхширокополосные логопериодические антенны, высоковольтные импульсные генераторы, комплексная диэлектрическая проницаемость, криолитозона, мониторинг многолетнемерзлых пород

PRELIMINARY RESULTS OF CLAY SOILS STATE MONITORING USING TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING APPARATUS

D.A. Bukhtiyarov, V.N. Glinskikh

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: dmitry.bukhtiyarov@yahoo.com*

The background for creating an electromagnetic soil sounding apparatus with receiving and transmitting antennas separated by a distance of up to 100 meters is considered in this paper. The temperature and frequency dependences of the complex dielectric permittivity of multilayer clay soil are studied in conjunction with the results of numerical simulation of ultra-wideband log-periodic antennas immersed in the soil to a depth of 1.5 m. The choice of a high-voltage generator and pulse receiver is studied, and a structure of apparatus prototype is given. Based on the results of oscillograms' and signal spectra measurements with 30 m antennas separation, and with reference to the soil temperature, estimates of the possible limits of change in the electrophysical parameters of the clay soil at a geophysical site are provided. Conclusions are drawn about ways to improve the apparatus in order to create a new technology for transient electromagnetic monitoring of permafrost.

Ultra-wideband log-periodic antennas, high-voltage pulse generators, complex permittivity, cryolithozone, permafrost monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Теория и техника георадиолокационного зондирования (Ground Penetrating Radar, GPR) непрерывно развивается и показывает значительные результаты во многих прикладных областях [Гринев,

2005; JoI, 2009]. Отличаясь от классической радиолокации, но в то же время во многом следуя ее основным принципам, несущий полезную информацию сигнал отражается от подземных объектов, неоднородных по своим электрофизическим параметрам. В средах со значительным затуханием электромагнитных волн (ЭМВ) для увеличения глубины зондирования (при наземном расположении передающей и приемной антенны, рис. 1, слева) или дальности межскважинного зондирования (при соответствующем расположении передающей и приемной антенны, рис. 1, справа) энергетический потенциал применяемых георадаров может быть увеличен за счет повышения чувствительности приемника (в меньшей степени) или за счет увеличения амплитуды импульса генератора (в большей степени) при одновременном уменьшении частот используемых сигналов до десятков МГц [Дудник, 2010].

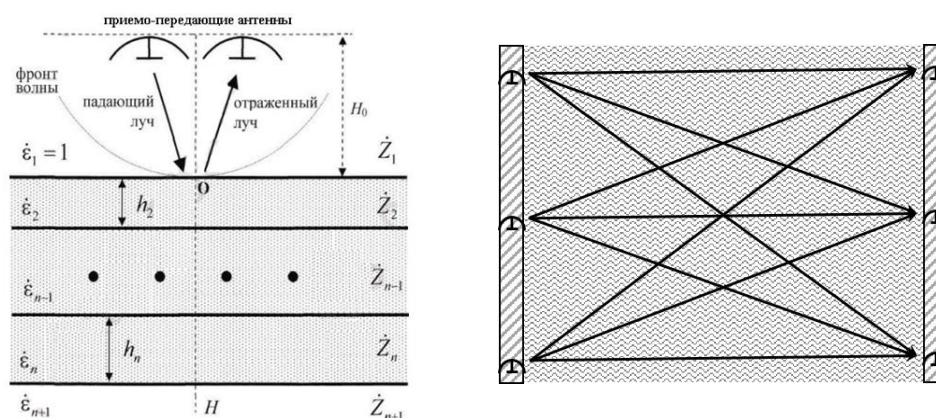


Рис. 1. Наземный (слева) и вертикально-скважинный (справа) способы размещения антенн георадара

Среди современных многофункциональных георадаров можно выделить приборы серий ОКО, Лоза, SIR, PulseEKKO, RAMAC/GPR, Зонд. Оценки их энергетического потенциала на уровне 120–140 дБ даны производителями [Дудник, 2010], при этом амплитуда импульсного сигнала увеличивается за счет сжатия его длительности и расширения спектра, следовательно, генератор и передающий тракт, как минимум до разъема антенны, должны строиться с учетом особенностей сверхширокополосных (СШП) радиосистем. По определению в [Беличенко и др., 2015], в таких системах относительная полоса частот $\eta = 2 \frac{f_{MAX} - f_{MIN}}{f_{MAX} + f_{MIN}}$ превышает значение 0.25, а коэффициент перекрытия по частоте $b = \frac{f_{MAX}}{f_{MIN}}$ превышает 3.

Задача мониторинга многолетней мерзлоты для предупреждения последствий ее деградации и предотвращения техногенных и экологических катастроф (вследствие подмывов дорог, фундаментов зданий и сооружений, образования карстовых полостей и т.д.) является чрезвычайно актуальной. Как следует из публикаций по данному вопросу [Стоянович и др., 2015], георадиолокационные исследования вечной мерзлоты позволяют успешно решать ряд вопросов, в том числе: определение границ залегания льда, измерение пластовой скорости в слоях льда. В то же время актуальным является их совершенствование в таких аспектах, как повышение автономности работы и минимизация участия технического персонала, особенно при увеличении размеров исследуемых объектов или повышении сложности рельефа вокруг них. Представляется [Эпов и др., 2011], что это возможно при разнесении нескольких приемных и передающих блоков, укомплектованных антеннами, в определенные точки исследуемой структуры (в пределе – до 100 м) на требуемой глубине. При этом на второй план отходят такие характеристики, как разрешающая способность георадара по глубине и идентифицируемые размеры неоднородностей грунта.

Цель данной работы – сравнительное описание исходных данных, необходимых для проектирования макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования, и результатов натурных экспериментов по частотно-избирательному распространению электромагнитных волн в приповерхностной толще на геофизическом полигоне в пос. Дорогино (Новосибирская область) в сезоны аградации и деградации грунтов. Для дальнейших работ по созданию программно-алгоритмической и технико-аппаратурной базы нового метода зондирования с управляемым токовым импульсом результаты экспериментов проверяются на соответствие как с уже опубликованными данными, так и с результатами численного трехмерного электродинамического моделирования.

МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ И ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

По результатам предварительно выполненных магнитного профилирования и электротомографии сделан вывод, что грунты приповерхностной толщи обустриваемого геофизического полигона являются преимущественно глинистыми. Для мониторинга их свойств в процессе замерзания и оттаивания на первом этапе на расстоянии 30 м были оборудованы шурфы глубиной 2 м, шириной 1.5 м и длиной 2.5 м, расположение которых с установленными сверху палатками показано на рис. 2.



Рис. 2. Геофизический полигон в пос. Дорогино. Расстояние между палатками над шурфами с приемо-передающей аппаратурой 30 м

Для зондирования толщи грунта на дальность 30 м необходимо было создать установку из источника и приемника сигнала с передающей и приемной антеннами соответственно. Рассмотрим основные исходные данные, принимаемые во внимание при проектировании установки.

При распространении ЭМВ в сплошных средах на больших масштабах можно ограничиться учетом относительной комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) ε , частотная зависимость которой для глинистых грунтов определяется выражением

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon' - i60\sigma c/f, \quad (1)$$

где ε' и ε'' являются действительной и мнимой частями проницаемости, σ – удельная проводимость среды [См/м], c – скорость света в вакууме, f – частота. Другим распространенным форматом представления составляющих КДП является тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'.$$
(2)

Обобщая результаты и рекомендации ряда работ [Jol, 2009; Бухцоож, 2010; Баскаков и др., 2021], в дальнейшем опишем среду распространения сигналов моделью в виде многослойного диэлектрика с различными значениями комплексных диэлектрических проницаемостей по вертикали, причем с одновременным увеличением глубины от 0 до 2 м влажность грунта должна возрасти до 30–35 % [Баскаков и др., 2021], в связи с чем на фиксированной частоте около 50–70 МГц при температуре +20 °С:

- действительная часть КДП равномерно возрастет с 2–4 на поверхности до 8–12 (характер роста останется близким к линейному с дальнейшим ростом влажности);
- мнимая часть КДП практически не изменится и составит около 12 (характер роста изменится на экспоненциальный с дальнейшим увеличением влажности).

В качестве удобного и точного инструмента для оперативного численного трехмерного моделирования распространения ЭМВ в слоистой среде может быть использовано специализированное программное обеспечение CST STUDIO SUITE [Курушин, 2014], возможности которого значительно расширяются при использовании встроенного языка программирования VBA (Visual Basic for Applications).

Экспериментально измеренные температурные зависимости КДП нескольких диэлектриков наглядно демонстрируются в работе [Saarenketo, 2006]. Следует пояснить, что на рис. 3 и 4 представлены данные измерений КДП для искусственной структуры дорожного полотна небольшой (до 20 м) ширины, в которой из-за чередования слоев, существенно различных по материальному составу, вышеупомянутая зависимость КДП от глубины залегания слоя (или его высоты по отношению к основанию дорожного полотна) не прослеживается. Однако при заметном промерзании всех слоев в зимнее время составляющие КДП уменьшаются до близких значений: действительная часть (рис. 3) до 3–5, удельная проводимость (рис. 4) до 5–10. На рисунках 3 и 4 хорошо прослеживаются процессы замерзания и оттаивания, а также суточные колебания значений, составляющих КДП.

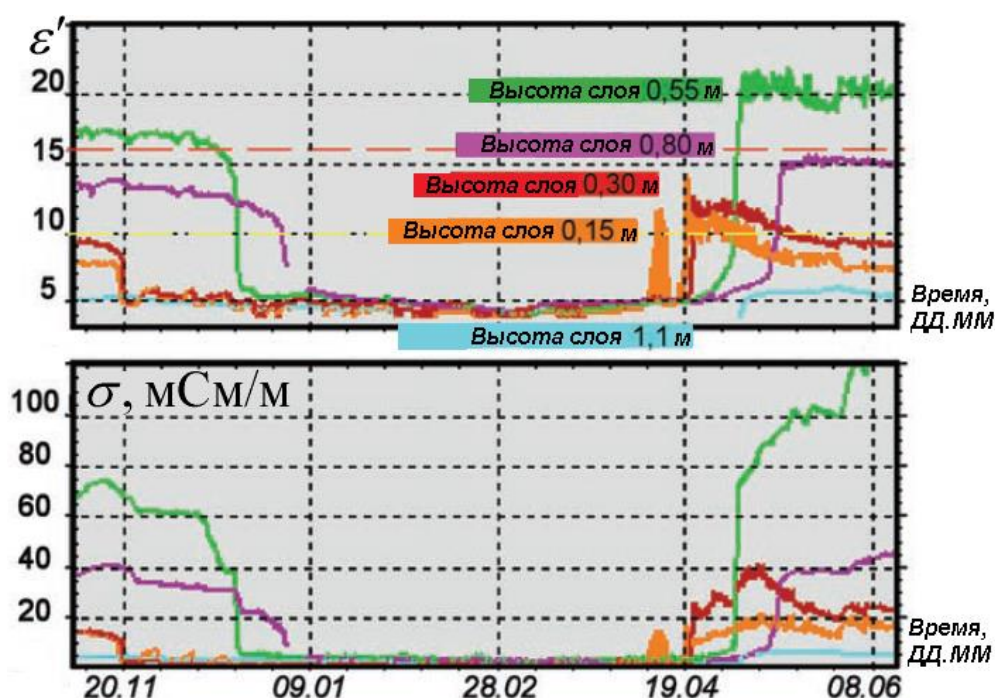


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости различных слоев полотна дороги от времени года (с ноября по июнь) по данным работы [Saarenketo, 2006]

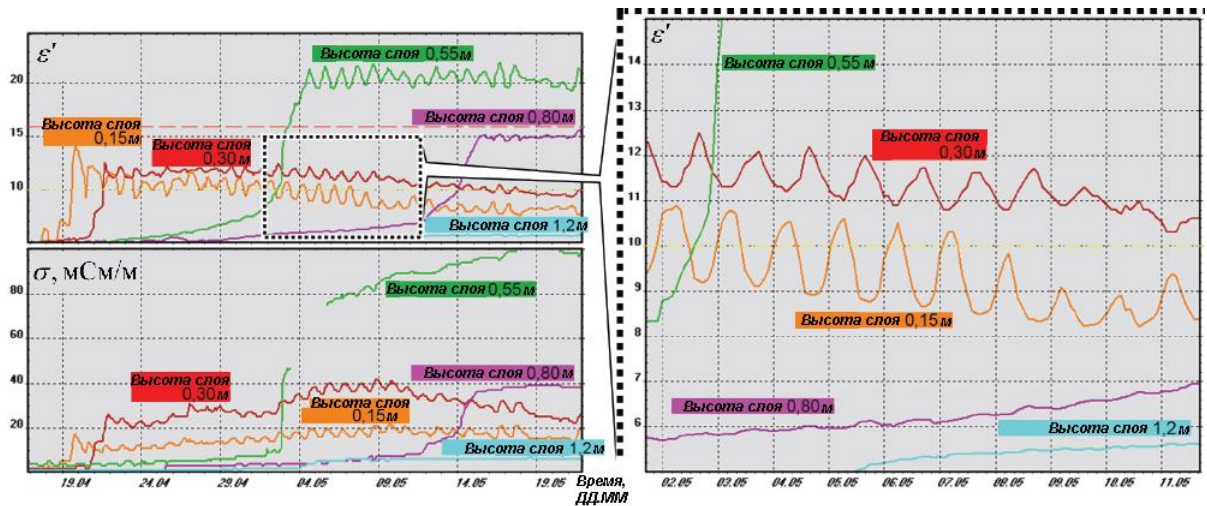


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости различных слоев полотна дороги от времени года (слева – с апреля по май, справа – с 2 по 11 мая) по данным работы [Saarenpketo, 2006]

Выводы о температурной зависимости составляющих КДП, сделанные выше, подтверждаются во многих других источниках. Например, согласно [Изюмов и др., 2008], коэффициент затухания однородной плоской ЭМВ длиной λ , определяемый как $\alpha = \pi \cdot \sqrt{\epsilon'} \cdot tg\delta / \lambda$, в суглинистых и глинистых грунтах уменьшается в 1.5–2 раза при уменьшении температуры грунта на 20 °С (при условии $T > 0$ °С).

МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ В ЧАСТИ ЗАВИСИМОСТИ ϵ ОТ ЧАСТОТЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

Для дальнейшего сравнения ограничимся двумя моделями глинистых грунтов с числом слоев, равным 15, и толщиной каждого слоя 13 см, в пакете CST STUDIO SUITE:

– первая модель для температуры +20 °С, действительная часть КДП линейно растет с 4.28 для слоя № 1 (граничит с верхним полубесконечным пространством) до 11 для слоя № 15, удельная проводимость всех слоев $\sigma = 50$ мСм/м;

– вторая модель для температуры –20°С, действительная часть КДП линейно растет с 4.04 для слоя № 1 (граничит с верхним полубесконечным пространством) до 4.64 для слоя № 15, удельная проводимость всех слоев $\sigma = 10$ мСм/м.

После ввода данных параметров в соответствующие настройки материалов CST STUDIO SUITE для каждого из 15 слоев автоматически будут построены графики частотных зависимостей составляющих КДП и тангенса угла диэлектрических потерь. Ниже приведены графики для слоя № 11 и температур –20 °С и +20 °С: на рис. 5 – мнимая часть КДП, на рис. 6 – тангенс угла диэлектрических потерь.

Механизм влияния частотной дисперсии глинистых грунтов на параметры распространения ЭМВ в достаточной степени изложен в [Изюмов и др., 2008]. На графиках тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 6) можно условно выделить две области: высокочастотную, где грунт является диэлектриком и $tg\delta \ll 1$, и низкочастотную, где грунт является проводником и $tg\delta \gg 1$. Сильное ослабление высокочастотных компонент сигнала приводит к явлению диффузного распространения ЭМВ. При этом в спектре принятого сигнала тем сильнее преобладают низкочастотные компоненты, чем меньше проводимость грунта. С уменьшением длительности импульса или размеров антенн можно увеличивать расстояние между ними, при этом будет наблюдаться устойчивый прием низкочастотной компоненты сигнала.

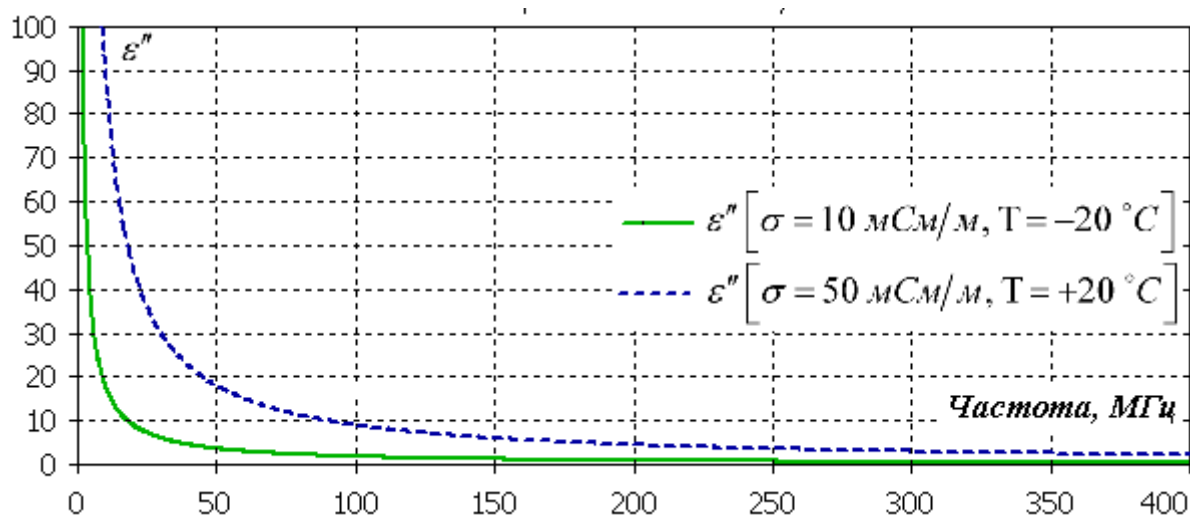


Рис. 5. Частотные зависимости мнимой составляющей КДП слоя глинистого грунта в CST STUDIO SUITE

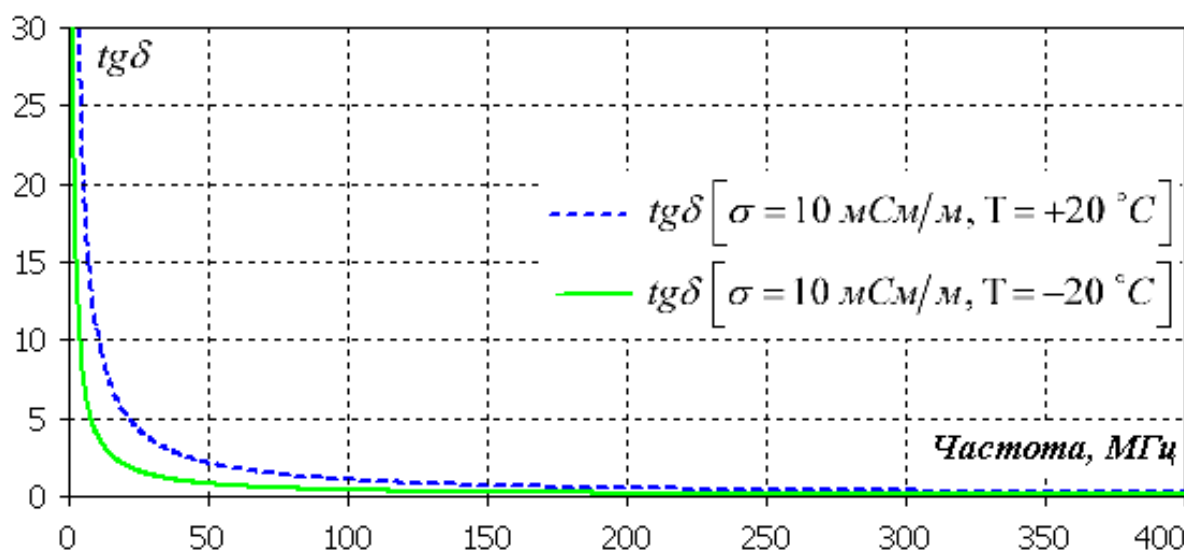


Рис. 6. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь слоя глинистого грунта в CST STUDIO SUITE

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН В ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЕ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ПАКЕТЕ CST STUDIO SUITE

Исходными параметрами для проектирования антенн установки импульсного электромагнитного зондирования является диапазон рабочих частот установки: с одной стороны, ожидаемые потери в глинистых грунтах делают невозможным распространение в среде сигналов с частотами выше 20 МГц; с другой стороны, при сжатии длительности импульса до 1 нс для увеличения его амплитуды верхняя граничная частота в спектре импульса достигнет 400 МГц. В связи с поисковым характером работ, когда параметры распространения ЭМВ в грунте не могут быть известны заранее, в первую очередь необходимо обеспечить приемлемые параметры передающей антенны как нагрузки высоковольтного генератора импульсов. Так, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) передающей антенны не должен превышать значения 2 в диапазоне частот от единиц до 400 МГц с целью исключения поражения узлов генератора отраженной мощностью.

С позиции выбора типа антенны по критерию минимального КСВН в широкой полосе частот линейные антенны, резистивно-демпфированные по закону Ву-Кинга [Газизов, 2013], уступают логопериодическим дипольным антеннам (ЛПДА), хотя при этом имеют несравнимо лучшие массо-габаритные характеристики. В связи с этим в качестве передающей и приемной антенн были использованы СШП ЛПДА, проводники которых изолированы от сплошной среды внутри герметичного радиопрозрачного корпуса. Структура антенны схематично показана на рис. 7.

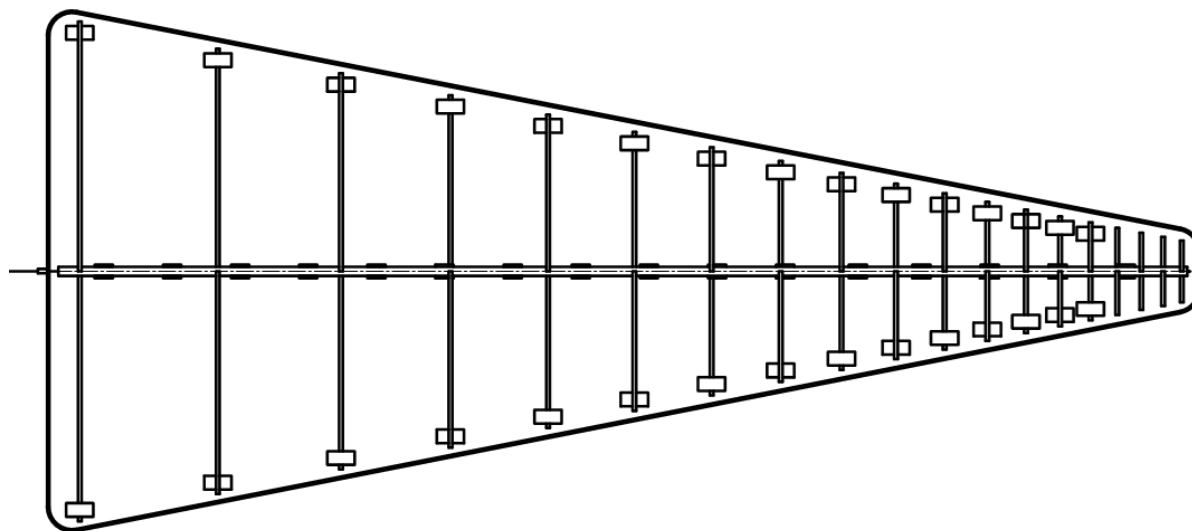


Рис. 7. Эскиз СШП ЛПДА со снятой крышкой (вид сверху)

На рисунке 7 к задней широкой части антенны подведен питающий коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, длиной 0.5 м. Внешние габариты антенны составляют 1156 x 2550 x 73 мм, антенна содержит 19 диполей. Излучение и прием СШП сигнала в виде периодической последовательности коротких импульсов в ЛПДА возможны благодаря выполнению принципа электродинамического подобия: при распространении ЭМВ по несущей двухпроводной линии в сторону от коротких диполей к длинным на каждой отдельно взятой частоте излучает так называемая активная зона антенны, содержащая резонирующий диполь с максимальным током и ближайшие с обеих сторон диполи (от 2 до 5) с током на 10 дБ меньше максимального. При изменении частоты активная зона перемещается вдоль антенны без сильного изменения своих относительных (в долях длины волны) размеров. Нижние и верхние плечи соседних диполей имеют гальванический контакт с различными проводниками несущей линии, которая со стороны низкочастотного диполя с наибольшей длиной нагружена на согласованный резистор 50 Ом. Продолжение питающего коаксиального кабеля размещено внутри нижней трубки и на входных клеммах (в передней узкой части антенны, со стороны самого короткого диполя, кабель распаян экранной оболочкой на нижнюю, а центральной жилой – на верхнюю трубку).

Анализ литературы показал, что подробных методик расчета конкретных геометрических параметров ЛПДА в сплошной среде не существует. Поэтому полностью параметрическая модель СШП ЛПДА создается в пакете CST STUDIO SUITE, а начальные значения параметров, определяющих облик антенны в первом приближении, рассчитываются на основе классической методики, изложенной в [Петров и др., 2005]. После задания размерностей, диапазона частот, параметров слоев, граничных условий и свойств материалов отдельные части антенны создаются на основе геометрических примитивов с

использованием возможностей встроенного языка VBA [Пластиков, 2012]. Далее создается симметричный порт возбуждения, генерируется сетка и выбирается решающее устройство во временной области с порогом стабильности, зависящим от длительности распространения сигналов (в пределе до -100 дБ). После этого стартовые значения геометрических параметров уточняются при помощи встроенного оптимизатора. Минимизируемая аддитивная целевая функция задается на основе частотных зависимостей КСВН антенны и напряженности поля в удаленной точке слоистой среды. Финальный облик модели антенны в слоистой среде показан на рис. 8, в левой части которого указаны значения действительной части КДП соответствующих слоев для температуры $+20^\circ\text{C}$.

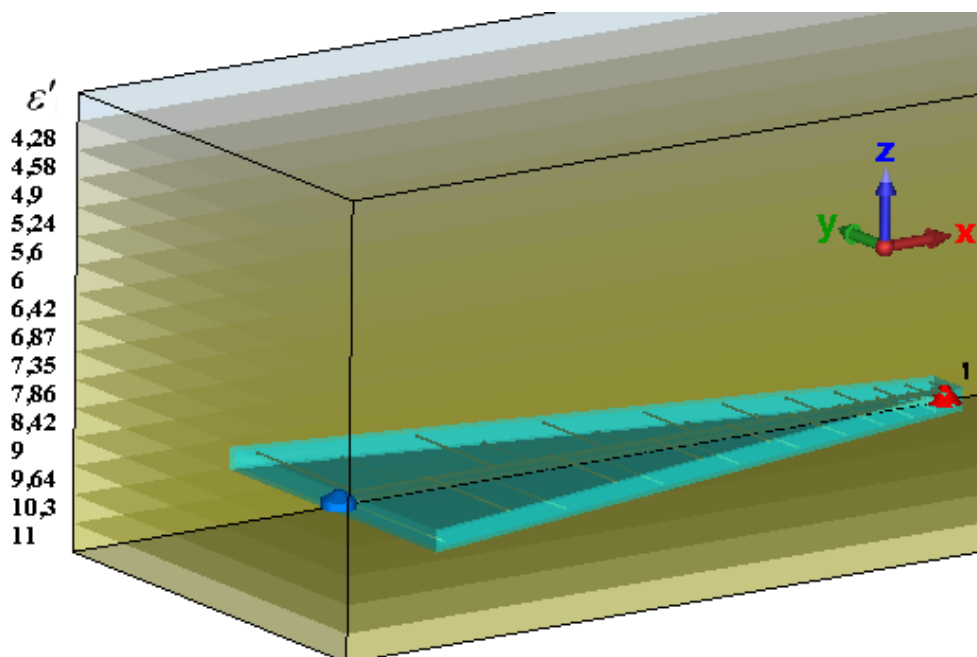


Рис. 8. Ориентация модели передающей антенны в слоистой среде

Приемная антенна размещается зеркально-симметрично по отношению к передающей, на одинаковой глубине, однако ограниченные вычислительные ресурсы и ряд особенностей используемых сеточных методов моделирования не позволяют получить корректные результаты при разnose антенн более чем на 6 м. В связи с этим, качественно опишем основные результаты моделирования: на рис. 9 представлены графики частотных зависимостей КСВН передающей антенны при разных температурах.

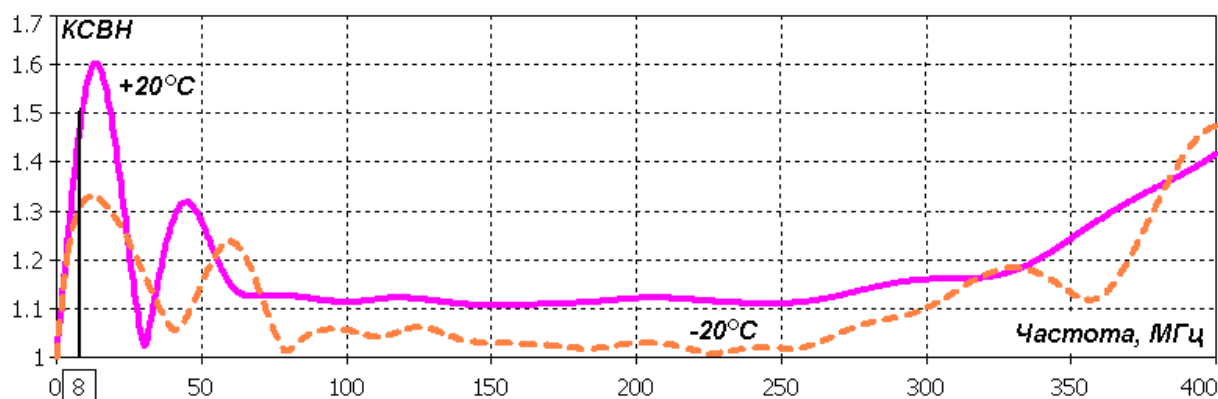


Рис. 9. Частотные зависимости КСВН передающей антенны при разных температурах

Как следует из данных рис. 9, в полосе частот от 0 (постоянный ток) до 400 МГц значение КСВН не превышает 1.6 при температуре +20°C, снижаясь с уменьшением температуры.

На рисунке 10 представлены графики частотных зависимостей мощности, поглощаемой в моделируемом объеме слоистой диэлектрической среды, нормированной на мощность на входе передающей антенны, при разных температурах.

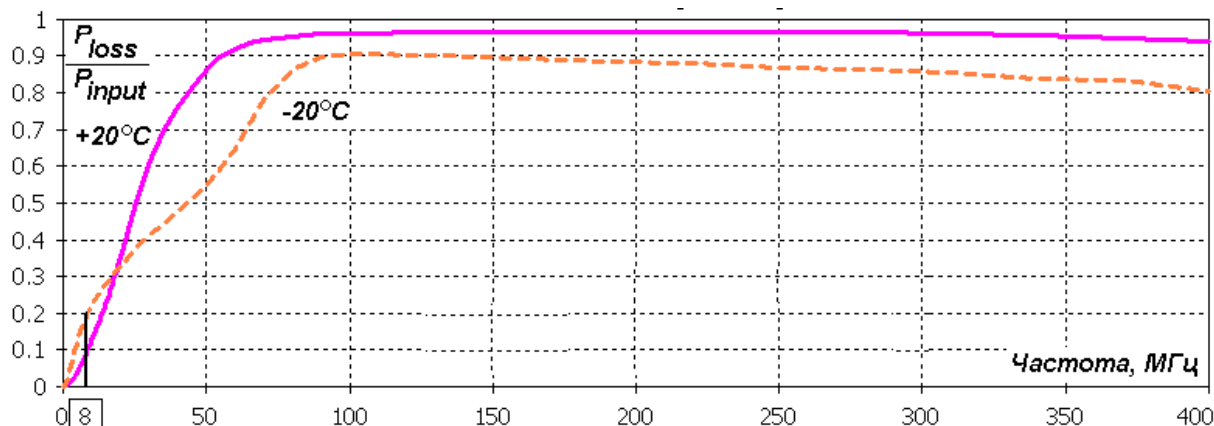


Рис. 10. Частотные зависимости потерь мощности сигнала в моделируемом объеме слоистой среды, нормированной к мощности на входе антенны

Данные на рис. 10 полностью соответствуют изложенным ранее для частот выше 20 МГц – с увеличением температуры поглощение мощности в среде возрастает. Небольшое расхождение в окрестности частоты 8 МГц объясняется тем, что преобладание других потерь (в основном на отражение, рис. 9) привели к снижению мощности излучения, поэтому она не могла быть поглощена в среде.

На рисунке 11 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи между антеннами при разных температурах, при этом приемнику с портом № 2 соответствует источник с портом № 1.

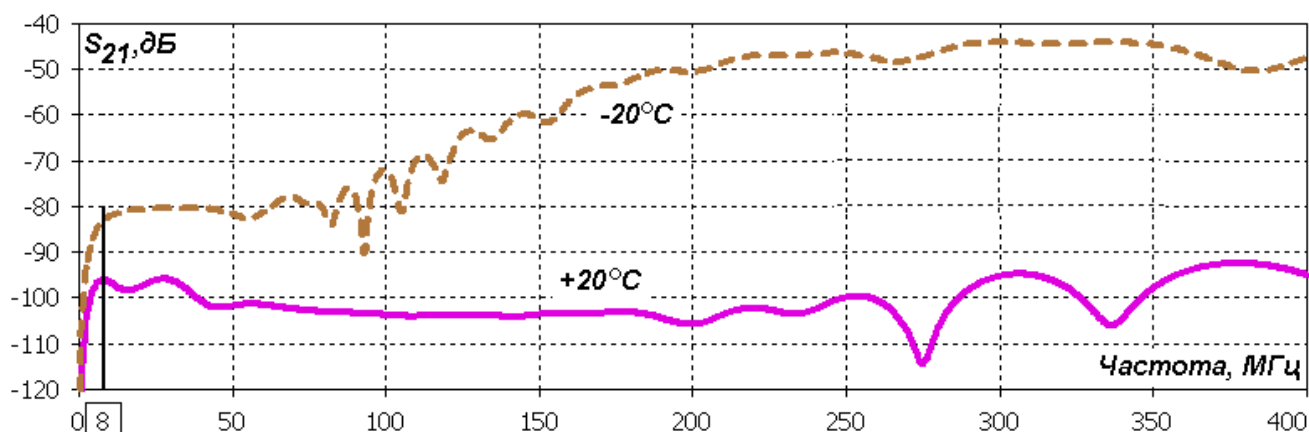


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициентов передачи между антеннами

При дальнейшем увеличении расстояния между антеннами высокие потери на частотах более 20 МГц приведут к уменьшению коэффициента передачи ниже –160 дБ при любой температуре, при этом в окрестности частот 7–12 МГц, даже при +20°C, коэффициент передачи будет выше –140 дБ, что полностью согласуется с ранее изложенной теорией.

Отражения зондирующего сигнала от наземных объектов, равно как и паразитный прием сигнала, распространяющегося по воздуху, являются известными проблемами георадиолокации; их решение на этапе обработки и интерпретации сигналов в значительной степени затруднено. Аппаратные способы предотвращения данных явлений не всегда реализуемы, однако в данной работе:

– при проектировании ЛПДА учитывались характеристики среды распространения ($KCBH \leq 1/6$), в то время как при размещении антенн в воздухе $KCBH$ превышает 2.5: вследствие этого сигнал, принятый на расстоянии 30 м и более, содержит множество копий значительно ослабленного (около -70 дБ) импульса высоковольтного генератора;

– далее при размещении антенн в шурфах измеряемый $KCBH$ снижается, при этом сигнал прямого прохождения затухает еще сильнее и более не регистрируется.

Пространственная зависимость электромагнитного поля, излучаемого ЛПДА, практически близка к изотропной на частотах ниже 150 МГц, далее с ростом частоты выше 200 МГц происходит фокусировка излучения в сторону от длинных диполей к коротким.

На основе полученных результатов моделирования, дополним ожидаемые результаты экспериментального зондирования: при любых температурах можно подобрать параметры генератора, приемника и трактов установки и добиться устойчивого приема сигналов в диапазоне частот 7–10 МГц. При этом оценка времени распространения сигнала в слоистом грунте на расстояние 30 м может быть дана согласно выражению для фазовой скорости ЭМВ в сплошной среде [Curtis et al., 1995] для температуры -20°C :

$$\begin{aligned} \tau|_{-20^\circ\text{C}} = 30\text{м}/v_{\text{фаз}} &= \frac{\beta \cdot 30\text{м}}{\omega} = \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}}{c} = \\ &= \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{4,45}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{18,7}{4,45}\right)^2} + 1 \right)}}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})} = 334 \text{ нс}, \end{aligned} \quad (3)$$

и для температуры $+20^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} \tau|_{+20^\circ\text{C}} = 30\text{м}/v_{\text{фаз}} &= \frac{\beta \cdot 30\text{м}}{\omega} = \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}}{c} = \\ &= \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{8,4}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{93}{8,4}\right)^2} + 1 \right)}}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})} = 714 \text{ нс}. \end{aligned} \quad (4)$$

Конкретные значения составляющих ε' и ε'' КДП в (3) и (4) соответствуют частоте 9.6 МГц на рис. 5 и 6. Данная оценка качественно совпадает с результатами трехмерного моделирования, где с увеличением температуры задержка также возросла, но всего лишь на 35 % – по причине гораздо меньшего расстояния между антеннами, что отражено в недостаточном ослаблении высокочастотных составляющих сигнала на рис. 11 при температуре -20°C .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Основой создания установки с требуемым потенциалом является обеспечение как можно большей амплитуды импульса высоковольтного генератора ударного возбуждения передающей антенны. Упрощенная структурная схема большинства подобных генераторов представлена на рис. 12.

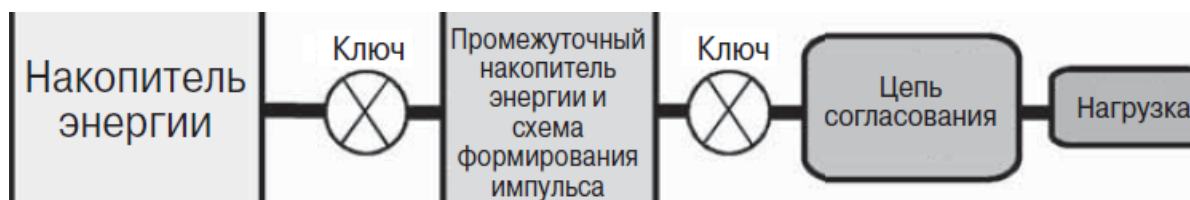


Рис. 12. Упрощенная структурная схема высоковольтного генератора

При увеличении амплитуды импульса до единиц и десятков киловольт длительность импульса может уменьшаться с сотен до единиц наносекунд. Исходя из требований к надежности ключей генератора, частота следования импульсов не может превышать 10–20 кГц. В процессе исследования современных технологий генерации высоковольтных импульсов было рассмотрено применение как электровакуумных ключей (газоразрядных приборов), так и полупроводниковых ключей. Среди последних можно выделить серийно выпускаемые п-р-п транзисторы в режиме лавинного пробоя, специализированные лавинные транзисторы, кремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ).

Для создания макетного образца установки было решено использовать генератор PPM0731 производства ООО «Мегаимпульс». По результатам выходного контроля установлены основные параметры: амплитуда импульсов 6.45 кВ, ширина импульса на полувысоте 400 пс, максимальная частота повторения 10.8 кГц. Достоинствами генератора являются высокая скорость нарастания выходного напряжения, минимальный джиттер, высокие значения КПД, компактности и надежности. Осциллограмма импульса представлена на рис. 13, соответствующий ей спектр – на рис. 14.

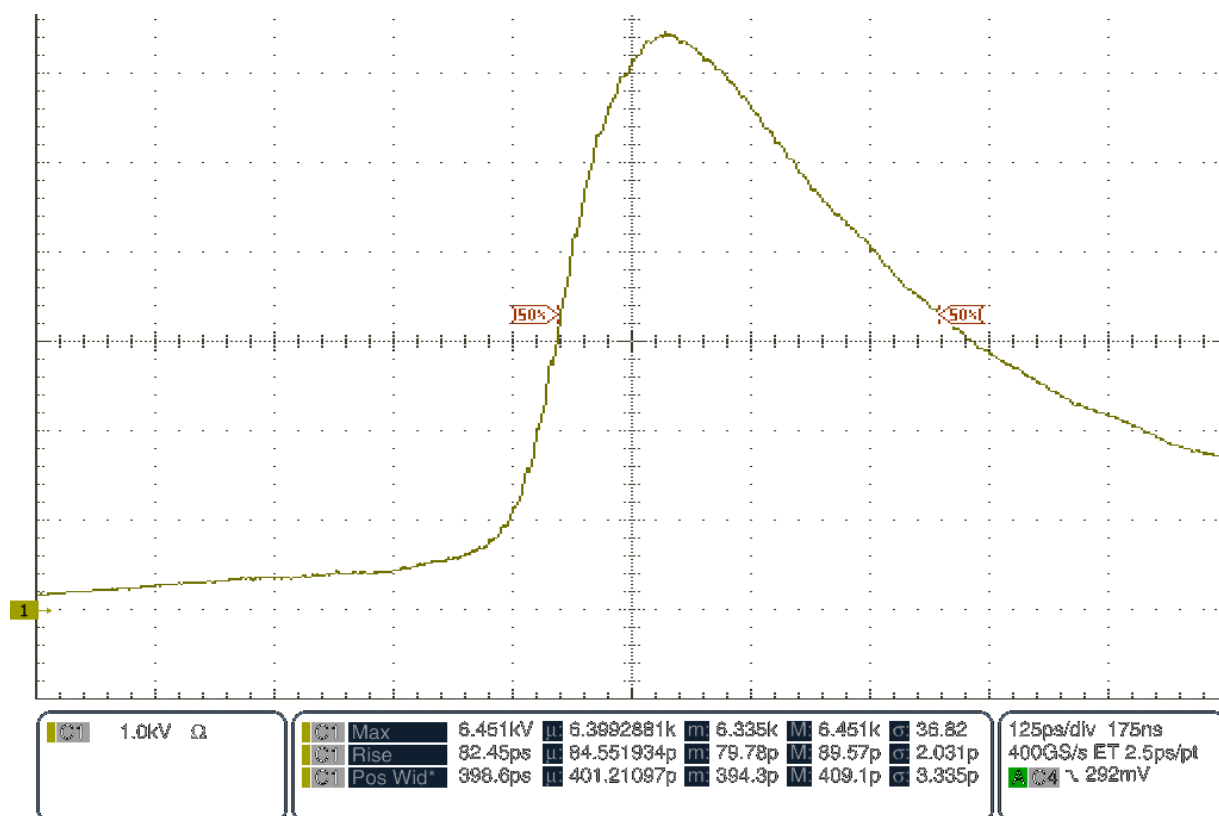


Рис. 13. Осциллограмма импульса высоковольтного генератора PPM0731 (125 пс/деление, размах 6.5 кВ)

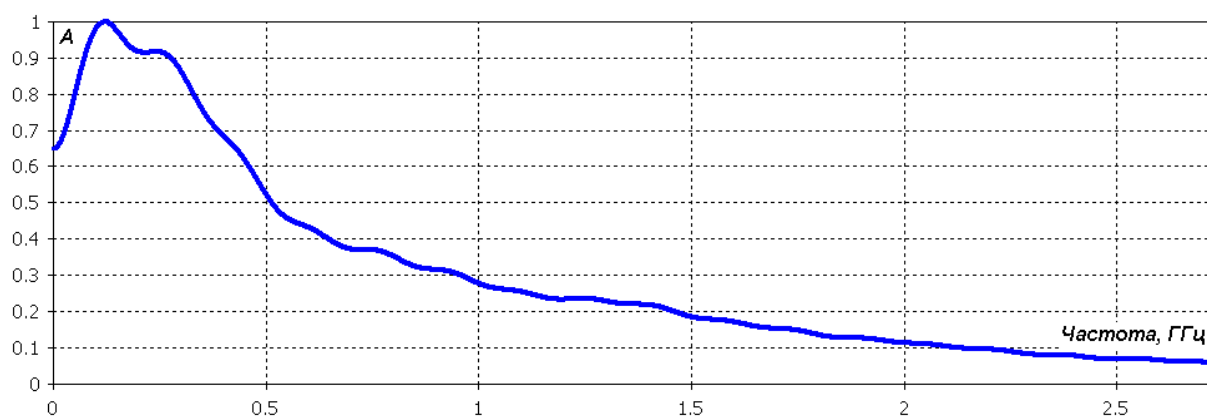


Рис. 14. Нормированный спектр импульса высоковольтного генератора PPM0731

В соответствии с изложенными ранее ожидаемыми результатами, длительность отдельных всплесков импульса, прошедшего сквозь исследуемый грунт, увеличится с единиц до десятков наносекунд, что, в совокупности с необходимостью максимально точного измерения задержки времени прихода ЭМВ через грунт, не снижает требования к быстродействию и термостабильности приемника в широком диапазоне температур.

Для создания макетного образца установки анализировались решения таких производителей, как Keysight (Agilent Technologies), Amplifier Research, Anritsu, Keithley Instruments, LeCroy, Rohde & Schwarz, Tektronix, АКИП, Актаком. Наиболее доступными признаны измерительные приборы производства компании Pico Technology, на отечественном рынке представленные под торговой маркой АКИП. В результате было решено использовать стробоскопический осциллограф АКИП-4112/2, параметры которого превосходят все имеющиеся требования к приемнику установки.



Рис. 15. Внешний вид высоковольтного генератора PPM0731 (слева) и стробоскопического осциллографа АКИП-4112/2 (справа)

Исходя из реальной чувствительности осциллографа 3.7 мВ, нижняя оценка энергетического потенциала установки составляет $20 \log \left(\frac{6500 \text{ В}}{3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right) = 124,9 \text{ дБ}$. Предполагается, что в реальности потенциал будет больше, в том числе за счет коэффициента усиления антенн, однако его расчет (тем более измерение) является чрезвычайно сложной задачей. Потенциал также может быть увеличен при включении маломощного СШП-усилителя непосредственно на выход приемной антенны.

Структурная схема макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования представлена на рис. 16.

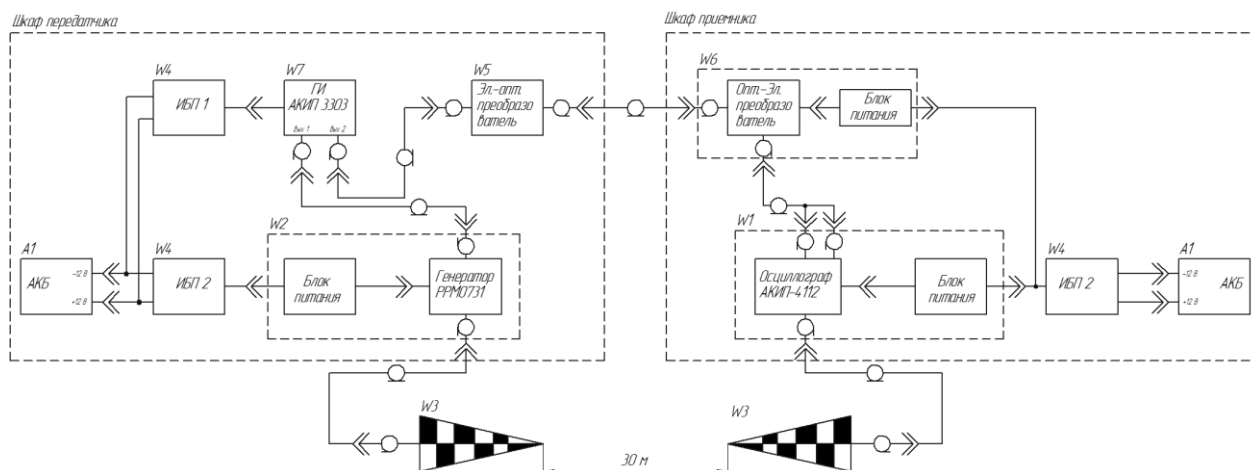


Рис. 16. Структурная схема макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования

На рисунке 16, помимо описанных выше антенн, генератора и приемника, можно отметить вспомогательные элементы: источники бесперебойного питания, аккумуляторные батареи, электрооптический и оптико-электронный конвертеры сигналов, генератор импульсов запуска и синхронизации, а также комплекты стандартных кабельных сборок.

Внешний вид шурфов, в которых размещались антенны и приемно-передающее оборудование установки, показаны на рис. 17 в летнее время: ранее извлеченный из шурфов грунт для удобства расфасован по мешкам. В дальнейшем шурфы заполняются грунтом как можно более плотно, в шурфах также остаются контейнеры, герметично закрытые и связанные с поверхностью только оптоволоконными кабелями.



Рис. 17. Внешний вид шурфов перед началом исследований

Часть оборудования установки в виде разворачиваемого стенда размещается на поверхности и, в том числе, ноутбук со специализированным программным обеспечением: для контроля и управления осциллографом и генераторами, для управления реле узлов электропитания аппаратуры. Для регистрации температуры рядом с одним из шурфов была вырыта скважина глубиной 2 м, в которой размещен кабель с термодатчиками. Скважина заполнена грунтом как можно более плотно. Длина кабеля и количество датчиков позволяет регистрировать температуру на поверхности и глубинах 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 и 2.0 м. Термодатчики кабеля подключаются к ноутбуку установки, что позволяет оперативно регистрировать данные в виде «время – температура» одновременно с сохранением осциллограммы принятого сигнала.

Работа с установкой в основном предполагает измерение температуры, запуск высоковольтного генератора на время, достаточное для настройки параметров приемника, сохранение осциллограммы и выключение генератора.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 1 представлены результаты измерений температуры (°C) на разных глубинах в разные дни; всего было проведено 11 измерений.

Таблица 1

Зависимость температуры от времени измерения на разных глубинах

Глубина	0.0м	0.05м	0.1м	0.2м	0.3м	0.5м	0.7м	1.0м	1.5м	2.0м
Дата										
28.01.2022	13.31	11.62	7.94	7.62	6.12	4.50	3.62	0.62	1.31	2.81
04.02.2022	15.81	9.38	7.06	7.00	5.94	4.88	4.38	1.50	0.81	2.44
11.02.2022	17.31	15.56	12.12	11.12	9.06	6.88	5.50	2.12	0.44	2.06
17.02.2022	9.94	9.94	8.25	8.62	7.50	6.56	6.06	3.00	0.12	1.75
24.02.2022	6.69	7.38	6.31	6.94	6.12	5.44	5.25	2.75	0.19	1.44
04.03.2022	7.19	7.25	5.69	6.19	5.31	4.56	4.44	2.31	0.38	1.19
10.03.2022	6.88	6.56	4.38	4.44	3.69	3.12	3.56	2.00	0.44	1.06
17.03.2022	9.44	9.69	7.62	7.62	6.38	5.06	4.62	2.31	0.44	0.94
24.03.2022	5.56	6.31	5.19	6	5.38	4.62	4.81	2.62	0.62	0.81
01.04.2022	0.69	2.25	2.75	3.94	3.56	3.38	3.81	2.12	0.69	0.69
08.04.2022	0.25	1.12	0.19	1.12	1	1.12	2.06	1.19	0.5	0.62

Анализ данных в табл. 1 наглядно демонстрирует то, что добиться глубокого промерзания грунта на полигоне не удалось, и на большинстве глубин, включая глубину размещения антенны, температура изменяется в небольших пределах. С учетом этого далее приведем результаты экспериментов. Целесообразно представить осциллограмму с максимальной зарегистрированной амплитудой на рис. 18,

поскольку осциллограммы, измеренные в другие дни, качественно совпадают с ней по форме и весьма незначительно отличаются по длительности огибающей и положению отдельных полуволн на оси времени.

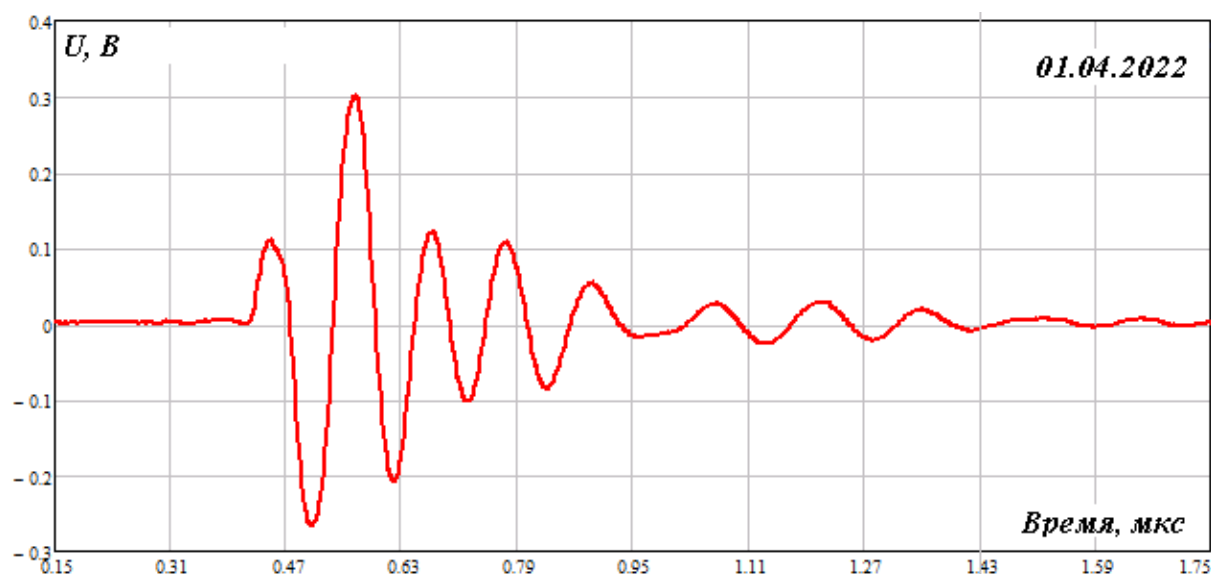


Рис. 18. Осциллограмма сигнала на выходе приемной антенны. Дата измерения 01.04.2022

Тем не менее, при построении в левой части рис. 19 временных зависимостей температур слоев, а в правой части – максимальных амплитуд осциллограмм сигналов, измеренных в соответствующие дни, можем качественно увидеть, что с уменьшением температуры на глубинах 1–2 м максимальная регистрируемая амплитуда возрастает в полном соответствии с теорией. При небольшом росте температуры в последний день амплитуда уменьшилась значительно, что можно объяснить неточностью измерений.

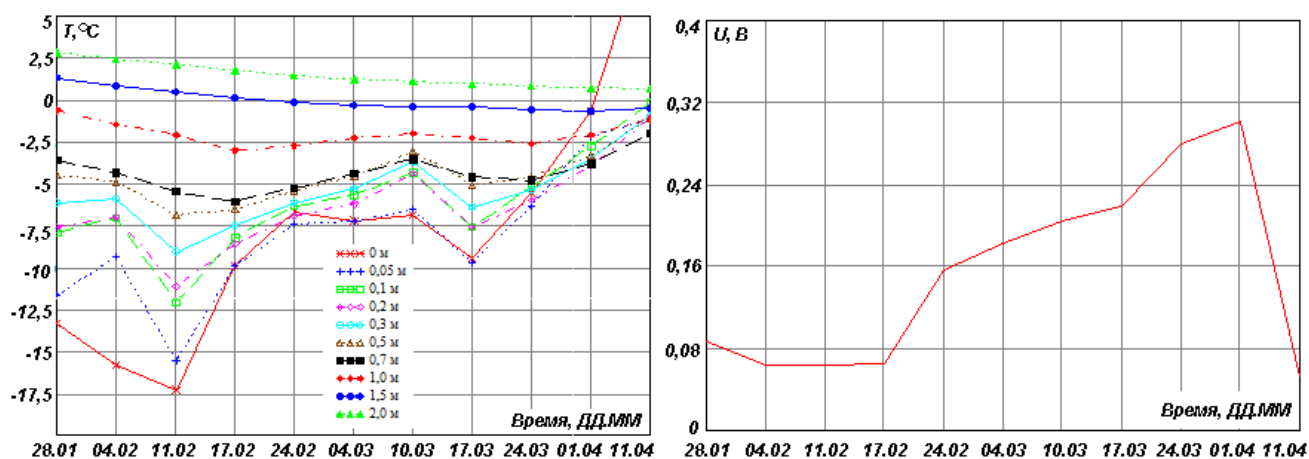


Рис. 19. Временные зависимости температур слоев грунта (слева) и максимальной зарегистрированной амплитуды принятого сигнала (справа)

Далее, при анализе спектров принятых сигналов на рис. 20–30, необходимо определить, действительно ли при снижении температуры более ярко выраженной становится условно низкочастотная (левее максимума) часть спектра, и наоборот.

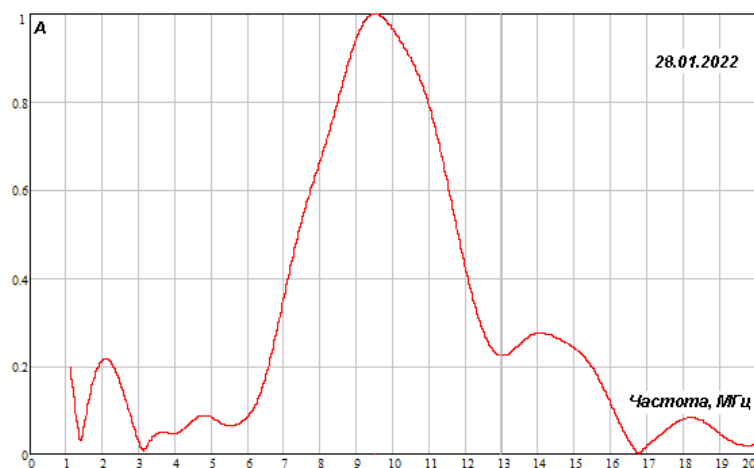


Рис. 20. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 28.01.2022, температура +1.31 °С на глубине 1.5 м

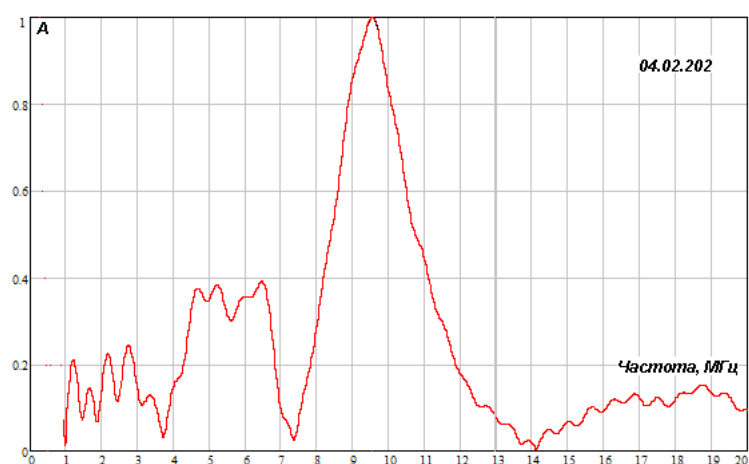


Рис. 21. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 04.02.2022, температура +0.81 °С на глубине 1.5 м

На рисунке 21 низкочастотные компоненты более выражены по сравнению с рис. 20, однако характер изменений достаточно резкий по сравнению с незначительным падением температуры.

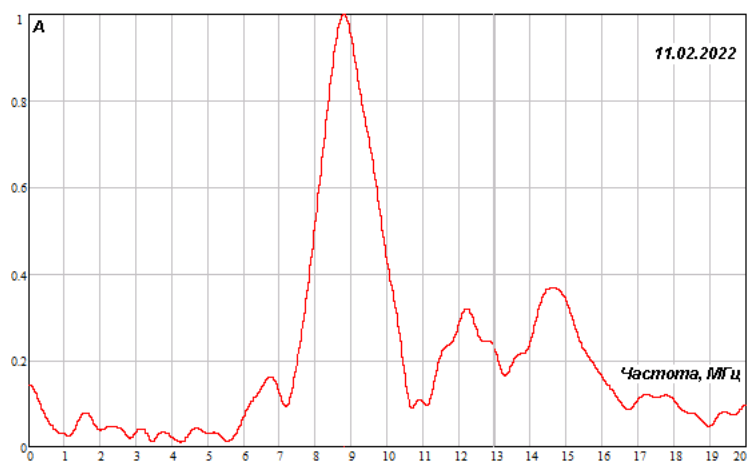


Рис. 22. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 11.02.2022, температура +0.44 °С на глубине 1.5 м

На рисунке 22 в спектре вновь преобладает высокочастотная область, можно лишь отметить уменьшение частоты максимума спектра на 0.7 МГц.

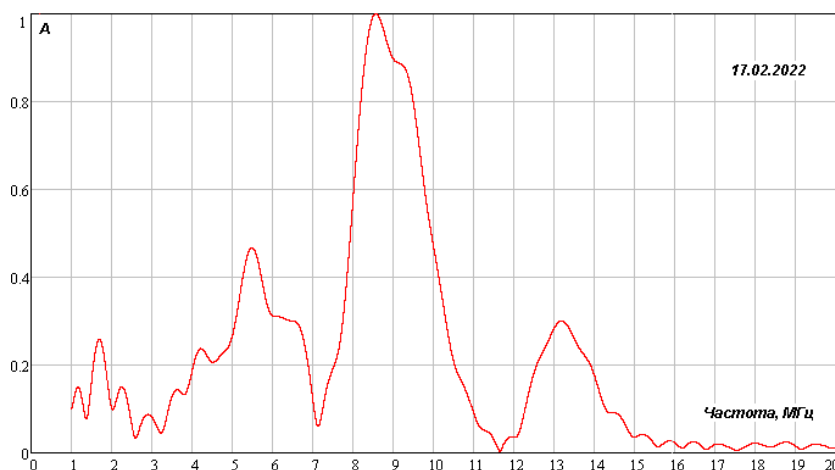


Рис. 23. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 17.02.2022, температура $+0.12^{\circ}\text{C}$ на глубине 1.5 м

На рисунке 23 низкочастотная область преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра уменьшилась еще на 0.22 МГц.

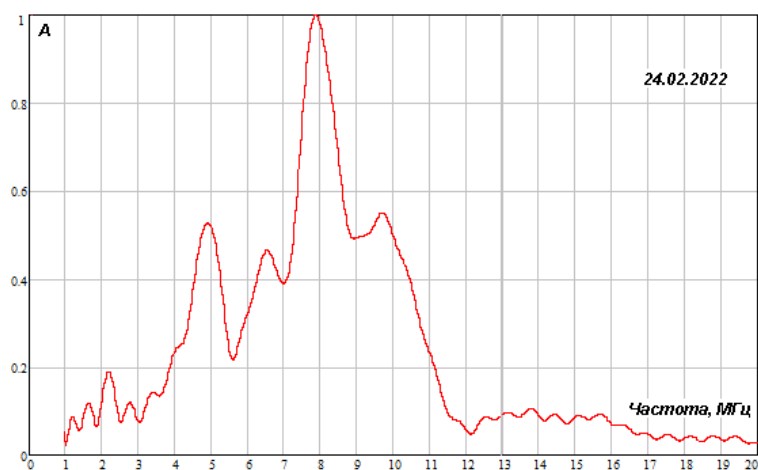


Рис. 24. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 24.02.2022, температура -0.19°C на глубине 1.5 м

На рисунке 24 низкочастотная область значительно преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра уменьшилась еще на 0.7 МГц.

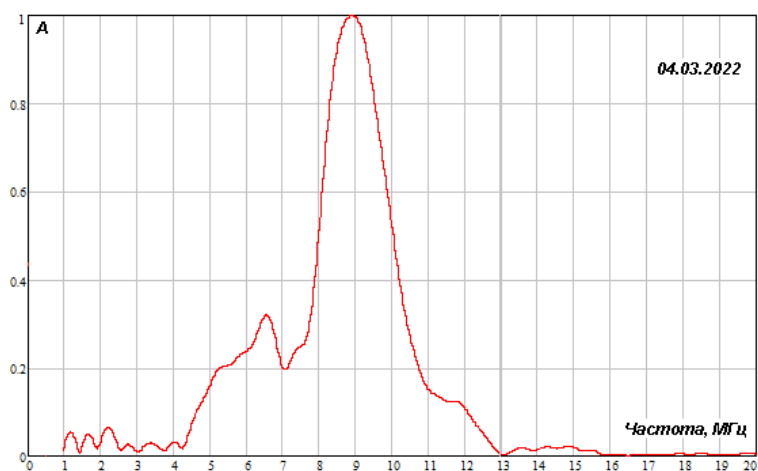


Рис. 25. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 04.03.2022, температура -0.38°C на глубине 1.5 м

На рисунке 25 низкочастотная область значительно преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра увеличилась.

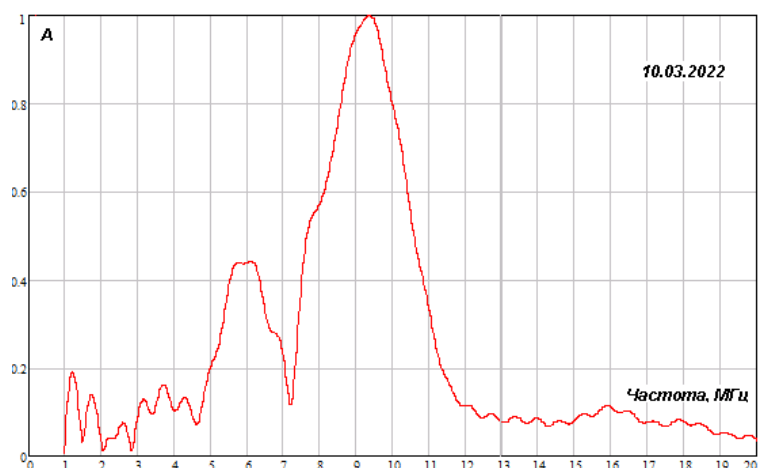


Рис. 26. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 10.03.2022, температура -0.44°C на глубине 1.5 м

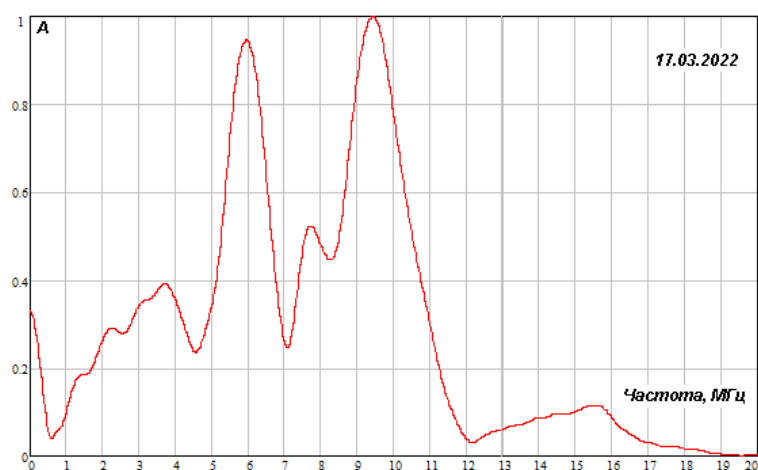


Рис. 27. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 17.03.2022, температура -0.44°C на глубине 1.5 м

На рисунках 26–27 низкочастотные области преобладают над высокочастотными столь значительно, что побочный пик спектра слева от основного максимума может сравняться с ним по уровню. На рисунках 28–30 побочный пик еще выражен заметно, но его уровень начинает снижаться вместе с замедлением падения температуры слоя.

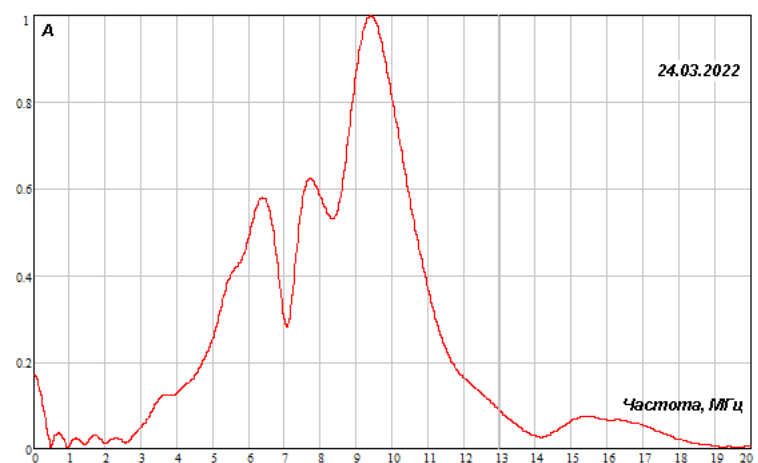


Рис. 28. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 24.03.2022, температура -0.62°C на глубине 1.5 м

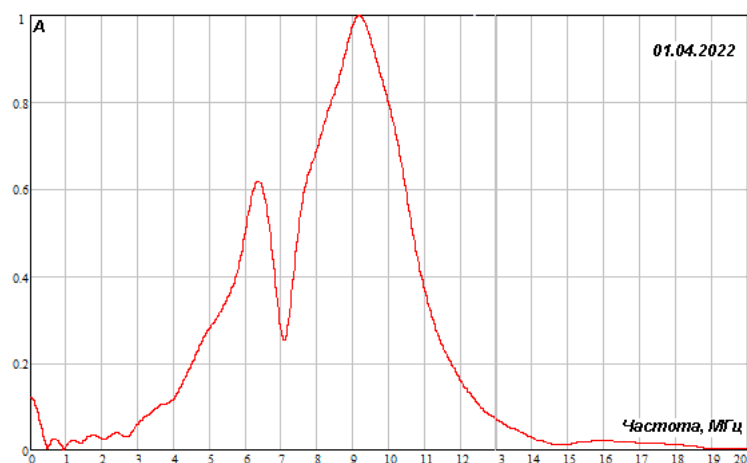


Рис. 29. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 01.04.2022, температура -0.69°C на глубине 1.5 м

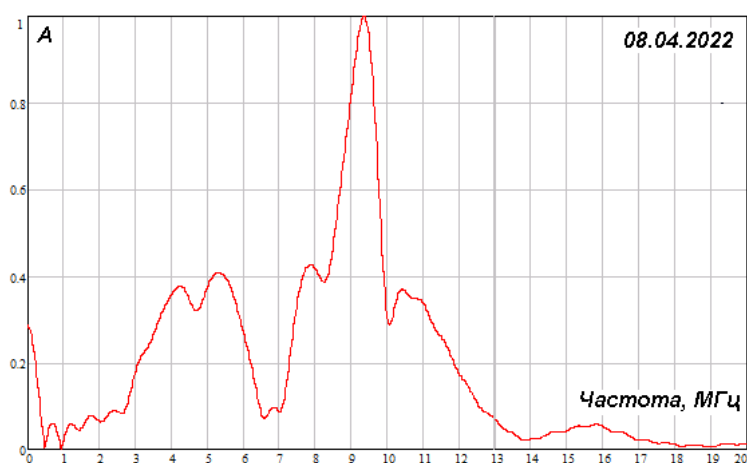


Рис. 30. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 08.04.2022, температура -0.5°C на глубине 1.5 м

Полученные результаты качественно подтверждают то, что с уменьшением температуры слоя грунта на глубине размещения антенны также уменьшается проводимость диэлектрика, в результате меньшее затухание испытывают условно «низкочастотные» спектральные составляющие сигнала – слева от максимума, и наоборот.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные данные качественно соответствуют известным классическим закономерностям и результатам численного моделирования. Модернизация установки импульсного электромагнитного зондирования в части повышения точности измерений пределов изменения усредненных параметров среды и воспроизводимости экспериментов при увеличении расстояния между антеннами до 100 м планируется на следующем этапе. Одновременно с этим планируется привлечение методов машинного обучения для анализа временного и спектрального окраса принятых сигналов, интерпретация которых позволит получить дополнительные данные.

Измерения разности задержек распространения сигнала в грунте и по оптоволокну будут выполнены после модернизации установки. В рамках модернизации предполагается снижение массогабаритных показателей антенн и передаточного оборудования, а также упрощение способа закладки/извлечения антенн и оборудования из шурфов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны», <https://rscf.ru/project/22-17-00181/>.

ЛИТЕРАТУРА

Баскаков А.И., Одсурэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 7, doi: 10.30898/1684-1719.2021.7.10.

Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. – Новосибирск: Наука, 2015. – 483 с.

Бухцоож О. Комплексирование радиолокационной системы подповерхностного зондирования для повышения информативности и улучшения результатов измерения путем модификации приемного тракта георадара // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 5. – 15 с., <http://jre.cplire.ru/jre/may10/4/text.pdf>.

Газизов Т.Т. Синтез оптимальных проводных антенн. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 120 с.

Гринев А.Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. – М.: Радиотехника. – 2005. – 416 с.

Дудник А.В. Методы оптимизации энергетического потенциала радиотехнических приборов подповерхностного зондирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Москва, 2010. – 131 с.

Исюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.

Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. – М.: One Book, 2014. – 434 с.

Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин Е.В. Логопериодические вибраторные антенны: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 239 с.

Пластиков А.Н. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Часть 2. Особенности моделирования ЛПВА в среде CST Microwave Studio // Современная электроника. – 2012. – № 4. – С. 52–56.

Стоянович Г.М., Пупатенко В.В., Сухобок Ю.А. Поиск погребенных льдов методом георадиолокации при реконструкции железных дорог // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах (Новосибирск, 24–26 сентября 2015 года): Материалы симпозиума. – Новосибирск, 2015. – С. 78–84.

Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 114 с.

Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J.B. Effect of soil composition on dielectric properties. – US Army Corps Eng. Waterw. Exp. Station, Vicksburg, MS, 1995 – Tech. Rep. EL-95-34.

Jol H.M. Ground penetrating radar: theory and applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 543 p.

Saarenketo T. Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys. PhD Thesis. – Acta Universitatis Ouluensis, 2006. – 121 p.

REFERENCES

Baskakov A.I., Odsuren B., Komarov A.A., Tuvdendoorz G. Energy characteristics of a ground penetrating radar on an unmanned carrier for searching for an aquifer in arid regions // Journal of Radioelectronics [electronic journal]. – 2021. – Vol. 7, doi: 10.30898/1684-1719.2021.7.10.

- Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I.** Ultrawideband pulsed radio systems. – Nauka, Novosibirsk, 2015. – 483 p.
- Bukhtsoozh O.** Integration of a subsurface sounding radar system to increase the information content and improve the measurement results by modifying the GPR receiving path // Journal of Radioelectronics. – 2010. – Vol. 5. – 15 p., <http://jre.cplire.ru/jre/may10/4/text.pdf>.
- Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J.B.** Effect of soil composition on dielectric properties. – US Army Corps Eng. Waterw. Exp. Station, Vicksburg, MS, 1995 – Tech. Rep. EL-95-34.
- Dudnik A.V.** Methods for optimizing the energy potential of radio engineering devices for subsurface sounding. PhD Thesis. – Moscow, 2010. – 131 p.
- Epov M.I., Mironov V.L., Muzalevsky K.V.** Ultra-wideband electromagnetic sounding of an oil and gas reservoir. – Publishing House of the SO RAN, Novosibirsk, 2011. – 114 p.
- Gazizov T.T.** Synthesis of optimal wired antennas. – Tomsk, 2013. – 120 p.
- Grinev A.Yu.** Issues of subsurface radar. – Radiotekhnika, Moscow, 2005. – 416 p.
- Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesensky A.S.** Theory and methods of ground penetrating radar: Textbook. – Publishing house "Mining book", Moscow, 2008. – 196 p.
- Jol H.M.** Ground penetrating radar: Theory and applications. – Elsevier, Amsterdam, 2009. – 543 p.
- Kurushin A.A.** The art of microwave design at CST STUDIO SUITE. – One Book, Moscow, 2014. – 434 p.
- Petrov B.M., Kostromitin G.I., Goremykin E.V.** Log-periodic vibrator antennas: Textbook for universities. – Hotline-Telecom, Moscow, 2005. – 239 p.
- Plasticov A.N.** Automation of the process of designing antennas and microwave devices in modern software systems for electrodynamic simulation. Part 2. Features of LPVA modeling in CST Microwave Studio // Modern Electronics. – 2012. – Vol. 4. – P. 52–56.
- Saarenketo T.** Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys. PhD Thesis, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu. – Acta Universitatis Ouluensis, 2006. – 121p.
- Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V., Sukhobok Yu.A.** Search for buried ice by georadar during the reconstruction of railways // Second International Symposium of Roadbed in Cold Regions (Novosibirsk, September 24–26, 2015): Symposium Proceedings. – Novosibirsk, 2015. – P. 78–84.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БУХТИЯРОВ Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: автоматизация проектирования антенно-фидерных устройств, разработка аппаратных средств для импульсных электромагнитных зондирований.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики, директор ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 2022 г.,
принята к публикации 12 декабря 2022 г.*



АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ФУМАРОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ МУТНОВСКОГО ВУЛКАНА

А. Рзабекова¹, С.С. Абраменков^{1,2}, А.В. Яковлев², И.Ю. Кулаков^{1,2}

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

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

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

e-mail: s.abramenkov@nsu.ru

Частотно-временной анализ 40 часов сейсмических записей временной сейсмологической сети, выполненный с помощью систематической визуальной инспекции сейсмограмм, спектрограмм и спектров сигналов в небольших временных окнах (от 30 с до 10 мин), позволил выделить в районе Мутновского фумарольного поля несколько проявлений вулканической сейсмичности, а также сигналы невулканического характера. К первым относятся сигналы, интерпретируемые как вулкано-тектоническое землетрясение (найден в единственном экземпляре), множественные рои гибридных и длиннопериодных землетрясений, а так же устойчивый (постоянный в течение 40 часов) микросейсмический сигнал газо-гидротермальной активности фумарольных полей в северо-восточном кратере вулкана. Для конкретных станций сети были рассмотрены различия между одновременно записанными сигналами, сделана оценка влияния естественных факторов, характерных для изучаемого района: гидрогеологического и метеорологического.

Фумаролы, газо-гидротермальная активность, вулканическая сейсмичность, частотно-временной анализ

MICROSEISMICITY SPECTRAL FEATURES ANALYSIS OF THE MUTNOVSKY VOLCANO FUMAROLE FIELDS AREA

A. Rzabekova¹, S.S. Abramnikov^{1,2}, A.V. Jakovlev², I.Yu. Koulakov^{1,2}

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

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: s.abramenkov@nsu.ru

Time-frequency analysis of 40-hour seismic records of the temporary seismological network, performed using a systematic visual inspection of seismograms, spectrograms, and signal spectra in small time windows (from 30 s to 10 min), made it possible to identify several manifestations of volcanic seismicity in the Mutnovsky fumarole field area, as well as some non-volcanic signals. The former includes signals interpreted as a volcano-tectonic earthquake (only a single event was found), multiple swarms of hybrid and long-period earthquakes, as well as a stable (constant for 40 hours) microseismic signal likely related to the gas-hydrothermal activity of fumarole fields in the northeastern crater of the volcano. For specific stations of the network, the differences between simultaneously recorded signals were considered, an assessment was made of the influence of natural factors characteristic of the study area: hydrogeological and meteorological.

Fumaroles, gas-hydrothermal activity, volcanic seismicity, time-frequency analysis

ВВЕДЕНИЕ

Целью данного исследования является детальное изучение поля сейсмических волн в относительно компактном временном промежутке на конкретном геологическом объекте. Объект исследования – активные фумарольные поля внутри кратера вулкана Мутновский, который находится в южной части полуострова Камчатка, в 75 км от г. Петропавловск-Камчатский. Данный вулкан известен повышенной газо-гидротермальной активностью, на периферии вулкана находится крупнейшая в России геотермальная электростанция – Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью в 50 МВт.

Мутновский – стратовулкан сложного строения с абсолютной высотой 2324 м, склоны которого местами весьма круто взбираются с высоты всего в 500 м. В тектоническом плане он обычно рассматривается совместно с вулканом Горелый, располагающимся в 15 км к северо-западу. Обе магматические системы относятся к современному этапу эволюции Курило-Камчатской островной дуги, а точнее, к южному сегменту восточного вулканического фронта [Gavrilenko et al., 2016]. Морфологически вулкан Мутновский представляет собой хребтообразный горный массив, состоящий из врезанных друг в друга разновозрастных конусов (пронумерованных от 1 до 4, однако наиболее древний, Мутновский-1, полностью эродирован) [Мелекесцев и др., 1987]. Современный этап деятельности вулкана связан с активной воронкой (active funnel – AF, рис. 1) – молодым взрывным кратером, возникшим на общем гребне Мутновского-3 и Мутновского-4 (рис. 1, а). Воронка имеет овальную форму с длиной осей 300 и 450 м, пологое днище на 1530 м и крутые скальные стенки высотой от 80 до 190 м.

С момента своего возникновения активная воронка Мутновского является местом проявления не только эруптивной, но и интенсивной газо-гидротермальной деятельности. Здесь находятся самые мощные, ответственные за 80 % всей эмиссии вулкана, фумаролы, которые имеют наивысшее содержание магматических компонентов и отличаются высокой температурой (520 °C) [Zelenski, Bortnikova, 2005]. В северо-восточном кратере (NE) также располагаются группы газо-гидротермальных источников. Несмотря на то что терминология в литературе несколько различается, в целом, исследователи выделяют две основные группы: верхнее (UF) и нижнее (BF) фумарольные поля (см. рис. 1).

Несмотря на близкое расположение двух групп газо-гидротермальных систем, разделяют их по причине различий в составе газов. В обоих случаях основным источником пара, судя по его изотопному составу, являются метеорные воды соседнего кратерного ледника на высоте 1500 м [Eichelberger et al., 2009]. В случае BF газы имеют крайне высокие соотношения HCl/S. Разительно отличается состав UF: здесь преобладает довольно высокая концентрацией метана, однако кислотный состав гораздо сильнее разбавлен водяным паром [Zelenski et al., 2012]. Растворы же в гидротермальной системе уникальны из-за чрезвычайно высокого содержания Cl, Cr, Ni, Co, Ti, V и B [Бортникова и др., 2007].

Для специалистов-сейсмологов интерес представляет множество сейсмических сигналов вулканического характера, в особенности, сигнал, связанный с газо-гидротермальной активностью конкретного вулкана. На удивление авторов, в литературе не так много примеров подобных исследований. В статье [Giudicepietro et al., 2019] описан эксперимент в чем-то схожий с рассматриваемым в данной работе. Объектом исследования авторов была фумарола Pisciarelli (Италия), вокруг которой на расстоянии в 8, 20 и 42 м располагались три сейсмические станции, оснащенные трехкомпонентными сенсорами. Авторы отмечают узкий спектральный пик на частоте порядка 10 Гц. Однако в данном исследовании использовались всего три сейсмические станции в практически идеальных для регистрации данного сигнала условиях. Как может выглядеть подобная сейсмичность в более сложных условиях?

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В августе 2020 г. сотрудники лаборатории сейсмической томографии и лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН установили сеть из 16 временных сейсмических станций внутри северо-восточного кратера вулкана Мутновский. Геометрическое покрытие включало район верхнего и нижнего фумарольных полей, а также южные подступы активной воронки (см. рис. 1). Сеть была установлена 16 августа и демонтирована 18 августа: итоговое время одновременной работы всех станций составило около двух суток (чуть более 40 часов).

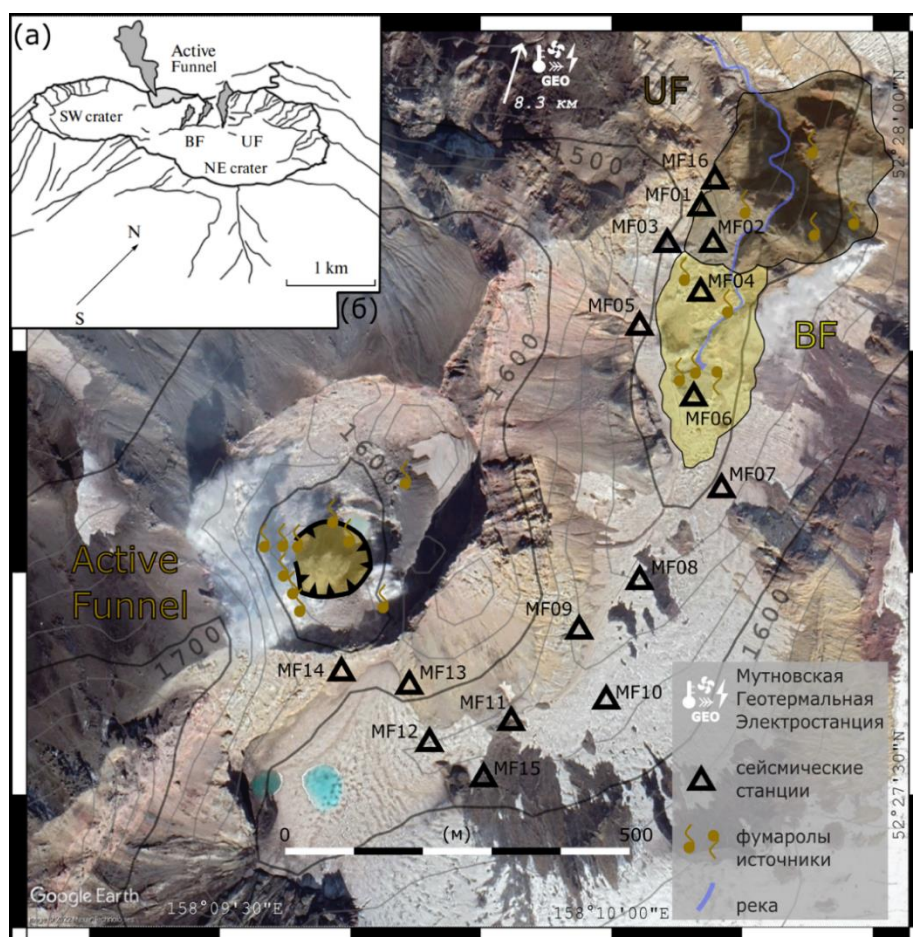


Рис. 1. Эскиз вулкана с основными структурными особенностями, приведенный в [Zelenski et al., 2012] (a); б – расположение сети сейсмических станций, использованных в эксперименте, топография и геологические особенности вулкана, нанесенные на спутниковый снимок местности

Большинство постоянных и временных сейсмологических станций довольствуются дискретизацией в 50 Гц, т. к. целевые сейсмические волны от тектонических землетрясений обычно не содержат частоты выше 5–15 Гц. Как правило, чем глобальнее задача исследования, тем более низкие частоты (и соответственно более длительные периоды) волн интересуют специалистов (океанские микросейсмы, собственные колебания Земли). В этом плане эксперимент на Мутновском фумарольном поле отличается нестандартно высокая для сейсмологии частота дискретизации – 400 Гц (частота Найквиста – 200 Гц). Характеристики инструментов и выбранные параметры позволяют взглянуть не только на целевые сигналы вулканической природы, но и на более высокочастотные сейсмические сигналы антропогенного и естественного происхождения, которые обычно остаются за рамками сейсмологических исследований с более традиционными параметрами системы наблюдения.

АНАЛИЗ

Суть данной работы заключается в изучении частотно-временных характеристик записанных сигналов и попытке их интерпретации. Анализ выполнялся путем систематической визуальной инспекции сигнала во временной и частотной области. Для этого в дополнение к исходным сейсмограммам строились спектрограммы и амплитудные спектры сигналов в скользящем окне. Длительность окна была зафиксирована в 10 мин для исходных сейсмограмм (рис. 2), однако для более детального анализа найденных спектральных особенностей сигналов применялись различные комбинации с меньшим размером окна и фильтрацией исходных записей. Записанные в районе Мутновского фумарольного поля сигналы можно разделить на проявления вулканической сейсмичности и источники сигнала невулканического характера.

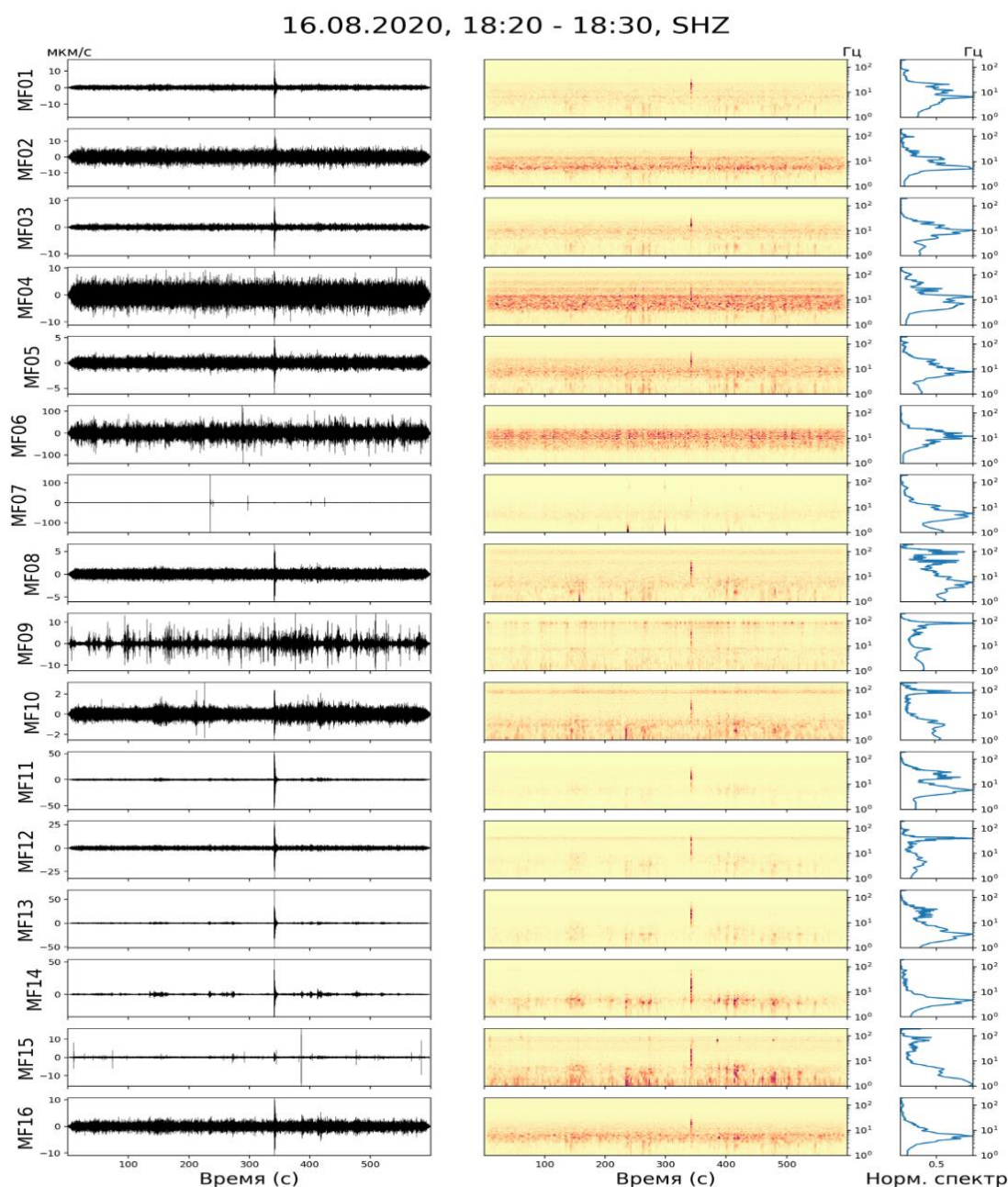


Рис. 2. Пример визуализации данных (окно длительностью 10 мин, вертикальная компонента) для последующего частотно-временного анализа. Амплитудная нормировка спектрограмм линейная, спектрограммы получены быстрым преобразованием Фурье с размером окна 2 с, без перекрытия

ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ, ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ И ГИБРИДНЫЕ СОБЫТИЯ

Вулкано-тектонические (volcano-tectonic, VT) землетрясения, как следует из названия, родственны по своему механизму с тектоническими землетрясениями и присутствуют во всех классификациях вулканической сейсмичности [Abramenkov, 2021]. Длительность и амплитуда сигналов могут существенно различаться, однако, в спектральной области вулкано-тектоническое землетрясение сложно отличить от чисто-тектонического, что говорит о схожем механизме: разрядка напряжений, накопленных упругой средой (вызванных тектонической обстановкой или же движением магматического расплава). Радикально отличный (не столь деструктивный) механизм, по-видимому, имеют крайне характерные для вулканической сейсмичности *длиннопериодные* (long-period, LP) землетрясения, которые под разными названиями также существуют в различных классификациях вулканической сейсмичности: землетрясение типа-B [Minakami, 1961, 1974], землетрясение IV-типа [Токарев, 1966], или же низкочастотное (low-frequency, LF) событие [McNutt, 1996]. Сигнал LP землетрясения в некоторых случаях имеет четкое первое вступление с коротким высокочастотным спектром, однако в целом характеризуется отличительной гармонической структурой волновой формы и соответственно практически монохромным частотным составом. Наконец, в некоторых классификациях вулканической сейсмичности выделяют *гибридные* землетрясение (hybrid earthquake), для которых в частотно-временной области характерны общие черты с сигналами как от VT, так и LP землетрясений [Lahr et al., 1994].

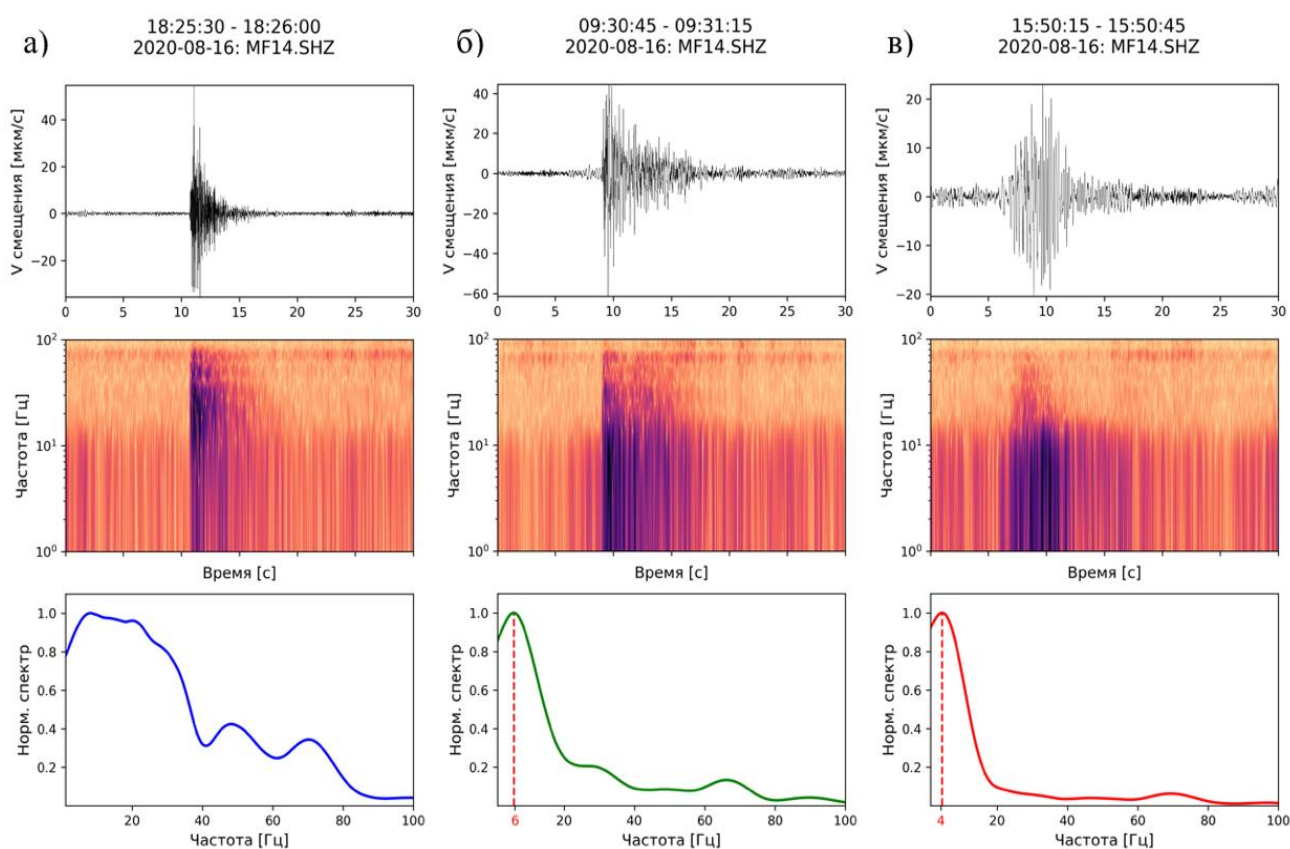


Рис. 3. Сигналы от для трех типов вулканических землетрясений на Мутновском вулкане, записанные ближайшей к активной воронке станцией MF14. Длительность временного окна 30 с; применен полосовой фильтр 1–100 Гц; сверху вниз приведены: сигнал вертикальной компоненты скорости смещения (верхний ряд), соответствующие спектрограммы (средний ряд) и спектры (нижний ряд). Интерпретация: а – вулкано-тектоническое землетрясение, б – гибридное и в – длиннопериодное

При визуальном частотно-временном анализе сигналов в 240 окнах длительностью по 10 минут (все 40 часов одновременной записи) было найдено всего одно вулcano-тектоническое (VT) событие (рис. 3, а), зарегистрированное 16 августа в 18 часов 25 минут по UTC (17 августа в 6:25 по местному времени). Оно имеет наибольшие амплитуды (пиковые порядка 50 мкм/с) на станции MF14 – на станции, наиболее близкой к активной воронке Мутновского вулкана, что сразу же позволяет предположить весьма вероятное положение его гипоцентра в области под активным кратером. Особенности сигнала характерны для VT землетрясения: выраженные первые вступления объемных волн, экспоненциально затухающая coda, широкий спектр первого вступления, а также специфичная форма спектрограммы, связанная с дисперсией энергии поверхностных волн. С учетом различия в системе регистрации эти параметры в целом согласуются с характеристиками вулcano-тектонических землетрясений на данном вулкане, полученными другими исследователями [Кугаенко и др., 2011].

Для изученных данных в районе Мутновского фумарольного поля LP события являются доминирующими на записях сигнала. Можно заметить, что для LP землетрясений действительно характерен узкий спектр с частотами меньше 10 Гц и пиком на ~4 Гц. Амплитуды имеют широкий диапазон до 20 мкм/с. Гибридные же события на Мутновском фумарольном поле проявлены более четкими первыми вступлениями (сходны с VP событиями), однако спектр их coda больше похож на LP события (рис. 3). Таким образом, суммарный спектр гибридного землетрясения, вероятно, представляет собой комбинацию двух «чистых» типов, что позволяет, например, предположить механизм генерации, включающий как хрупкое разрушение, так и последующий резонанс стенок трещины, заполненной флюидом [Chouet, Matoza, 2013].

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ НА ФУМАРОЛЬНОМ ПОЛЕ

Наибольший же интерес в 40 часах данных сейсмичности Мутновского фумарольного поля представляют продолжительные (или даже постоянные на промежутке наблюдения) сигналы. Для демонстрации основных результатов анализа были выбраны пять станций (рис. 4).

Станция MF14, уже знакомая по предыдущему параграфу, выбрана в качестве своеобразного базиса – эта станция сети ближе всего находится к активной воронке и достаточно удалена от верхнего и нижнего фумарольных полей. Четыре другие станции (MF1, MF5, MF3 и MF7 – в порядке относительной удаленности) расположены вблизи фумарольных полей и оказались меньше подвержены воздействию гидрогеологического и метеорологического факторов, чем другие станции. Наблюдаемые спектры сигнала хорошо согласуются с результатами, полученными на фумароле Pisciarelli [Giudicepietro et al., 2019]: на четырех ближних станциях выражен пик в спектре на частотах в 7–12 Гц. Однако на станции возле активной воронки, повторяющаяся эпизодическая, но более амплитудная сейсмичность доминирует в суммарном сигнале.

Гидрологический фактор

Априорные данные об изучаемом районе и сети наблюдения включают информацию о нахождении некоторых станций вблизи реки (рис. 1), текущей по образовавшемуся в северо-восточном кратере ущелью и подпитываемой таянием снежников в юго-западном кратере. Устойчивый сигнал на частоте около ~10 Гц, который был рассмотрен в предыдущем разделе, прослеживается на трех выбранных для анализа станциях (рис. 5). Например, в данных станции MF05, расположенной на склоне в некотором удалении от реки, решающий вклад в спектр, в рамках нашей интерпретации, вносит именно сигнал,

связанный с газо-гидротермальной активностью нижнего фумарольного поля (7–12 Гц). Тем не менее, на спектрограмме и в итоговом спектре можно отметить присутствие соизмеримой по амплитуде и устойчивости во времени добавки более широкополосного сигнала в полосе частот 5–25 Гц. На станциях, находящихся ближе к реке, эта добавка выражена намного сильнее и в частотно-временной области практически маскирует устойчивый «фумарольный» сигнал на 7–12 Гц.

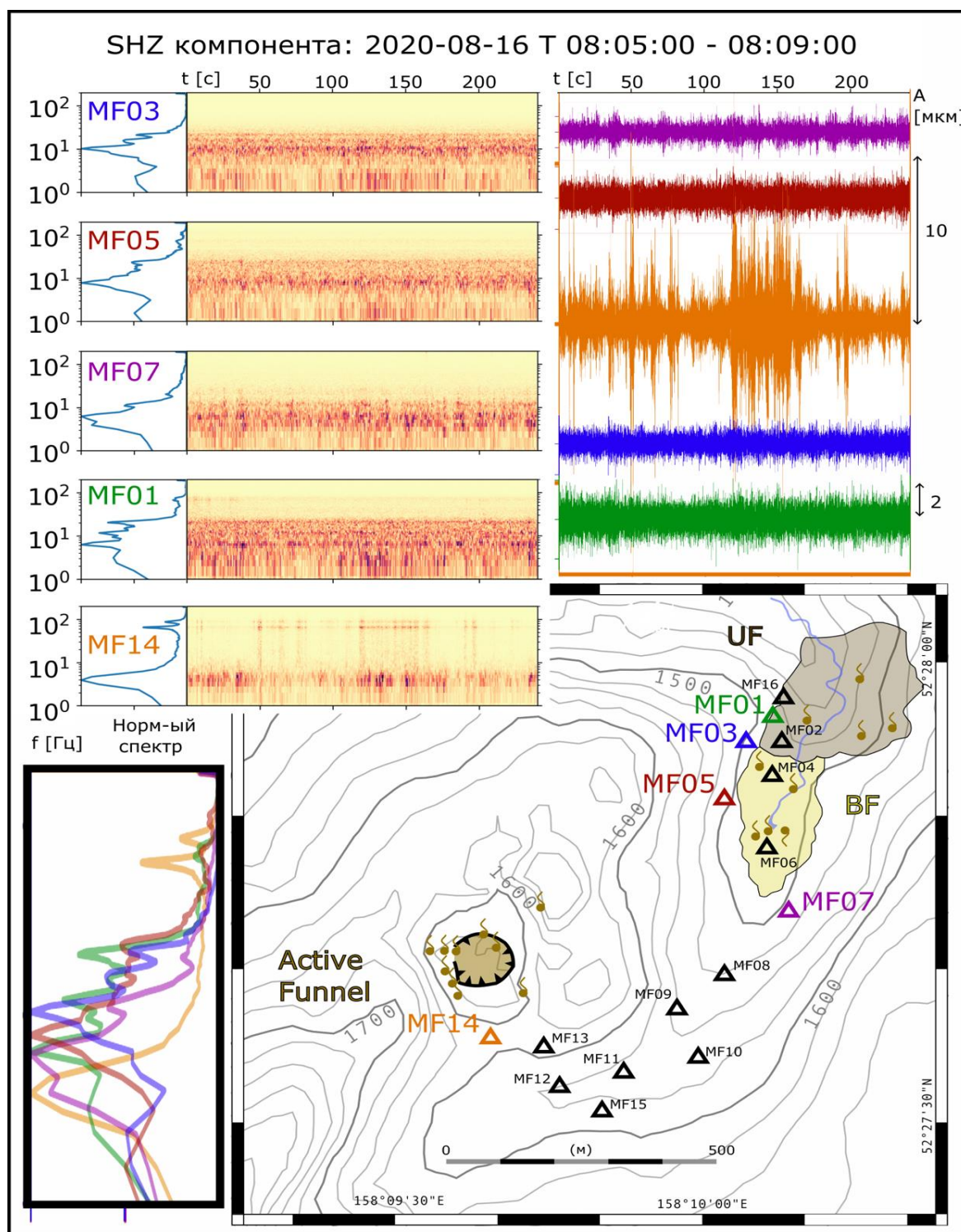


Рис. 4. Примеры частотно-временного анализа сейсмичности для 4-минутного отрезка записей пяти станций, выделенных цветом. Нормированные спектры (левая колонка), спектрограммы (по центру сверху), амплитудно-масштабированные сейсмические записи (справа сверху) и упрощенная геометрия изучаемого района (карта в нижней части, подробности на рис. 1). Применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц

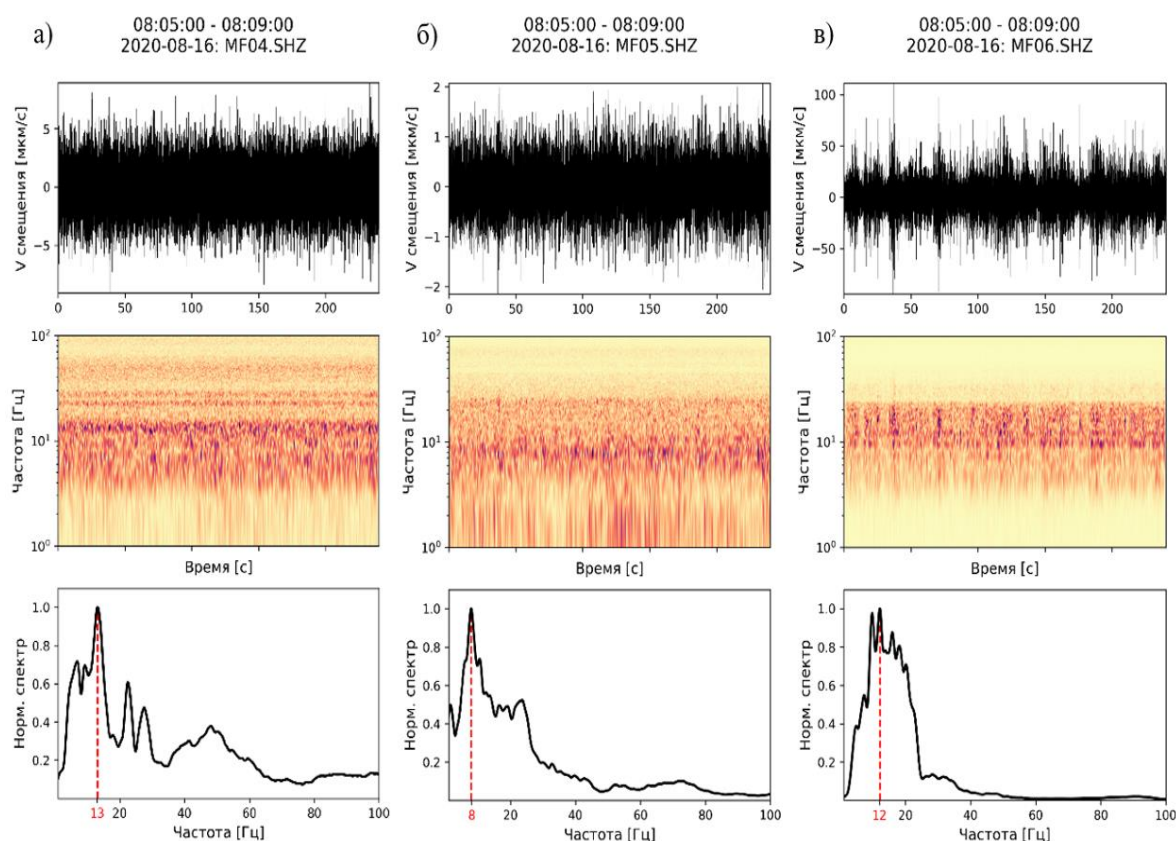


Рис. 5. Особенности сейсмических сигналов, связанные с гидрогеологическим фактором, на примере трех станций, расположенных на разном удалении от текущей по ущелью реки. Сигналы (верхний ряд), спектрограммы (средний ряд) и спектры (нижний ряд) – скорость смещения (вертикальная), окно длительностью 4 минуты, применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц.

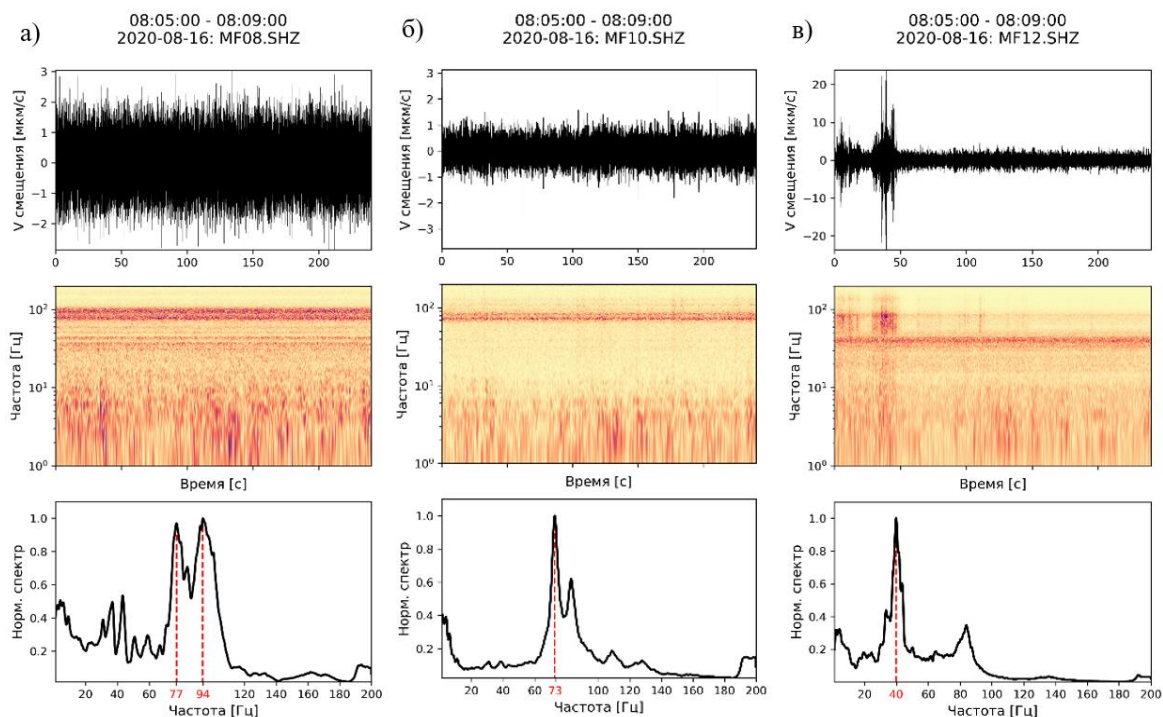


Рис. 6. Особенности сейсмических сигналов, связанные с метеорологическим фактором, на примере трех станций, расположенных на оси (MF08, MF10) и склоне (MF12) ущелья. Сигналы (сверху), спектрограммы (в середине) и спектры (снизу) – скорость смещения (вертикальная), окно длительностью 4 минуты, применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц

Метеорологический фактор

На Мутновском вулкане узкополосные сигналы с доминирующими частотами в диапазоне от 40 до 100 Гц являются постоянными на станциях MF08–MF12 (см. рис. 2). В анализируемых спектрограммах эти полосы прослеживаются на протяжении всех 40 часов записи. Предположительно, это может быть связано с резонансом склонов ущелья под влиянием ветра, на что указывает наибольшая восприимчивость к этой помехе станций, расположенных в долине, а также таким высокочастотным диапазоном данного сигнала. Для более наглядного представления описываемого эффекта анализировались сигналы на трех наиболее зашумленных станциях (рис. 6). Альтернативным объяснением может быть сигнал генерируемый Мутновской ГеоЭС – однако данная гипотеза не объясняет, почему на некоторых станциях ниже по ущелью (MF03, MF06, MF16, см. рис. 1 и 2), находящихся ближе к ГеоЭС, мы не наблюдаем данной высокочастотной помехи.

Информация об основных частотно-временных характеристиках соответствующих сигналов различной природы за 40 часов наблюдений приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики микросейсмических сигналов в районе Мутновского fumarольного поля

<i>Интерпретация характера сигнала</i>	<i>Амплитуда, мкм/с</i>	<i>Длительность</i>	<i>Диапазон, Гц</i>
VT землетрясение	~50	<10 с	<35
Гибридное землетрясение	~40	<15 с	<30
LP землетрясение	~20	<15 с	<20
Газо-гидротермальная активность	~10	40 ч	8–10
<u>Гидрологический фактор</u>	~100	40 ч	<30
<u>Метеорологический фактор</u>	~20	40 ч	40, ~70

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был выполнен частотно-временной анализ с помощью систематической визуальной инспекции сейсмограмм, спектрограмм и спектров сигнала в небольших временных окнах (30 с – 10 мин). По его результатам предложена интерпретация источников микросейсмической активности по данным временной сети из 16 станций с короткопериодными сейсмоприемниками за промежуток в 40 часов. В качестве направлений дальнейших исследований с точки зрения обработки сигналов перспективными выглядят два направления: (1) анализ когерентности сигналов, записанных временной сетью; (2) поляризационный анализ трехкомпонентных записей различных станций. Таким образом, можно считать, что данная работа является лишь началом систематического анализа комплексного волнового поля, записанного в районе Мутновского fumarольного поля, выполненным пока лишь с использованием только одной компоненты станций по отдельности. Следующим логичным шагом станет изучение характеристик волнового поля в пространстве, а также попытка локализации отдельных источников сигналов (1), приведенных в табл. 1. И, наконец, изучение структуры записанных колебаний в трех плоскостях (2) поможет понять механизм соответствующего источника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания в рамках научного проекта FSUS-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

- Бортникова С.Б., Шарапов В.Н., Бессонова Е.П.** Гидрогеохимический состав источников фумарольного поля Донного Мутновского вулкана (Южная Камчатка) и проблемы их связи с надкритическими магматическими флюидами // Доклады академии наук. – 2007. – № 413 (4). – С. 530–534.
- Кугаенко Ю.А., Нуждина И.Н., Салтыков В.А.** Особенности спектральных компонент вулканических землетрясений на примере вулканов Кизимен, Корякский, Мутновский и Горелый // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2011. – № 2 (18). – С. 102–113.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В.** Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 3. – С. 3–18.
- Токарев П.И.** Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). – М.: Наука, 1966. – 120 с.
- Abramenkov S.** Systematic analysis of long-period earthquakes: Gorely volcano, Kamchatka. PhD Thesis – Université Paris Cité, 2021, <https://theses.hal.science/tel-03788405>.
- Chouet B.A., Matoza R.S.** A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2013. – Vol. 252 (B7). – P. 108–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.
- Eichelberger J., Kiryukhin A., Simon A.** The magma-hydrothermal system at Mutnovsky Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // Scientific Drilling. – 2009. – Vol. 7. – P. 54–59, doi: 10.2204/iodp.sd.7.09.2009.
- Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L.** Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // Bulletin of Volcanology. – 2016. – Vol. 78 (7). – Article 47, doi: 10.1007/s00445-016-1038-z.
- Giudicepietro F., Chiodini G., Caliro S., De Cesare W., Esposito A. M., Galluzzo D., Lo Bascio D., Macedonio G., Orazi M., Ricciolino P. Vandemeulebrouck J.** Insight into Campi Flegrei caldera unrest through seismic tremor measurements at Pisciarelli fumarolic field // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2019. – Vol. 20 (11). – P. 5544–5555, doi: 10.1029/2019GC008610.
- Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D., Power J.A., Page R.A.** Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 1994. – Vol. 62 (1–4). – P. 137–151, doi: 10.1016/0377-0273(94)90031-0.
- Minakami T.** Study of eruptions and earthquakes originating from volcanoes (Part 1 of 3) // International Geology Review. – 1961. – Vol. 3 (8). – P. 712–719, doi: 10.1080/00206816109473633.
- Minakami T.** Seismology of volcanoes in Japan // Developments in Solid Earth Geophysics. – 1974. – Vol. 6. – P. 1–27, doi: 10.1016/B978-0-444-41141-9.50007-3.
- McNutt S.R.** Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories // Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – P. 99–146, doi: 10.1007/978-3-642-80087-0_3.
- Zelenski M., Bortnikova S.** Sublimite speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka // European Journal of Mineralogy. – 2005. – Vol. 17 (1). – P. 107–118, doi: 10.1127/0935-1221/2005/0017-107.

Zelenski M.E., Taran Y.A., Dubinina E.O., Shapar' V.N., Polyntseva E.A. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka // *Geochemistry International*. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 502–521, doi: 10.1134/S001670291204009X.

REFERENCES

Abramenkov S. Systematic analysis of long-period earthquakes: Gorely volcano, Kamchatka. PhD Thesis – Université Paris Cité, 2021, <https://theses.hal.science/tel-03788405>.

Bortnikova S.B., Sharapov V.N., Bessonova E.P. Hydrogeochemical composition of springs at the Donnoe Fumarole field, Mutnovsky volcano (Southern Kamchatka) and problems of their relation with supercritical magmatic fluids // *Doklady Academy of Sciences*. – 2007. – Vol. 413 (3). – P. 410–414.

Chouet B.A., Matoza R.S. A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 252 (B7). – P. 108–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.

Eichelberger J., Kiryukhin A., Simon A. The magma-hydrothermal system at Mutnovsky Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Scientific Drilling*. – 2009. – Vol. 7. – P. 54–59, doi: 10.2204/iodp.sd.7.09.2009.

Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L. Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // *Bulletin of Volcanology*. – 2016. – Vol. 78 (7). – Article 47, doi: 10.1007/s00445-016-1038-z.

Giudicepietro F., Chiodini G., Caliro S., De Cesare W., Esposito A. M., Galluzzo D., Lo Bascio D., Macedonio G., Orazi M., Ricciolino P. Vandemeulebrouck J. Insight into Campi Flegrei caldera unrest through seismic tremor measurements at Pisciarelli fumarolic field // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2019. – Vol. 20 (11). – P. 5544–5555, doi: 10.1029/2019GC008610.

Kugaenko Yu.A., Nuzhdina I.N., Saltykov V.A. Peculiarities of spectral components of volcanic earthquakes on the example of Kizimen, Koryaksky, Mutnovsky and Gorely volcanoes // *Vestnik KARUNTs, Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 2 (18). – P. 102–113.

Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D., Power J.A., Page R.A. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1994. – Vol. 62 (1–4). – P. 137–151, doi: 10.1016/0377-0273(94)90031-0.

Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V. Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in the Holocene and volcanic hazard for adjacent areas (according to tephrochronological studies) // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 1987. – Vol. 3. – P. 3–18.

Minakami T. Study of eruptions and earthquakes originating from volcanoes (Part 1 of 3) // *International Geology Review*. – 1961. – Vol. 3 (8). – P. 712–719, doi: 10.1080/00206816109473633.

Minakami T. Seismology of volcanoes in Japan // *Developments in Solid Earth Geophysics*. – 1974. – Vol. 6. – P. 1–27, doi: 10.1016/B978-0-444-41141-9.50007-3.

McNutt S.R. Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories // *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – P. 99–146, doi: 10.1007/978-3-642-80087-0_3.

Tokarev P.I. Eruptions and seismic regime of volcanoes of Klyuchevskaya group [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1966. – 118 p.

Zelenski M., Bortnikova S. Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka // *European Journal of Mineralogy*. – 2005. – Vol. 17 (1). – P. 107–118, doi: 10.1127/0935-1221/2005/0017-107.

Zelenski M.E., Taran Y.A., Dubinina E.O., Shapar' V.N., Polyntseva E.A. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka // *Geochemistry International*. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 502–521, doi: 10.1134/S001670291204009X.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

РЗАБЕКОВА Айгерим – студентка 1-курса магистратуры геолого-геофизического факультета НГУ по специальности геофизика. Основные интересы: комплексная обработка и интерпретация геофизических данных, геотермальная энергия.

АБРАМЕНКОВ Сергей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных научно-образовательного центра “Газпромнефть-НГУ”. Основные интересы: обработка сейсмических данных, физические механизмы сейсмичности анализ когерентности волнового поля.

ЯКОВЛЕВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: алгоритмы сейсмической томографии, сейсмология вулканов, геодинамика зон коллизии и субдукции, планирование и установка временных сетей сейсмических станций.

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решения прямых и обратных задач геофизики, методы сейсмической томографии, методы сейсмической томографии.

*Статья поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.,
принята к публикации 26 декабря 2022 г.*



ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ И СКВАЖИННЫХ ДАННЫХ W-SEIS

М.С. Канаков¹, В.В. Лапковский¹, В.А. Конторович^{1,2}, К.И. Канакова^{1,2}, Ю.С. Шорохов¹

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: KanakovMS@ipgg.sbras.ru

В статье освещаются функциональные возможности разрабатываемого в ИНГГ СО РАН программного комплекса W-SEIS, предназначенного для интерпретации данных 2D/3D сейсморазведки и бурения. Комплекс представляет собой набор взаимосвязанных приложений и утилит, каждое из которых может использоваться как самостоятельный программный продукт. Программное обеспечение является кроссплатформенным, реализовано с использованием клиент-сервисной архитектуры, обладает высокой производительностью и предъявляет минимальные системные требования к компьютерному оборудованию.

Разработка ПО, программный комплекс, сейсмическая интерпретация, каротаж, сеточная модель, моделирование волновых полей, картопостроение, геологическая модель

W-SEIS INTERPRETATION SOFTWARE FOR SEISMIC AND WELL DRILLING DATA

M.S. Kanakov¹, V.V. Lapkovsky¹, V.A. Kontorovich^{1,2}, K.I. Kanakova^{1,2}, Yu.S. Shorohov¹

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

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

e-mail: KanakovMS@ipgg.sbras.ru

The article highlights the functionality of the W-SEIS software developed at the IPGG SB RAS, designed to interpret 2D/3D seismic and drilling data. The application consists of a set of interconnected modules and utilities, each of which can be used as an independent software product. W-SEIS is a cross-platform software, it is developed using a client-service architecture and has high performance and imposes minimal system requirements on computer equipment.

Software development, seismic interpretation, well logging, grid model, wave field modeling, gridding, geological model

ВВЕДЕНИЕ

Комплексная интерпретация данных сейсморазведки и бурения является одним из ключевых инструментов в ходе геологоразведочных работ в нефтегазовой отрасли. В процессе интерпретации решаются такие задачи, как выделение и прослеживание отражающих границ, картирование структурных ловушек, расчленение разреза на литолого-стратиграфические единицы, выявление пород-коллекторов, литологических и тектонических экранов, построение разномасштабных моделей залежей углеводородов, подсчет запасов и ресурсов и многое другое.

На рынке программного обеспечения (ПО) для нефтегазовой отрасли представлен ряд продуктов для работы с сейсмическими и скважинными данными, каждый из которых имеет свою специфику, сильные и слабые стороны. Некоторые являются узкоспециализированными, ориентированными на работу с месторождениями на этапе доразведки и эксплуатации, другие охватывают весь комплекс геологоразведочных задач, но, зачастую, требуют длительного обучения (ознакомления) и больших технических мощностей. Кроме того, лидерами рынка являются исключительно зарубежные продукты, а в сложившейся геополитической ситуации остро стоит вопрос о создании и использовании импортонезависимых российских технологий [Указ..., 2022].

В Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН ведется разработка программного комплекса W-SEIS, первое поколение ПО получило свидетельство о государственной регистрации в 2011 году [Контарович, Лапковский, 2011]. Начиная с 2012 года разрабатывается новая существенно более функциональная версия этого программного комплекса, который предназначен для интерпретации сейсмических и скважинных данных (ГИС) и построения геологических моделей на всех этапах ГРП.

В настоящий момент стадия готовности ПО соответствует уровню TRL 7 по номенклатуре госкорпорации «Росатом» от 24.04.2018 [(innov-rosatom.ru)]. Всего уровней TRL ("Technology Readiness Level") для программных продуктов 9, седьмому соответствует следующее описание: *«Разработан прототип программного обеспечения со всеми ключевыми функциями, доступными для демонстрации и тестирования. Прототип программного обеспечения хорошо интегрирован с реальными программно-аппаратными системами, и продемонстрирована реальная осуществимость. Большинство ошибок программного обеспечения устранены. Разработана ограниченная документация»*. Для завершения разработки до стадии коммерческого продукта команда проекта готова к сотрудничеству со стратегическими и финансовыми партнерами.

Комплекс уже полномасштабно используется для научных и договорных работ ИНГГ СО РАН, а также для проведения учебных курсов по интерпретации сейсморазведки и ГИС на геолого-геофизическом факультете Новосибирского государственного университета, при подготовке бакалаврских, магистерских и кандидатских диссертаций.

W-SEIS представляет собой набор взаимосвязанных приложений, каждое из которых может использоваться как самостоятельный программный продукт. Основных модулей три: первый – *Desmana* – предназначен для работы с сейсмическими данными. Второй модуль – *GISWell* служит для интерпретации и представления данных геофизических исследований скважин (ГИС). За моделирование волновых полей отвечает приложение *Mink*. Несмотря на то, что каждый модуль может функционировать самостоятельно, максимальное удобство работы обеспечивает их совместное применение за счет интеграции функционала и простоты передачи данных между ними путем использования совместных баз данных.

Проект полностью написан на языке программирования C++, что, в числе прочего, обеспечивает очень низкие аппаратные системные требования. Кроме того, в работе ПО используются все возможности современного компьютерного оборудования, например, многопоточность процессоров и применение видеоадаптеров в качестве сопроцессора для массивных вычислений.

Выбор в качестве основы фреймворка Qt обеспечивает работу программного комплекса на всех видах операционных систем (*Windows/Mac OS/Linux* (включая ОС российского производства)), а также использование SQLite и MySQL/PostgreSQL в качестве СУБД (система управления базами данных) позволяет легко масштабировать размеры интерпретационных проектов и в перспективе позволит достаточно легко добавить возможность совместной работы пользователей с одним проектом.

ОПИСАНИЕ ОСНОВНОГО ФУНКЦИОНАЛА ПО

Рассмотрим подробнее возможности каждого модуля W-SEIS.

Основные задачи, решаемые с помощью модуля *Desmana* – интерпретация данных сейсморазведки 2D, 3D и построение сеточных моделей.

Разведка и разработка большинства нефтегазоперспективных регионов и отдельных месторождений в России в большинстве случаев имеет длительную историю. По этой причине интерпретатору зачастую приходится сталкиваться с неувязанными данными, полученными в разное время разными организациями. В приложении перед началом загрузки данных сейсморазведки в интерпретационный проект существует возможность редактирования этикеток SEG-Y файлов, расчета или пересчета координат по известным точкам для профилей и кубов с учетом шага пикетажа, в том числе в пакетном режиме. Вносимые изменения сохраняются в виде шаблонов для дальнейшего использования в приложении.

Для всех загруженных в базу объектов (профили, скважины, точки, сеточные модели, контуры) возможно осуществить пересчет системы координат (в проекции Гаусса-Крюгера), выполнить заданный сдвиг или поворот и масштабировать данные с коэффициентом. Также реализована функция проверки целостности геометрии загруженных профилей и их коррекции при обнаружении ошибок, таких как: самопересечения, зигзаги линии профиля или резкие перепады расстояний между трассами.

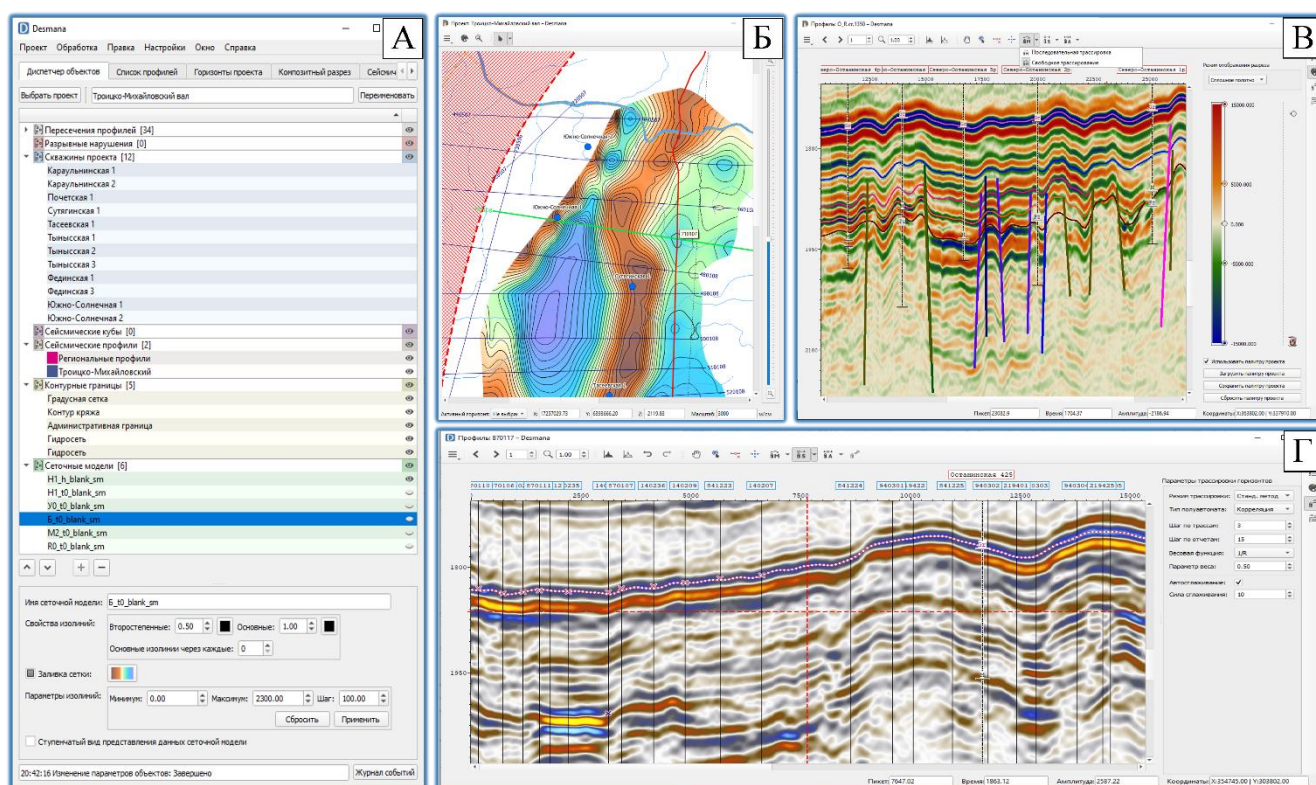


Рис. 1. Многооконный интерфейс приложения *Desmana*: А – диспетчер объектов, Б – планшет для представления данных в плане, В, Г – временные сейсмические разрезы

Увязать данные в проекте можно при помощи дополнительных процедур, таких, как например, минимизация квадратов отклонения значений различных параметров волнового поля в точках

пересечений сейсмических профилей. Сюда входит корректировка по времени или амплитудам сейсмических трасс разреза и проверка совпадения полярности сигналов волнового поля.

В Desmana используется независимый многооконный пользовательский интерфейс, который состоит из основного окна программы, планшета для отображения данных в плане и неограниченного количества окон для вывода разрезов (временных, глубинных, композитных, палеоразрезов) (рис. 1).

Функциональный диспетчер объектов позволяет легко структурировать данные и осуществлять работу с разными группами объектов на планшете, таких как сейсмические профили, кубы, скважины, сеточные модели, контурные границы, разрывные нарушения.

Планшет имеет гибкие настройки параметров представления данных, что позволяет привести его к удобному для пользователя виду, и вместе с возможностью экспорта в «шейп-файл» (формат ArcGIS) или форматы векторной графики дает возможность быстро создавать наборы электронных или графических приложений (рис. 2).

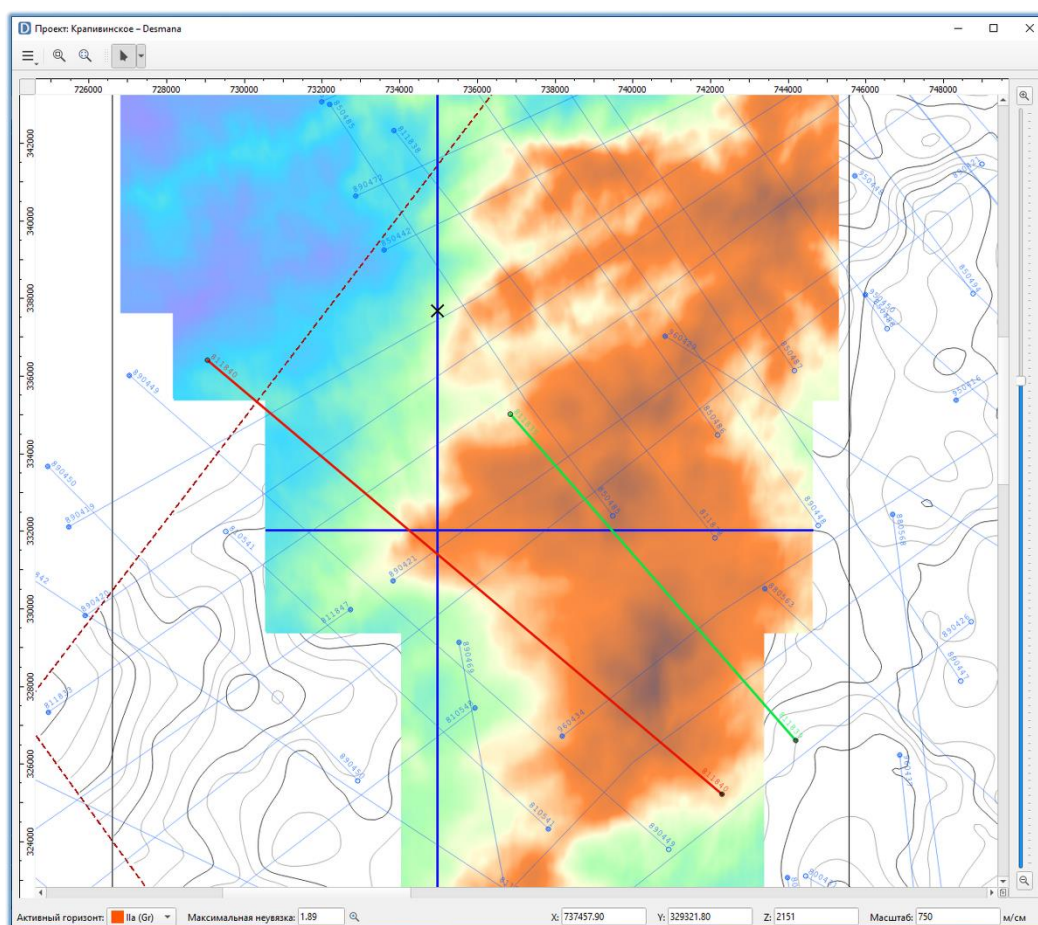


Рис. 2. Одновременная работа с сейсмическими профилями и кубами в интерпретационном проекте на планшете

Интерфейс работы с окнами временных, глубинных, палео и композитных разрезов позволяет настраивать любые параметры отображения, например, выбирать и редактировать шаблоны цветовых палеток (см. рис. 1). На разрезах имеется набор инструментов для работы с отражающими горизонтами, которые позволяют выполнять их трассировку в ручных, автоматических и полуавтоматических режимах. Также полученные горизонты можно редактировать разными способами, например, сглаживать, копировать и вставлять фрагменты.

Возможность оформления разрезов с помощью цветовых заливок и крапа реализована в самом приложении, что помогает повысить наглядность представления данных, а вместе с функцией экспорта в SVG (векторный графический формат) позволяет значительно сэкономить время на подготовку графики (рис. 3).

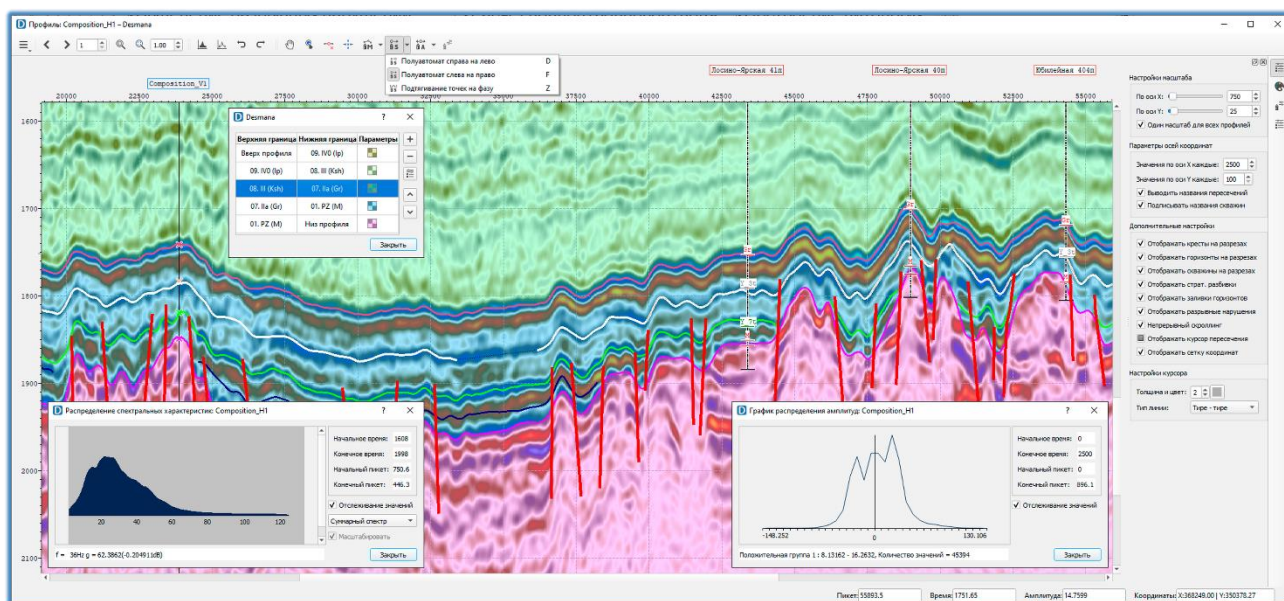


Рис. 3. Пример оформления разреза, вывод амплитудных и спектральных характеристик

Для целей конструирования и выбора сейсмических атрибутов в окне разреза доступны инструменты построения амплитудных графиков и частотных спектров в заданных диапазонах (см. рис. 3).

В последние годы в научных и производственных организациях большое внимание уделяется такому инструменту интерпретации, как атрибутный анализ. Под сейсмическими атрибутами принято понимать некие математические преобразования сейсмических данных с целью извлечения нетривиальной информации о параметрах среды. Большинство атрибутов основываются на анализе и преобразованиях таких параметров волнового поля, как амплитуда и частота. При этом глубина преобразования данных может существенно различаться. Это могут быть как амплитудные или частотные фильтры, так и производные и разнообразные дифференциальные формы. Формально к атрибутам могут относиться параметры, вычисляемые при различных видах инверсии, связанные с акустическими свойствами среды. Оценка когерентности волнового поля, позволяющая распознавать разрывные нарушения, также является важным атрибутом.

Вся спецобработка (фильтры) сейсмических данных реализована через открытый API (программный интерфейс приложения), что позволяет быстро создавать всевозможные процедуры в дополнение к существующим в пакете. В приложении представлены все стандартные операции спецобработки, например, различные виды Гильберт и Фурье преобразований, а также другие, наиболее часто используемые в работе интерпретатора фильтры сейсмических данных. Все операции можно выполнять в пакетном режиме, обрабатывая разрезы целиком или задавать временной интервал, в том числе с помощью горизонтов. Также можно обрабатывать области на профилях, выделенные вручную с помощью графического интерфейса.

С инструментом динамического анализа данных можно в автоматическом режиме получить набор карт сейсмических атрибутов, построенных для разного числа скользящих окон после фильтрации между

заданными горизонтами. Это значительно ускоряет поиск нужных атрибутов и помогает интерпретатору не пропустить значимую информацию. В качестве примера на рис. 4, А приведена карта спектральной плотности сигнала для кровли палеозойских отложений одного из месторождений Западной Сибири. Атрибут был использован для качественной оценки параметра затухания в различных частотных диапазонах. Наиболее яркие зоны, в которых затухание минимально, соответствуют скважинам, вскрывшим непроницаемые породы. [Канакова, Татевосян, 2022]. На рисунке 4, Б показан срез мгновенных амплитуд (Гильберт-преобразование) по месторождению, где получило развитие песчаное тело руслового генезиса [Аюнова и др., 2022]. В кровле и подошве тело ограничено выдержанными угольными пластами, которые «сливаются» в единый в местах отсутствия песчаника. Наличие песчаника увеличивает расстояние между углями и приводит к противофазному суммированию отраженных волн от каждого угольного пласта, что и выражается в уменьшении амплитуды интерференционного сигнала.

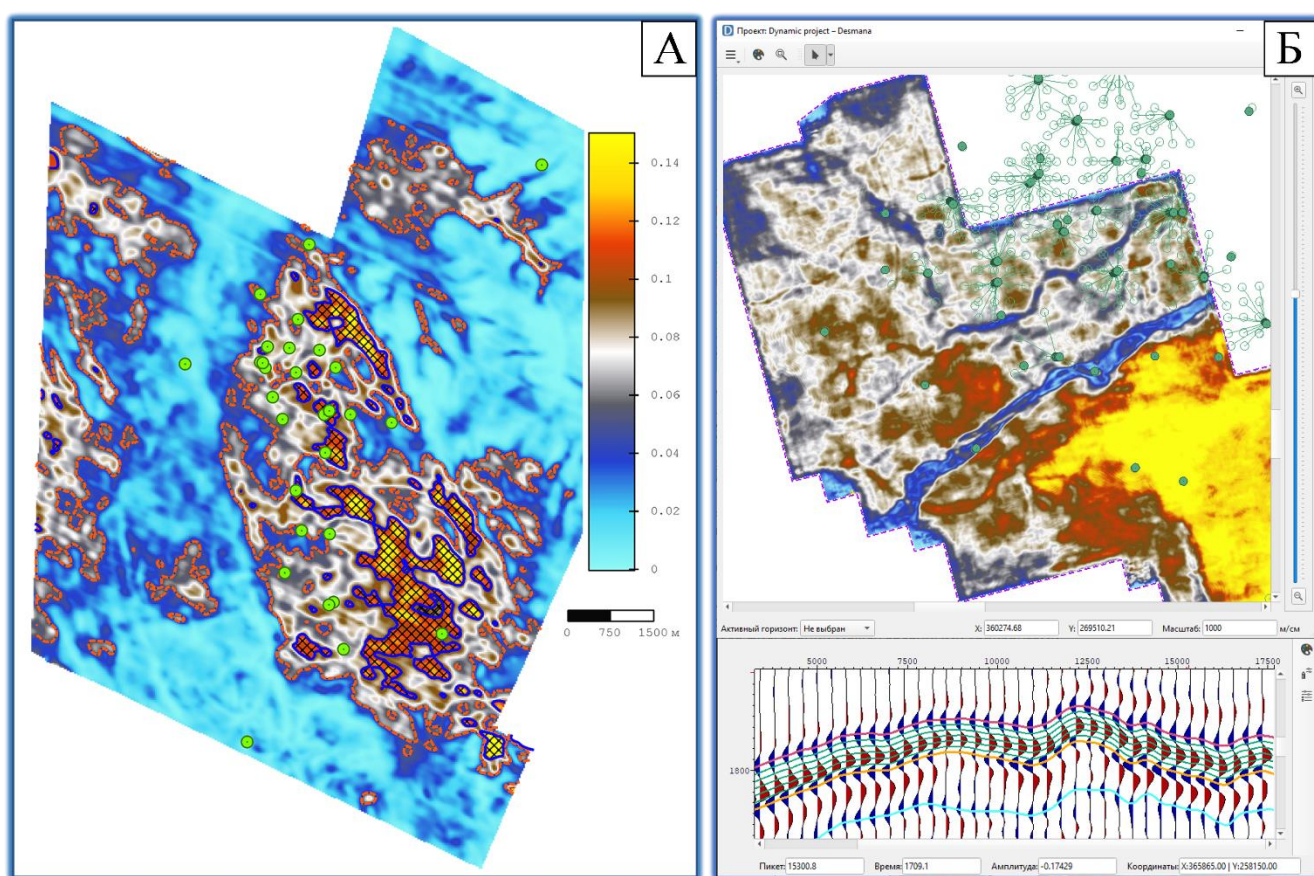


Рис. 4. Примеры сейсмических атрибутов. А – карта спектральной плотности сигнала, Б – карта мгновенных амплитуд

Стоит подробнее остановиться на функции сеймостратиграфической параметризации для сейсмических разрезов и кубов, где используется алгоритм DTW (алгоритм динамической трансформации временной шкалы) или, что практически то же самое – волновой алгоритм Ли [Лапковский, 2012]. Результат такой параметризации позволяет не только автоматизировать трассировку отражающих горизонтов с учетом разрывных нарушений, позволяя проводить их через любую точку разреза или куба, но и использовать сеймостратиграфический параметр для анализа пространственного распределения свойств. Данный инструмент позволяет корректно интерполировать измеренные свойства внутри куба, обеспечивая, например, получение кубов пористости по скважинным данным. Уменьшение погрешности

интерполяции достигается за счет избыточного количества отражающих горизонтов, выделенных с учетом изменений характеристик волнового поля (рис. 5).

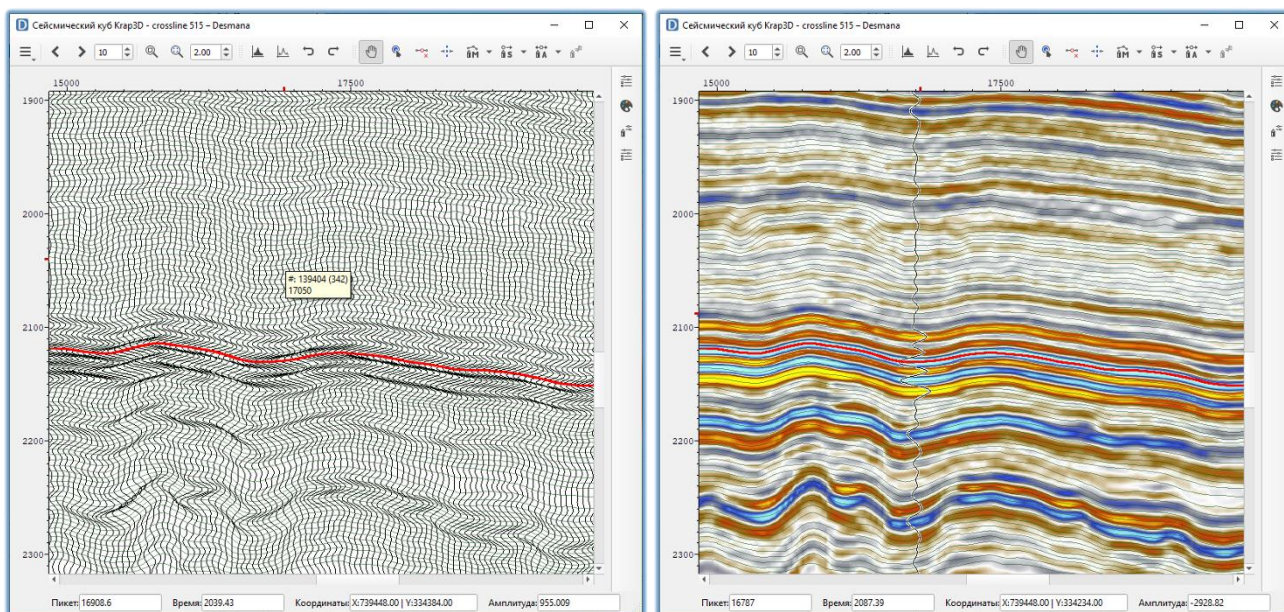


Рис. 5. Срез куба по непрерывной сейсмостратиграфической модели мезозойско-кайнозойских отложений Западной Сибири

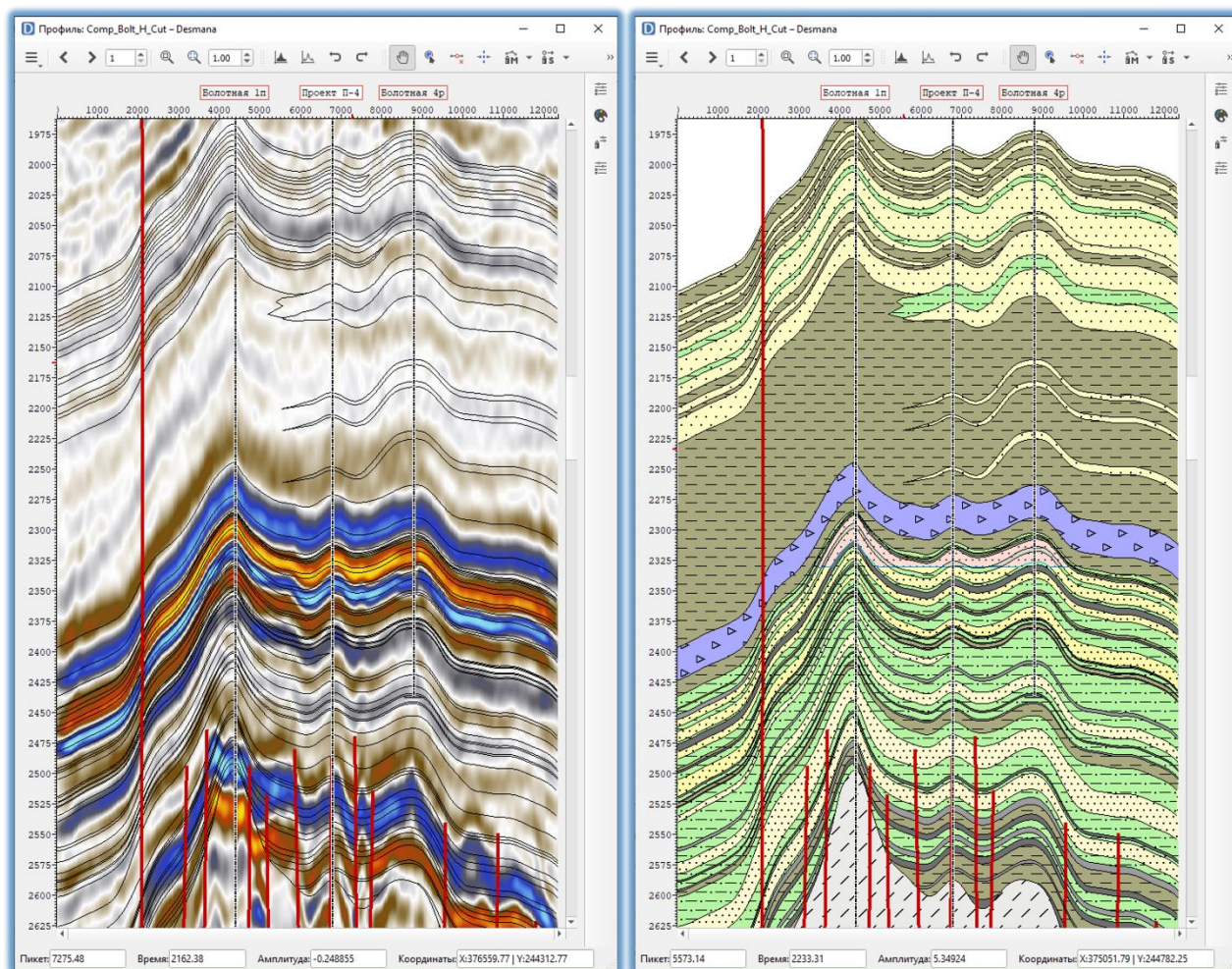


Рис. 6. Пример построения и оформления геологического разреза

Одним из этапов комплексной сейсмогеологической интерпретации является переход от временной модели среды к глубинной. Пересчет разрезов и кубов базируется на модели скоростного закона исследуемой территории, которая детализируется в процессе работы над проектом. Первоначально она основана только на данных ВСП (вертикальное сейсмопрофилирование) или априорных представлениях о скоростных параметрах среды, затем происходит ее уточнение за счет определения времен двойного пробега волны до отражающих горизонтов и их стратиграфической привязки в скважинах, позднее в ней также могут учитываться структурные карты (рис. 6).

В приложение интегрирован *модуль картопостроения*, который позволяет осуществлять построения сеточных моделей в том числе с учетом разрывных нарушений.

В основе методов картопостроения лежит использование натуральных псевдокубических сплайнов [Василенко, 1980; Рожено, 2006] или одного из видов кригинга с возможностью задания вариограммы. Эти базовые методы адаптированы к учету любого количества и конфигурации разрывных нарушений. Точная «посадка» сеточной модели на данные выполняется с использованием дифференциальной схемы или скользящего среднего. Существует возможность построения сеточных моделей на основе регрессионных зависимостей от других сеток, скважинных данных и их комбинаций.

Модуль включает в себя обширный набор функций по редактированию и визуализации сеток, таких как: сглаживание, в том числе локальное, вклейка фрагментов, коррекция поверхности по скважинным данным, дифференциальные преобразования, сшивка сеток, изменение лимитов и параметров, бланковка и разбланковка, пересчет по графикам, оцифровка изолиний. С учетом значимости площадного распределения фациальных типов отложений для оценки перспектив нефтегазоносности территорий стоит упомянуть реализованные алгоритмы поиска типовых форм поверхностей, таких как уступы, центральные линии долин и хребтов, бровки и тыловые швы террас [Лапковский, 2018]. Перечисленный функционал может быть существенно расширен путем использования калькулятора сеточных моделей.

Встроенные инструменты для работы с контурными границами на планшете проекта позволяют осуществить создание, редактирование и различные преобразования контуров-полигонов (например, контуры залежей, гидросеть, различные границы) и задавать пользовательские настройки их визуализации.

В рамках существующего функционала визуализация данных в Desmana реализована в двумерном пространстве (срезы и сечения, карты и разрезы). Тем не менее модель внутреннего представления данных в приложении является трехмерной, что служит заделом для дальнейшего добавления в ПО возможности 3D визуализации.

Примером может служить инструмент построения трехмерной модели разрывных нарушений, которая получается в результате одновременной работы интерпретатора по выделению линий разломов на отдельных разрезах (сечениях) и прослеживанию их в плане (на планшете) с целью формирования сложнопостроенных поверхностей.

На разрезах дизъюнктивные нарушения выделяются на основе анализа смещения осей синфазности (когерентности волнового поля), осложнение волновой картины дифракционными эффектами, выделением локальных зон пониженных амплитуд и т. д. Для более уверенной трассировки разломов пользователь может воспользоваться набором сейсмических фильтров доступных в приложении. Опираясь на точки пересечения поверхности отражающего горизонта и разрывных нарушений, выделенных на разрезах, с помощью интерактивного графического интерфейса интерпретатор осуществляет увязку сети разломов на планшете (рис. 7). Инструмент позволяет

использовать дополнительные данные, например, карты направления градиентов, кривизны поверхности или выделенных типовых форм.

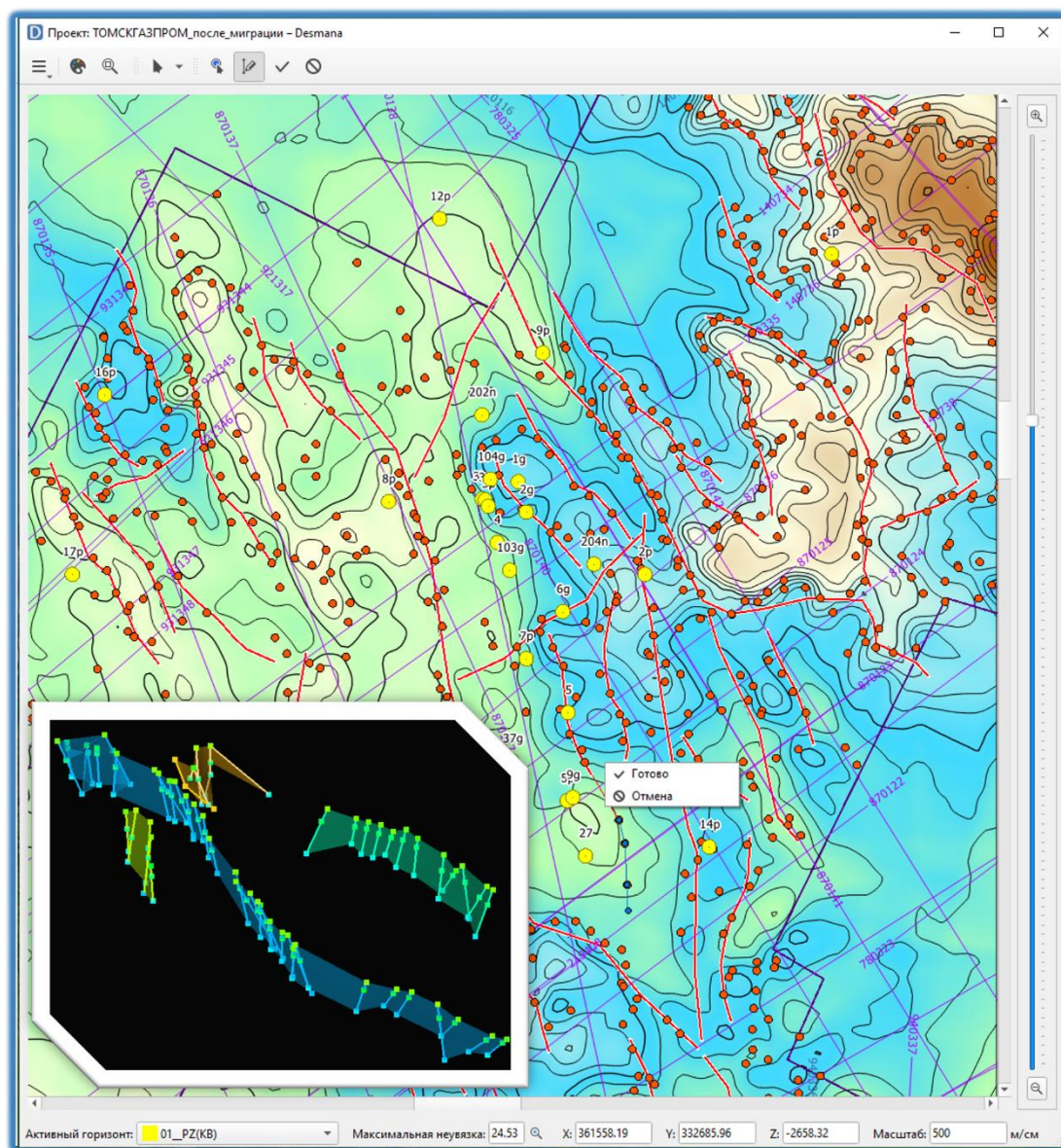


Рис. 7. Пример построения модели разрывных нарушений

Модуль *GISWell* служит для работы со скважинными данными. В приложении реализовано быстрое создание базы данных, путем загрузки основных параметров, таких как название, идентификатор, координаты, альтитуда и стратиграфические отбивки из готовых таблиц. После создания базы можно добавить табличные данные по отбору керна, испытаниям в скважинах, инклинометрии и ВСП. Полученная база данных может быть подключена к сейсмическому проекту Desmana, что позволит визуализировать траектории наклонных скважин и отбивки стратиграфических уровней на разрезах и кубах в точках скважин с данными ВСП.

Загрузка каротажа в скважины может производиться из нескольких источников одновременно (LAS, TXT), при этом в сводной таблице приводится сравнение данных и интерпретатор выбирает кривые, которые пойдут в проект. Существует также инструмент пакетной загрузки каротажных кривых во все скважины проекта с автоматическим определением их типов. Дополнительно в виде кривых могут быть

загружены результаты лабораторных точечных измерений петрофизических параметров. В приложении пользователю доступен инструмент по склейке, в том числе, пакетной, разномасштабных кривых одного типа и инструмент увязки по глубине между собой кривых разных типов. Речь идет не только о глобальных сдвигах, но и о локальных смещениях кривых друг относительно друга. Нормализация кривых осуществляется через встроенный калькулятор с возможностью задания региональных и стратиграфических трендов. Для кривых ПС реализован отдельный инструмент – построение альфа-функции с учетом смещения линий глин и песков.

Одним из важных и трудоемких процессов на всех этапах геологоразведочных работ является корреляция разрезов скважин. В приложении GISWell вся работа интерпретатора может проводиться на корреляционных схемах, без необходимости перехода к планшету отдельной скважины. Помимо ручного порядка скважины в схемах можно выстраивать по изменению мощности выбранного интервала или по расположению их на площади (координаты X , Y), задавать интервалы отображения по глубине и выравнивать данные на любой стратиграфический уровень (рис. 8). Вариативность отображения кривых ГИС реализована через пользовательский набор шаблонов, которые включают в себя не только цвет и закраску каротажа, но и распределение кривых по контейнерам (трекам). Шаблоны можно сохранять в файлы для дальнейшего использования в других проектах или при работе с одним проектом разными пользователями. Так же на корреляционных схемах можно вывести данные по испытаниям и включить отображение интервалов отбора керна с текстовым описанием.



Рис. 8. Пример корреляционной схемы юрских отложений

В программном пакете реализованы следующие режимы визуализации данных: 1) отображение глубин по стволу (измеренные глубины), 2) вертикальное отображение (пересчет с учетом инклинометрии), 3) вывод во временном масштабе (для скважин со скоростным законом). В любом из этих режимов доступны функции работы со стратиграфическими уровнями и интервалами. Редактирование

отбивок может осуществляться несколькими способами, например, на планшете профиля/скважины посредством графического интерфейса или через окно встроенной таблицы со стратиграфическими данными, которая может быть экспортирована в форматы электронных таблицы (*.xls, *.csv) для использования в сторонних приложениях (Microsoft Excel и аналоги). При экспорте существует возможность формирования различных вариантов вида данной таблицы, например, вертикальное или горизонтальное представление данных, расчет дополнительных параметров с учетом инклинометрии и т. д.

Помимо экспорта таблиц существует пакетный режим выгрузки всех данных проекта: LAS файлов ГИС\РИГИС и инклинометрии, выгрузка таблиц с данными по испытаниям, описанию керна, лабораторным измерениям петрофизических параметров и возможность сформировать поскважинный каталог наличия и параметров каротажных кривых в проекте. Дополнительно существует функция переноса проекта в ПО Schlumberger Petrel, на основе авторского плагина.

Для задач количественной интерпретации ГИС реализовано построение кроссплотов по любому набору кривых и вывод статистических данных по скважинам с разбиением по стратиграфическим интервалам или без (рис. 9). Расчет кривых РИГИС осуществляется при помощи специального диспетчера процессов (Workflow), который позволяет составлять последовательности операций сравнения значений кривых (абсолютные значения или качественное поведение) с граничными значениями, задаваемыми интерпретатором. Существует возможность переноса отдельных технологических цепочек между проектами простым копированием/вставкой. Настройки визуализации данных позволяют создавать графические элементы с собственными параметрами (крап, цвет) и любыми значениями кодов для вывода литологии, насыщения, фаций и других дискретных кривых в отдельных колонках (треках).

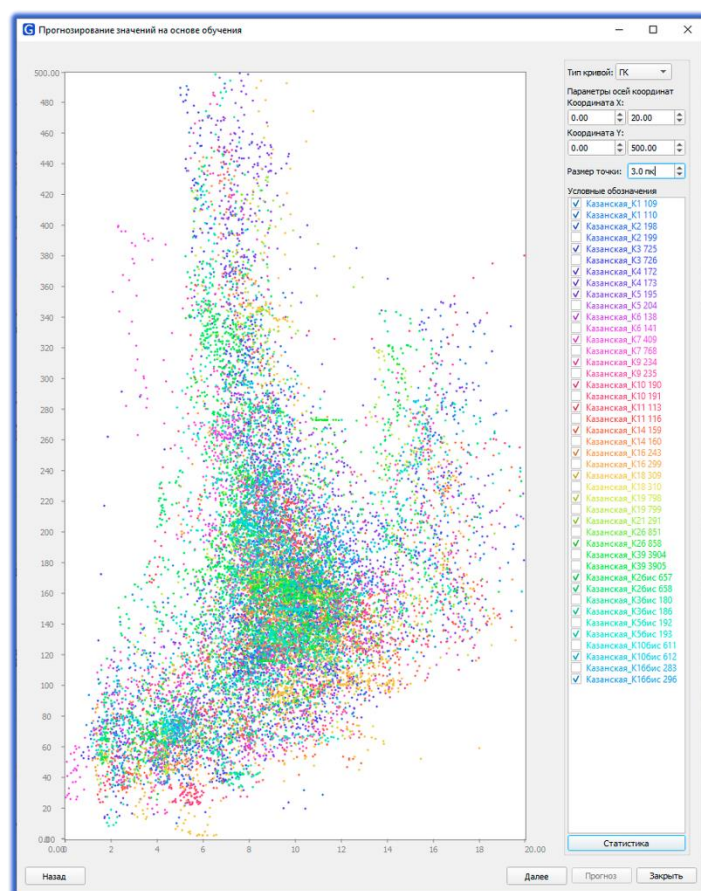


Рис. 9. Кросс-плот акустического (АК) и радиоактивного (ГК) каротажа

В приложение встроен модуль прогноза значений, который базируется на обучении в скважинах с полным набором данных и аппроксимации значений в местах отсутствия некоторых из них. В модуле реализовано три метода прогноза – двумерная сплайн-аппроксимация с подбором оптимального параметра сглаживания, многомерная линейная регрессия и кластеризация данных с использованием расстояний Махаланобиса [Mahalanobis, 1936] до каждого из классов для оценки их веса при прогнозе. Описываемый инструмент позволяет восстанавливать кривые в местах отсутствия значений (например, восстановить кривую АК по другим данным ГИС) или осуществлять количественную интерпретацию ГИС, например, рассчитываться кривые литологии или пористости на основе обучения по эталонам. Модуль дополняет функциональный пакетный калькулятор, предоставляющий практически неограниченные возможности по редактированию и созданию новых кривых.

Одной из важных задач сейсморазведки является моделирование волнового поля, то есть синтезирование волновой картины среды на основе имеющихся данных о ее упругих параметрах, в том числе с целью корректной увязки геологических и сейсмических данных (пример временной привязки разреза дан на рис. 10).

Моделирование производится в модуле *Mink*, которое позволяет строить литолого-акустические поплавовые модели по скважинным данным или с помощью графического интерфейса создавать теоретические модели среды (см. рис. 10). Параметры теоретических сигналов или произвольного загруженного импульса подбираются путем сопоставления реальной и синтетической трасс. В приложении доступен простой сверточный метод коэффициентов отражения и сверточный метод с учетом кратных волн, а также расчет полного волнового поля конечно-разностным методом в переменных Лагранжа [Немирович-Данченко, Стефанов, 1995] для 2D и 3D моделей.

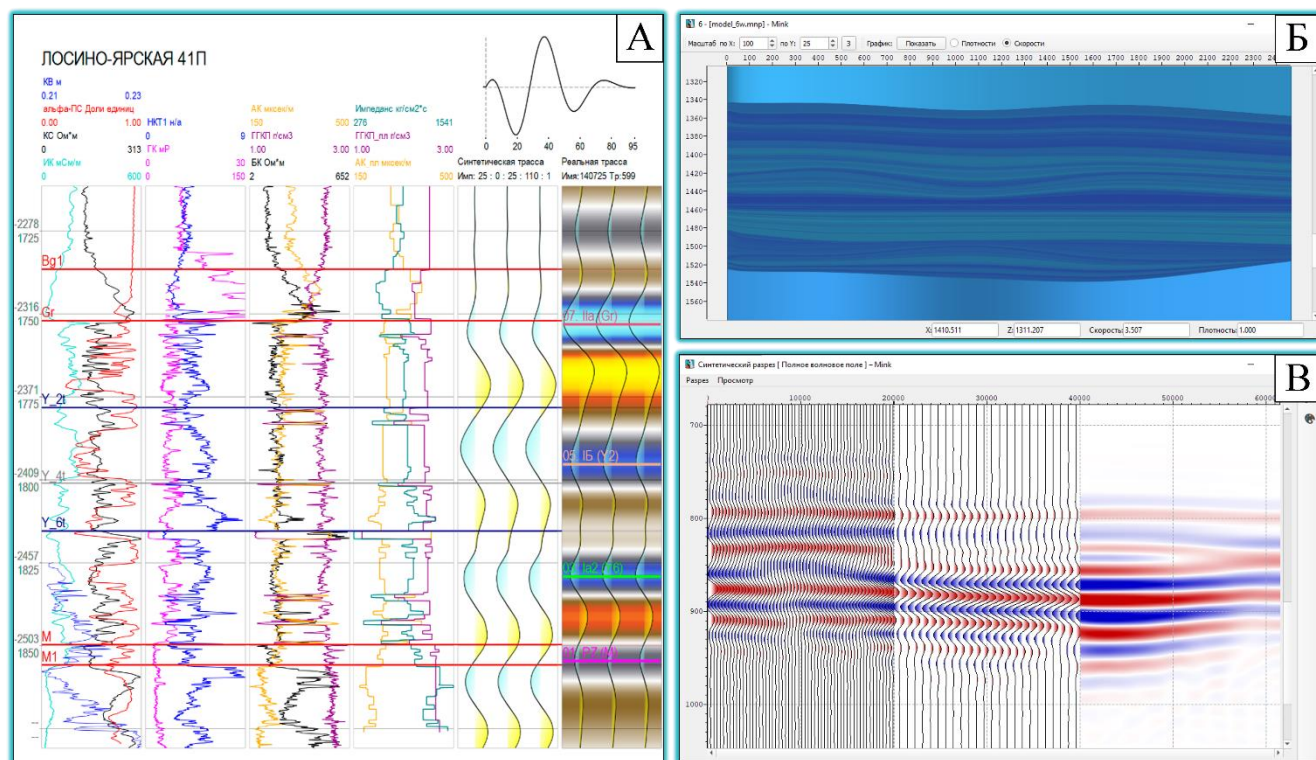


Рис. 10. Моделирование волновых полей: А- стратиграфическая привязка данных, Б – слоистая модель среды, В – синтетический временной разрез

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение W-SEIS разрабатывается с целью создания единого комплексного технологического решения для задач геологоразведочных работ, связанных с интерпретацией сейсмических и скважинных данных и призвано решить проблему создания большого количества рабочих мест с эффективным, недорогим, импортонезависимым инструментом.

Основными преимуществами и особенностями продукта являются:

- Низкие системные требования для компьютерного оборудования и высочайшая производительность в повседневных задачах интерпретатора;
- кроссплатформенность приложений, позволяющая использовать любые операционные системы, включая отечественные;
- поддержка широкого спектра форматов данных, используемых в индустрии;
- двунаправленный перенос интерпретационных проектов между ПО W-SEIS и Schlumberger Petrel посредством авторского плагина;
- возможность на стадии разработки адаптировать ПО под собственные задачи и произвести интеграцию с уже используемыми программными продуктами (например, поддержка собственных форматов или работа приложения с имеющимися базами данных);
- экономический эффект от снижения затрат на ПО и компьютерное оборудование.

На данный момент разработка комплекса продолжается, наиболее актуальными задачами на настоящий момент являются: добавление модуля 3D визуализации, завершение работ по созданию инструмента сейсмической инверсии, реализация возможности одновременного совместного использования одного интерпретационного проекта, расширение функционала работы с нейронными сетями, машинным обучением и распознаванием образов (в сотрудничестве с другими научно-исследовательскими группами ИНГГ СО РАН). Команда разработчиков планирует вывод программного комплекса за рамки внутреннего проекта института и приглашает к сотрудничеству заинтересованных специалистов научных и производственных организаций для всестороннего тестирования продукта и получения обратной связи.

Тема исследования соответствует госзаданию ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0009) и ГИН РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Аюнова Д.В., Канакова К.И., Ибрагимова С.М. Условия формирования подугольной и надугольной пачек горизонта Ю1 северо-западной части Калгачского наклонного мегавала // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVIII международной научной конференции (г. Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). Том 2. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2022. – № 1. – С. 18–26.

Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. – Новосибирск: Наука, 1983. – 215 с.

Канакова К.И., Татевосян Л.С. Методические приемы изучения нефтегазоносности карбонатных и терригенно-карбонатных отложений фундамента Западно-Сибирской плиты на примере месторождений томской области // Сборник материалов международной научно-практической конференции "Геосочи-2022. Актуальные проблемы геологии и геофизики в нефтегазовой отрасли". – Сочи, 2022. – С. 89–95.

Конторович В.А., Лапковский В.В. W-SEIS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610211 от 11.01.2011.

Лапковский В.В. Непрерывная сейсмостратиграфическая модель, как основа структурной интерпретации разрезов МОГТ // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 4. – С. 33–39.

Лапковский В.В. Оценка сходства поверхностей слоев с типовыми геоморфологическими и тектоническими формами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 6 т. – Новосибирск, СГУГиТ, 2018. – Т. 1. – С. 217–223.

Немирович-Данченко М.М., Стефанов Ю.П. Применение конечно-разностного метода в переменных Лагранжа для расчета волновых полей в сложнопостроенных средах // Геология и геофизика. – 1995. – № 36 (11). – С. 95–104.

Роженко А.И. Вариационные сплайны: учебное пособие в 3 ч. – Новосибирск, НГУ, 2009.

Указ Президента РФ от 30 марта 2022 г. N 166 "О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации". Официальный интернет-портал правовой информации, <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203300001?ysclid=lb204g36me322107836>.

Mahalanobis P.C. On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. – 1936. – Vol. 2 (1). – P. 49–55.

REFERENCES

Ayunova D.V., Kanakova K.I., Ibragimova S.M. Conditions for the formation of subcoal and supracol units of horizon Yu1 of the northwestern part of the Kalgach inclined megaswell // Interexpo GEO-Siberia – "Subsoil use. Mining. Directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geoecology": Proceedings of the XVIII International Scientific Conference (Novosibirsk, May 18–20, 2022) – IPGG SB RAS, Novosibirsk, 2022. – Vol. 2 (1). – P. 18–26.

Decree of the President of the Russian Federation of March 30, 2022 No. 166 "On measures to ensure the technological independence and security of the critical information infrastructure of the Russian Federation". Official Internet portal of legal information, <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203300001?ysclid=lb204g36me322107836>.

Kanakova K.I., Tatevosyan L.S. Methodical methods for studying the oil and gas potential of carbonate and terrigenous-carbonate deposits of the basement of the West Siberian plate on the example of fields in the Tomsk region // Collection of materials of the international scientific and practical conference "Geosochi-2022. Actual problems of geology and geophysics in the oil and gas industry". – Sochi, 2022. – P. 89–95.

Kontorovich V.A., Lapkovsky V.V. W-SEIS. Certificate of state registration of the computer program. No. 2011610211, dated 01.11.2011.

Lapkovsky V.V. Assessment of the similarity of layer surfaces with typical geomorphological and tectonic forms Interexpo GEO-Siberia: XIV International Scientific Congress (Novosibirsk, April 23–27, 2018): Intern. Scientific Conf. "Subsoil use. Mining. Directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geoecology": Collection of materials in 6 books. – SGUGiT, Novosibirsk, 2018. – Vol. 1. – P. 217–223.

Lapkovsky V.V. Continuous seismic stratigraphic model as the basis for the structural interpretation of CDP sections // Russian Journal of Seismic Technologies. – 2012. – Vol. 4. – P. 33–39.

Mahalanobis P.C. On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. – 1936. – Vol. 2 (1). – P. 49–55.

Nemirovich-Danchenko M.M., Stefanov Yu.P. Application of the finite difference method in Lagrange variables for calculating wave fields in complex media // Russian Geology and Geophysics. – 1995. – Vol. 36 (11). – P. 95–104.

Rozhenko A.I. Variational splines: study guide: in 3 books. – Novosibirsk State University, Novosibirsk, 2009.

Vasilenko V.A. Spline functions: theory, algorithms, programs. – Nauka, Novosibirsk, 1983. – 215 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КАНАКОВ Михаил Сергеевич – ведущий программист лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка программных инструментов для решения геологических задач.

ЛАПКОВСКИЙ Владимир Валентинович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией математического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование в области нефтегазовой геологии, заложения и заполнения осадочных бассейнов, компьютерные методы построения стратиграфических, структурных и сейсмогеологических моделей.

КОНТОРОВИЧ Владимир Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа ГГФ НГУ. Основные научные интересы: комплексный анализ геолого-геофизических данных, построение моделей геологического строения месторождений нефти и газа, выявление нефтегазоперспективных объектов, разработка геофизических методов поиска месторождений нефти и газа в различных осадочных комплексах Сибири.

КАНАКОВА Ксения Игоревна – младший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, ассистент кафедры геологии месторождений нефти и газа ГГФ НГУ. Основные научные интересы: комплексная интерпретация данных сейсморазведки и бурения, построение сейсмогеологических моделей.

ШОРОХОВ Юрий Сергеевич – ведущий программист лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка и реализация высокопроизводительных алгоритмов, математическое моделирование.

*Статья поступила в редакцию 30 ноября 2022 г.,
принята к публикации 22 декабря 2022 г.*



**СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕЗОЗОЙСКО–КАЙНОЗОЙСКОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВИЛЮЙСКОЙ ГЕМИСИНЕКЛИЗЫ
(НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕТЮНГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

М.О. Федорович^{1,2}, С.С. Иващенко², А.Ю. Космачева¹

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: ZahryaminaMO@ipgg.sbras.ru*

В работе выполнена комплексная интерпретация сейсмических материалов и данных бурения, построены наборы структурных карт и карт изопахит сейсмогеологических комплексов, которые послужили основой структурно-тектонического анализа и изучения истории формирования Среднетюнгского поднятия, контролирующего залежи газа в верхнепермских и нижнетриасовых отложениях. Сделан вывод о том, что в рельефе подошвы триаса Среднетюнгское поднятие было сформировано в меловую эпоху в результате роста тектонической активности территории всей Вилюйской гемисинеклизы.

Отражающий горизонт, сейсмогеологический комплекс, структурная характеристика, палеотектонический анализ, Саха (Якутия), Вилюйская гемисинеклиза, Среднетюнгское поднятие

**SEISMOGEOLOGICAL MODEL OF THE MESOZOIC–CAINOZOIC SEDIMENTARY COVER
OF THE WESTERN PART OF THE VILYUI HEMISYNECLISE
(BY THE EXAMPLE OF THE SREDNETYUNGSKOYE FIELD)**

M.O. Fedorovich^{1,2}, S.S. Ivashinenko², A.Yu. Kosmacheva¹

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

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: ZahryaminaMO@ipgg.sbras.ru*

In the work, a comprehensive interpretation of seismic materials and drilling data was carried out, sets of structural maps and isopach maps of seismogeological complexes were constructed, which served as the basis for structural-tectonic analysis and study of the history of the formation of the Srednetyungsky uplift, which controls gas deposits in the Upper Permian and Lower Triassic deposits. It is concluded that in the relief of the base of the Triassic, the Middle Tyung uplift was formed in the Cretaceous as a result of an increase in tectonic activity in the territory of the entire Vilyui hemisyncline.

Reflecting horizon, seismogeological complex, structural characteristic, paleotectonic analysis, Sakha (Yakutia), Vilyui hemisyncline, Middle Tyung uplift

ВВЕДЕНИЕ

Среднетюнгское газоконденсатное месторождение расположено в пределах Вилюйского и Верхневилюйского улусов Республики Саха (Якутия) в 100 км к северо-западу от г. Вилюйска, в среднем течении р. Тюнг – правого притока р. Вилюй. Месторождение открыто в 1977 г., освоено в 2007 г. [Драгунов,

1984; Конторович и др., 1994]. Согласно нефтегазогеологическому районированию Сибирской платформы территория исследования относится к Вилюйской нефтегазоносной области (НГО) Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции (НГП).

В тектоническом отношении месторождение занимает одноименную антиклиналь северо-восточного простирания в южной части Логлорского вала на западном борту Вилюйской гемисинеклизы (рис. 1).

Возврат с новыми научными представлениями и современными методиками на территории ранее выявленных газоконденсатных месторождений и малоизученные крупные локальные структуры в районах с максимальной мощностью мезозойских отложений способствует развитию минерально-сырьевой базы углеводородного сырья Якутии [Ситников и др., 2017].

Залежи конденсата и газа сконцентрированы в палеозойских (верхнепермских) и нижнетриасовых терригенных отложениях и контролируются антиклинальной структурой 22 × 4 км, амплитудой около 200 м по отражающему сейсмическому горизонту ТП (граница перми и триаса).

Роль региональных флюидоупоров для продуктивных комплексов являются относительно выдержанные по площади глинистые толщи мономской и неджелинской свит нижнетриасового возраста.

Для песчаных пластов внутри продуктивных горизонтов покрывками служат невыдержанные по площади глинистые или углисто-глинистые пропластки. Глинисто-углистые отложения перми, обогащенные террагенным органическим веществом (ОВ), для верхнепалеозой-мезозойских продуктивных комплексов Вилюйской гемисинеклизы являются одновременно и нефтегазопроизводящими [Конторович и др., 1988; Полякова и др., 1991].

В работе использованы материалы сейсморазведки 3D, площадью 230 км², данные 23 скважин, вскрывших пермские и девонские отложения (рис. 2), посевитные стратиграфические разбивки, описание керна, результаты испытаний и комплекс геофизических исследований скважин (ГИС). Комплексная интерпретация сейсмогеологических, геофизических и литологических данных повышает детальность и достоверность геологической модели месторождения. Цель исследования – история формирования нижнетриасовых и верхнепермских залежей газа в западной части Вилюйской гемисинеклизы на примере Среднетюнгского месторождения.

В Лено-Вилюйской НГП в верхнепалеозой-мезозойском осадочном чехле традиционно выделяют верхнепермский, нижнетриасовый и нижнеюрский газоносные мегакомплексы, которые перекрыты выдержанными по толщине на всей территории Лено-Вилюйской гемисинеклизы глинистыми пачками – региональными флюидоупорами. Верхнепермский мегакомплекс в кровле экранируется неджелинской свитой (нижний триас, индский ярус), нижнетриасовый (инд–оленок) – мономской свитой (нижний мел, оленек), нижнеюрский (геттанг–нижний аален) – сунтарской свитой (нижняя–средняя юра, нижний аален). Региональные флюидоупоры обладают относительно низкими акустическими свойствами, и к ним приурочены опорные сейсмические реперы – отражающие горизонты (табл. 1).

Наличие в рассматриваемом разрезе реперных поверхностей позволяет разделить триасовые и юрские отложения на следующие сейсмогеологические комплексы:

- нижнетриасовый (инд–оленок);
- средне-верхнетриасовый (верхний оленек–норий);
- нижнеюрский (геттанг–нижний аален);
- средне-верхнеюрский (аален–титон);
- мел-кайнозойский (берриас–маастрихт–кайнозой).

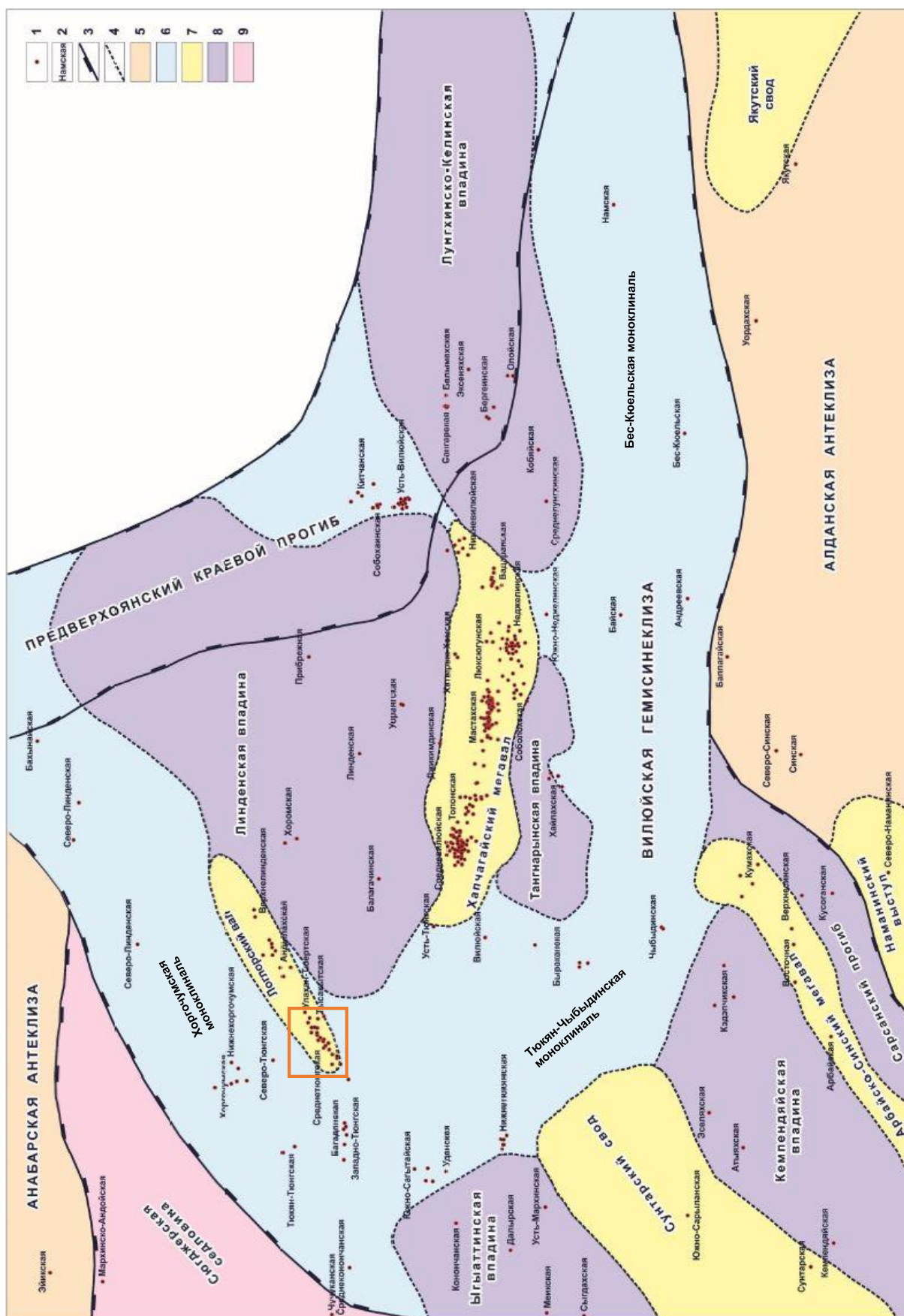


Рис. 1. Карта структурно-тектонического районирования Вилуйской гемисинеклизы (по материалам АО «Якутскгеофизика»): 1 – скважины; 2 – название площади бурения; границы: 3 – надпорядковых структур, 4 – структур I-го порядка; надпорядковые структуры: 5 – положительные, 6 – отрицательные; структуры I-го порядка: 7 – положительные, 8 – отрицательные; 9 – промежуточные структуры

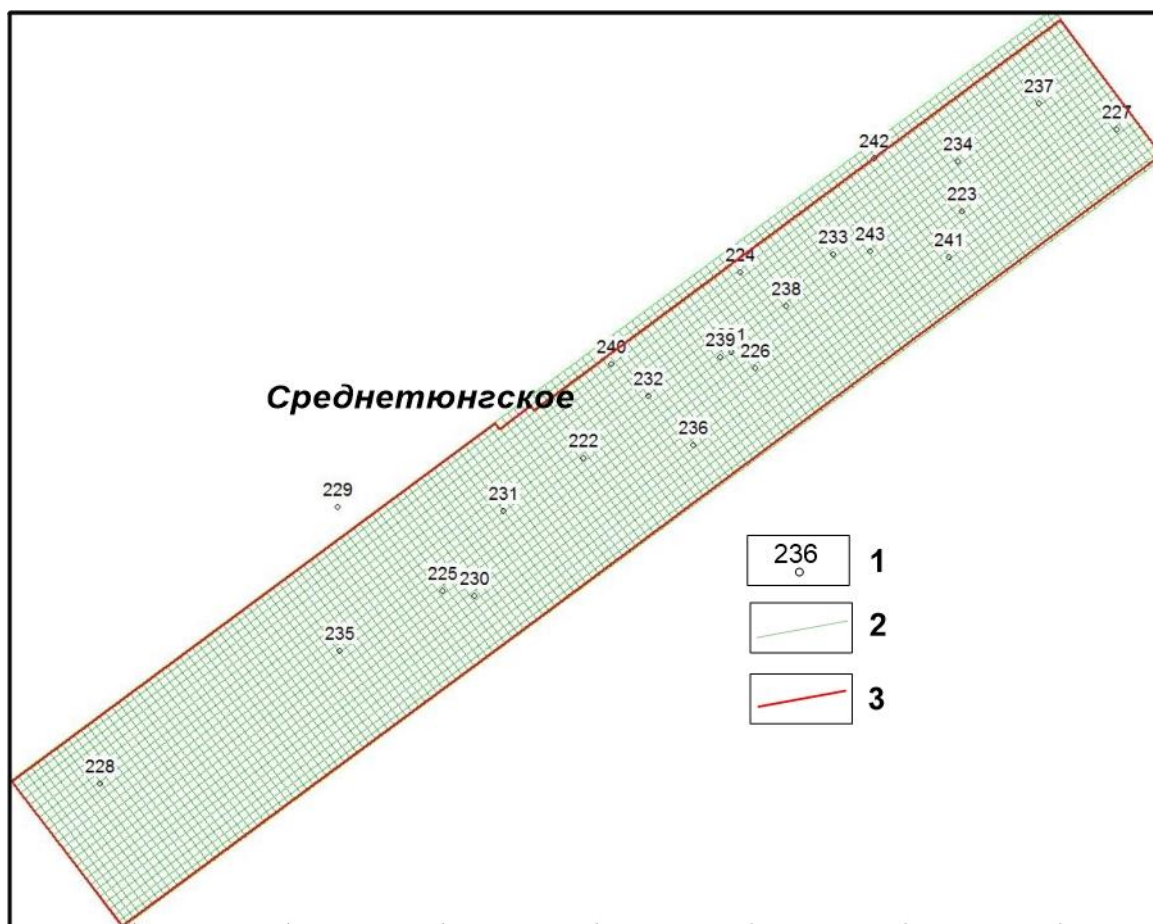


Рис. 2. Схема фактического материала Среднетюнгского месторождения: 1 – скважины; 2 – линии профилей сейсморазведки 3D; 3 – контур района работ

Таблица 1

Сейсмогеологические комплексы Вилюйской гемисинеклизы

Сейсмогеологический комплекс	Ограничивающие отражающие горизонты		Время накопления	Стратиграфические подразделения (свиты)
	подошва	кровля		
нижнетриасовый	ТП	Т	инд–оленок	неджелинская, таганджинская, мономская
средне-верхнетриасовый	Т	ЮТ	верхний оленек–норий	тулурская
нижнеюрский	ЮТ	Ю ₂	геттанг–нижний аален	кызылсырская, сунтарская
средне-верхнеюрский	Ю ₂	Ю ₃	аален–титон	якутская, нижневилюйская, марыкчанская, бергеинская
мел–кайнозойский	Ю ₃	современная поверхность	берриас–маастрихт–кайнозой	батылхская, эксеняхская, хатырыкская, аграфеновская и чиримыйская (тимердяхская)

В верхней части осадочного чехла залегает аллювиальный комплекс отложений мелового и кайнозойского возрастов (рис. 3).

Кровля перми контролируется отражающим горизонтом (ОГ) ТП, кровля нижнего триаса – ОГ Т, подошва юры – ОГ ЮТ, кровля нижнеюрских отложений – ОГ Ю₂, средне-верхнеюрские отложения – ОГ Ю₃.

В рамках проведенных исследований выполнена комплексная интерпретация сейсморазведки 3D и данных бурения, созданы сейсмогеологические разрезы и палеоразрезы, построены наборы структурных карт и карт толщин сейсмогеологических комплексов, послуживших основой для структурно-тектонического анализа и изучения истории формирования Среднетюнгского поднятия.

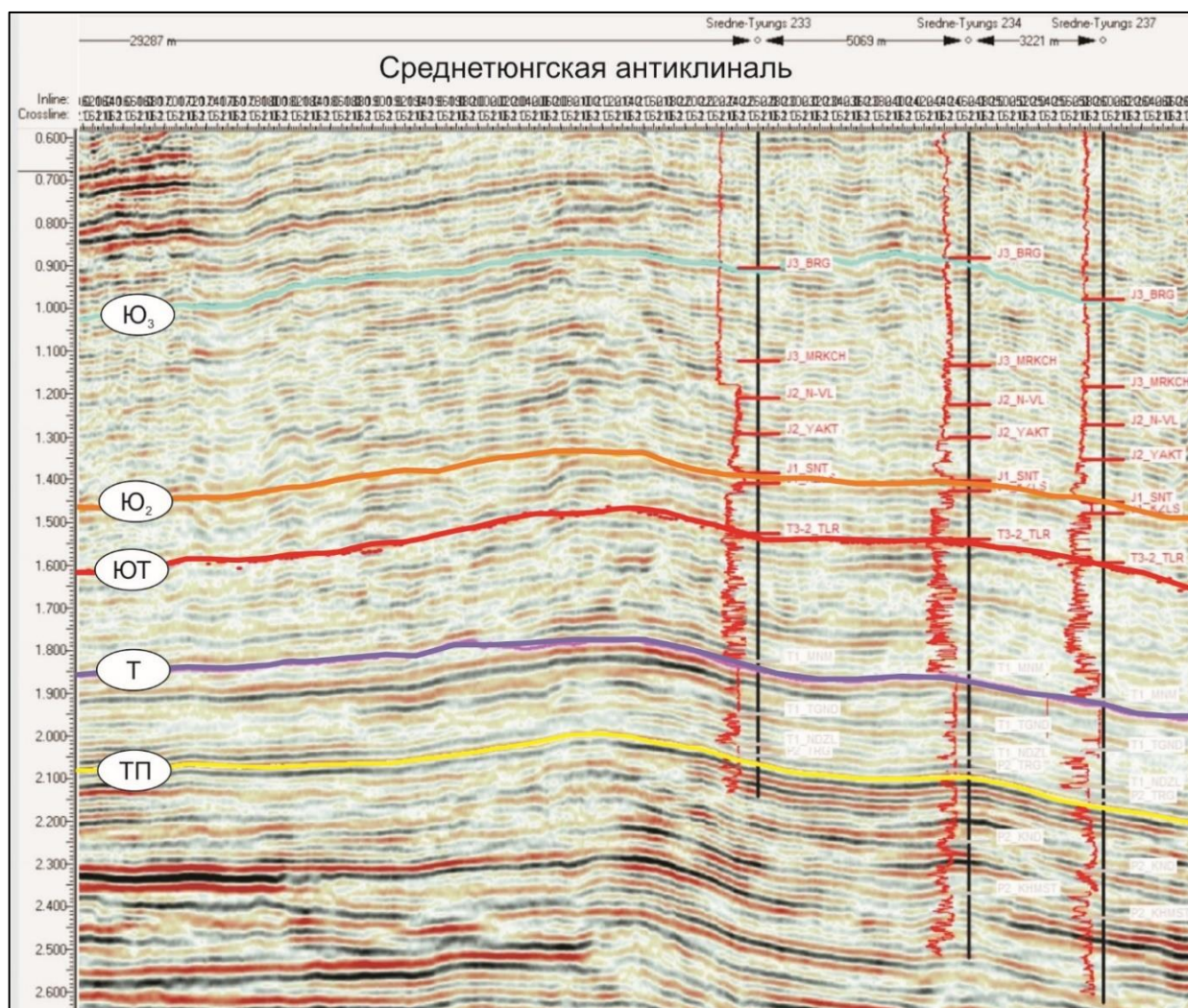


Рис. 3. Сейсмогеологическая характеристика Среднетюнгского месторождения

СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Кровля пермских отложений ОГ ТП (рис. 4, А). Среднетюнгское месторождение приурочено к одноименному куполовидному поднятию, которое в рельефе кровле перми имеет вытянутую в северо-восточном направлении валообразную форму и оконтурено на абсолютной отметке –2750 м. Площадь структуры составляет 74 км², амплитуда – 200 м. На западе и северо-западе Среднетюнгское поднятие граничит с Хоргочумской моноклиной, на юге и юго-востоке – с Тюкян-Чыбыдинской моноклиной, на

востоке и северо-востоке – с Линденской впадиной, занимающей наиболее погруженные части Вилюйской гемисинеклизы (см. рис. 1). Поднятие осложнено двумя куполами, которые в структурном плане ОГ оконтурены на абсолютной отметке –2700 м. Площадь южного купола составляет 30 км², амплитуда – 160 м. Площадь северного купола – 7 км², амплитуда – 70 м.

Кровля нижнетриасовых отложений ОГ Т (рис. 4, Б). В структурном плане кровли нижнетриасовых отложений Среднетюнгское поднятие амплитудой 245 м площадью 117 км² оконтурено изогипсой –2400 м, практически повторяет очертания поднятия, выделенного в рельефе кровли перми, и осложнено двумя куполами по абсолютной отметке –2300 м. Площадь южного купола составляет 29 км², амплитуда – 145 м. Площадь северного купола – 6 км², амплитуда – 35 м.

Подошва юрских ОГ ЮТ (рис. 4, В) и **кровля нижнеюрских отложений ОГ Ю₂** (рис. 4, Г). Рельеф поверхности подошвы юры и кровли нижней юры визуальнo повторяет рельеф нижележащих отложений. Структурный план подошвы юры становится положе и два купола, осложняющие Среднетюнгское поднятие, объединяются в один, вытянутый в северо-восточном направлении, оконтуренный изогипсой –1825 м. Площадь купола составляет 36 км², амплитуда – 115 м. Рельеф кровли нижнеюрских отложений становится контрастнее, площадь купола увеличивается почти в два раза и составляет 71 км², амплитуда – 142 м. Отчетливо видна тенденция к разделению единого купола Среднетюнгского поднятия на два.

Кровля верхнеюрских отложений ОГ Ю₃ (рис. 4, Д). В структурном плане кровли верхнеюрских отложений на Среднетюнгском поднятии вновь выделяются два обособленных контрастных купола – южный и северный, оконтуренных изогипсой –750 м, площадью 30 и 9 км², амплитудой 120 и 80 м соответственно.

Дизъюнктивная тектоника определяет основные черты строения разреза и условия образования скоплений УВ. Формирование разрывных нарушений связано с интенсивностью тектонических процессов, происходивших на разных этапах развития региона [Конторович, 2009]. В структурных планах по прослеживаемым отражающим горизонтам выделяются протяженные разломы северо-восточной ориентировки. Разрывные нарушения, секущие верхнепалеозойско-мезозойскую толщу пород, обладают незначительными амплитудами смещений и затухают на различных стратиграфических уровнях [Тучков и др., 1968; Тучков, 1973; Микуленко, 1983] – в отложениях перми, триаса, юры или мела [Космачева, 2021; Космачева, Федорович, 2021] (рис. 5, см. рис. 4).

Таким образом,

- структурные поверхности реперных ОГ на территории исследования относительно повторяют друг друга;
- замкнутая положительная структура Среднетюнгского поднятия, вытянутая в северо-восточном направлении, отражается в рельефе всех горизонтов, меняясь по площади и амплитуде;
- в рельефе подошвы триаса, кровли нижнего триаса и кровли верхней юры осложнено двумя куполами. Площадь куполов существенно не меняется, амплитуда изменяется разнонаправленно;
- протяженные разломы северо-восточной ориентировки осложняют склоны Среднетюнгского поднятия, имеют незначительные амплитуды смещений и затухают на различных стратиграфических уровнях;
- на всех структурных планах отмечается региональное возвышение территории в юго-западном направлении.

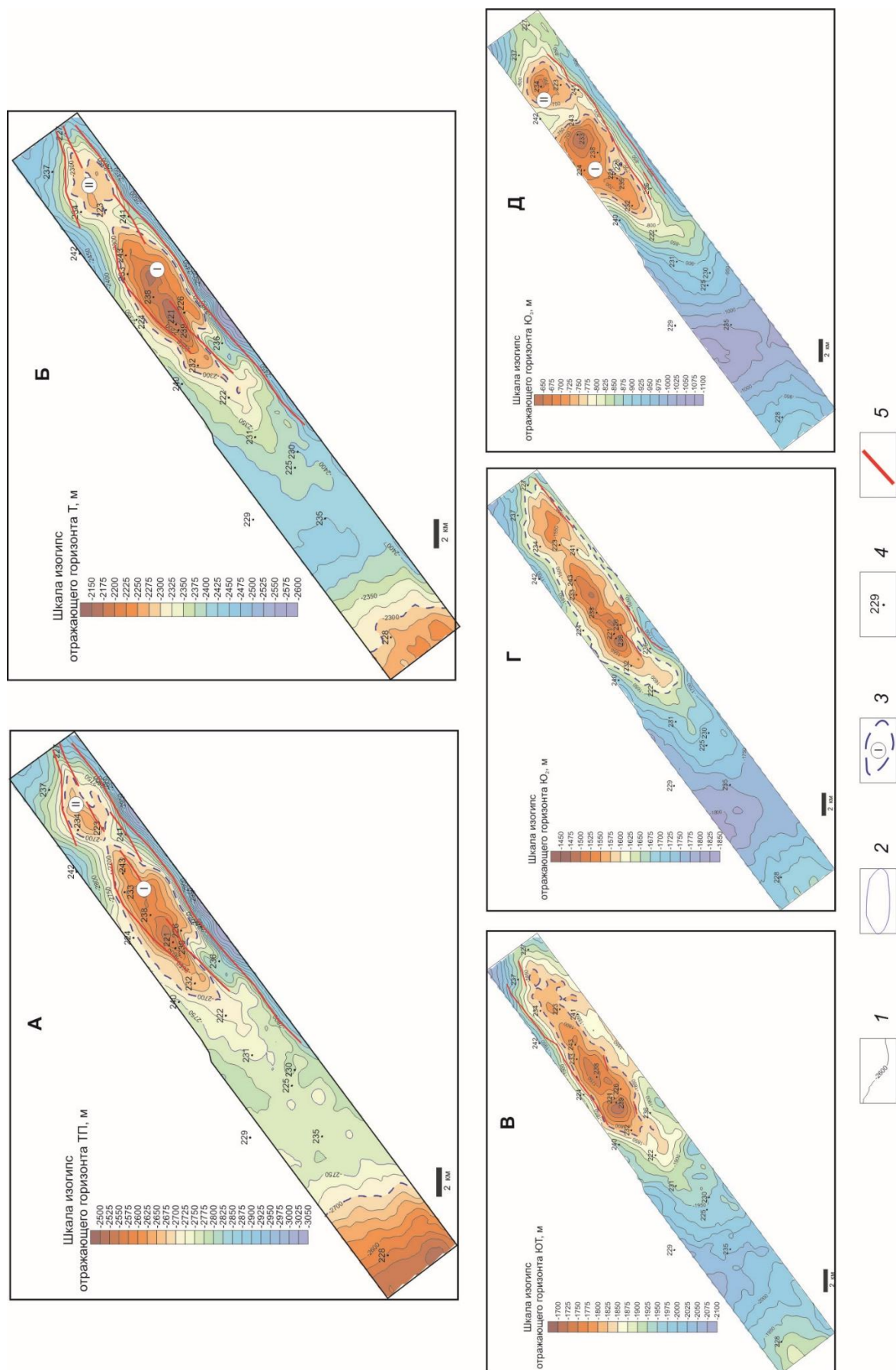


Рис. 4. Структурные карты по кровле пермских отложений (А), нижнетриасовых отложений (Б), подошве юрских отложений (Г), подошве меловых отложений (Д): 1 – изолинии (м), 2 – локальные поднятия, 3 – купола (I – южный, II – северный), 4 – скважины и их номер, 5 – разрывные нарушения

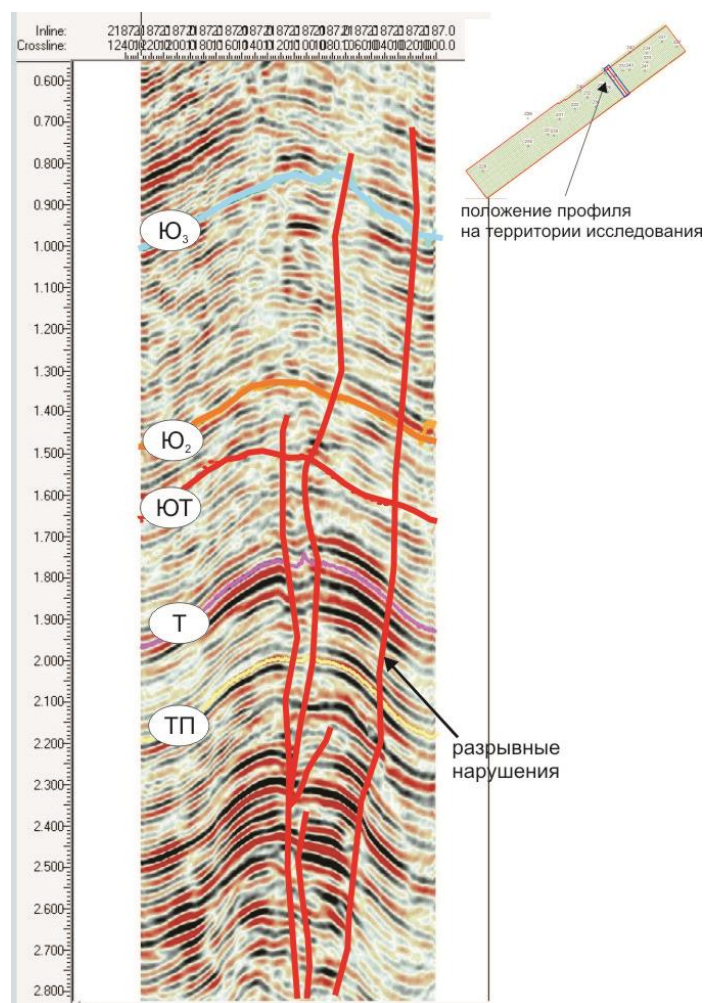


Рис. 5. Характер разрывных нарушений Среднетюнговского месторождения

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СРЕДНЕТЮНГСКОГО ПОДНЯТИЯ

Изучение истории тектонического развития Среднетюнговского месторождения в мезозое и кайнозое выполнялось с использованием «метода мощностей» [Белоусов, 1940; Гарецкий, Яншин, 1960].

Преимущественно морские глинистые пачки, залегающие в кровлях осадочных мегакомплексов, распространены на большей части Вилуйской гемисинеклизы. Они относительно выдержаны по мощности и формировались в эпохи тектонического покоя в условиях выровненного рельефа, что позволяет рассматривать их в качестве квазиизохронных поверхностей выравнивания и использовать при палеотектонических реконструкциях [Конторович, 2009]. В рамках такого подхода характер изменения толщин осадочных комплексов позволяет восстановить тектонические процессы, протекавшие на разных этапах развития территории. Зонам увеличенных толщин комплексов будут отвечать области относительного прогибания, а пониженных толщин – области, испытывавшие тенденцию к относительному росту.

На протяжении мезозойско-кайнозойской истории западной части Вилуйской гемисинеклизы на территории Среднетюнговского поднятия накопилось в среднем 2775 м осадков, средний темп осадконакопления составил 11 м/млн лет. В таблице 2 даны сведения о толщинах основных осадочных комплексов, продолжительности их формирования и темпах осадконакопления.

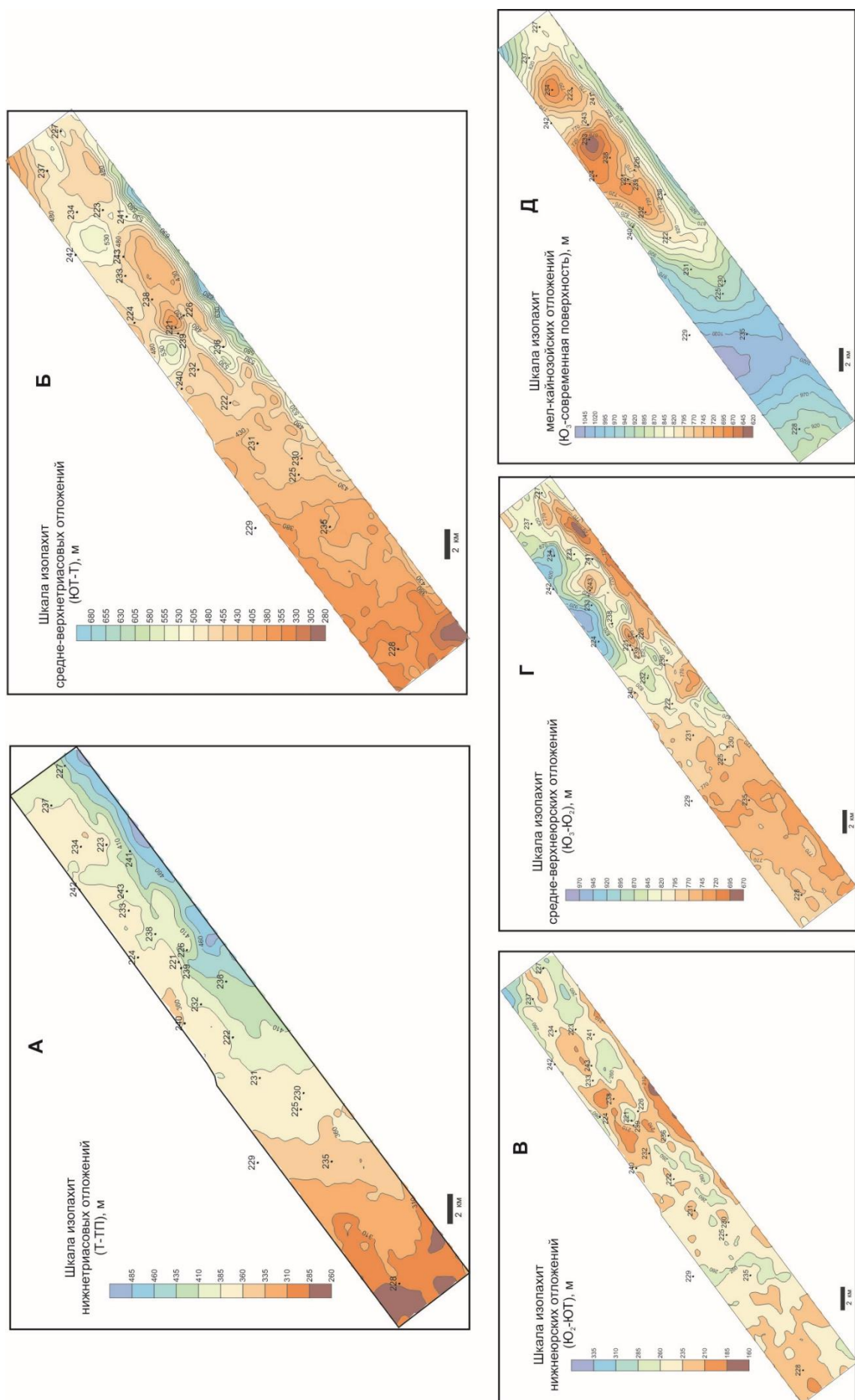


Рис. 6. Карты изопакит нижнетриасового (А), средне-верхнетриасового (Б), нижнеюрского (В), средне-верхнеюрского (Г) и мел-кайнозойского (Д) сейсмокомплексов. 1 – изопакиты, (м), 2 – скважины и их номер

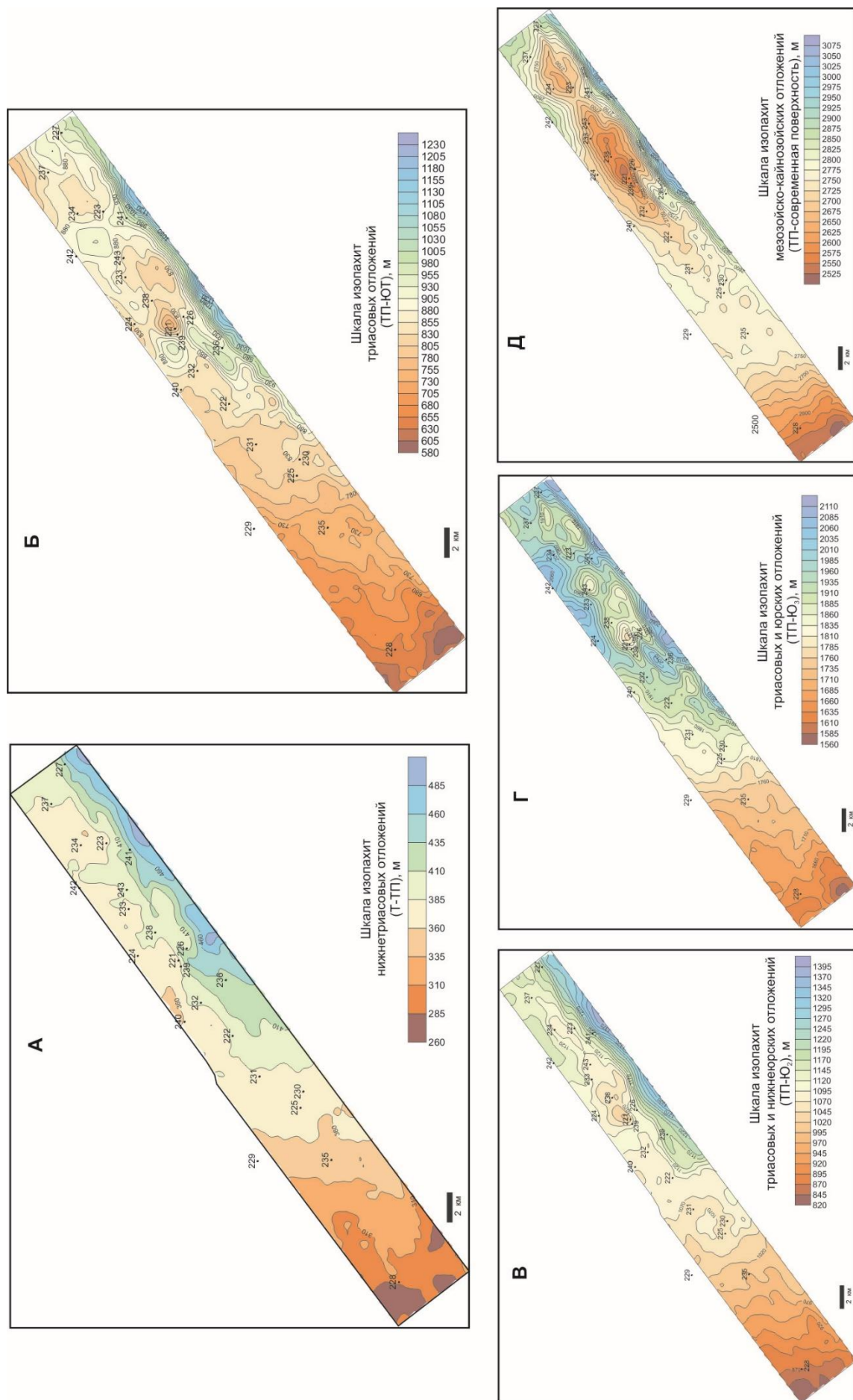


Рис. 7. Динамика изменения рельефа кровли пермских отложений. Палеоструктурная карта подошвы триаса на время формирования: А – мономской свиты (ранний триас, опелек); Б – тулурской свиты (крюля триаса); В – сунтарской свиты (нижняя юра, нижний аален); Г – бергеинской свиты (крюля юры); Д – современной рельеф кровли перми

Нижнетриасовый сейсмокомплекс. На территории исследования толщина нижнетриасовых отложений изменяется в диапазоне от 260 до 500 м (рис. 6, А), время формирования комплекса составляет 6 млн лет, средний темп осадконакопления – 63 м/млн лет. Анализ карты изопахит нижнетриасовых отложений говорит о том, что восточная и северо-восточная части района работ испытывали тенденцию к относительному прогибанию, а южная и юго-западная части – к относительному воздыманию. Среднетюньгское поднятие в рельефе нижнего триаса не выделяется.

Средне-верхнетриасовый сейсмокомплекс. В средне-верхнетриасовое время рельеф поверхности исследуемой территории становится более расчлененным и изменяется в диапазоне от 280 до 680 м (рис. 6, Б). Время формирования комплекса составляет 45.4 млн лет, средний темп осадконакопления – 11 м/млн лет. В целом, рельеф средне-верхнетриасовых отложений относительно подобен рельефу нижнетриасового комплекса. Так же восточная и северо-восточная части испытывают относительное прогибание, а южная и юго-западная – относительное воздымание. Лишь в западной части территории появляются небольшие впадины, и на месте Среднетюньгского поднятия наблюдается формирование небольших куполов.

Таблица 2

Темп осадконакопления мезозойско-кайнозойских мегакомплексов

Осадочный комплекс	Начало	Конец	Протя- жен- ность	Min тол- щи- на	Max тол- щи- на	Сред- няя тол- щина	Темп осадкона- копления
	млн лет			м			м/млн лет
Нижнетриасовый (ТП–Т)	251	245	6	260	500	380	63
Средне- верхнетриасовый (Т–ЮТ)	245	199.6	45.4	280	680	480	11
Нижнеюрский (ЮТ–Ю ₂)	199.6	175.6	24	160	340	250	10
Средне- верхнеюрский (Ю ₂ –Ю ₃)	175.6	145.5	30.1	670	970	820	27
Мел-кайнозойский (Ю ₃ -современная поверхность)	145.5	1.8	143.7	620	1060	840	6
Mz–Kz	251	1.8	249.2	2500	3050	2775	11

Нижнеюрский и средне-верхнеюрский этапы развития характеризовались невысокой активностью вертикальных тектонических движений (рис. 6, В, Г). В юрское время происходило относительное воздымание территории в южном, восточном и северо-восточном направлениях,

продолжалось формирование куполов Среднетюнгского поднятия, а относительное прогибание наблюдается в северо-западной части территории исследования. Особенностью развития седиментационного бассейна в юрский период являются значительные изменения уровня моря [Фролов и др., 2019]. Морской бассейн седиментации то расширялся, то сменялся континентальным осадконакоплением и за 54.1 млн. лет накопилось более 1000 м отложений различного генезиса, темп осадконакопления составил 37 м/млн лет.

Мел-кайнозойский этап развития характеризуется интенсивными тектоническими движениями. Мощность отложений комплекса меняется от 620 до 1060 м, перепад толщин составляет 440 м, темп осадконакопления – 6 м/млн лет. Именно в это время был сформирован современный облик Среднетюнгского поднятия (рис. 6, Д).

Анализ истории формирования Среднетюнгского поднятия позволяет сделать следующие выводы:

1. В нижнетриасовое и средне-верхнетриасовое время территория развивалась унаследованно. Среднетюнгское поднятие в рельефе нижнетриасовых отложений не выделяется, в средне-верхнетриасовое время начинается формирование небольших куполов.
2. В юрское время формирование куполов Среднетюнгского поднятия продолжалось при невысокой активности вертикальных тектонических движений.
3. В мел-кайнозойский этап развития был сформирован современный облик Среднетюнгского поднятия.

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ СРЕДНЕТЮНГСКОГО ПОДНЯТИЯ

Верхнепермские и нижнемеловые залежи Среднетюнгского месторождения контролируются куполовидным поднятием валообразной формы северо-восточного простирания, выделенным в рельефах подошвы и кровли нижнетриасовых отложений, рассмотрим динамику формирования этой структуры.

На рисунке 7 показано, как менялся рельеф нижнетриасовых отложений в мезозойское время. На конец формирования мономской свиты (рис. 7, А) Среднетюнгского поднятия не выделяется. Территория исследования представляет собой моноκлиналь, погружающуюся на северо-восток. На конец формирования тулурской (рис. 7, Б), сунтарской (рис. 7, В) и бергеинской (рис. 7, Г) свит формируются небольшие купола, амплитудой 60–80 м. Лишь в меловой период (рис. 7, Д) сформировались купола Среднетюнгского поднятия, амплитудой до 200 м. Прирост амплитуд в меловое время составляет 80 %.

Таким образом, главный этап формирования структур связан с меловой эпохой. Тектоническая активность, приуроченная к раннему мелу, способствовала образованию как крупных структур, так и локальных – потенциальных ловушек УВ. К концу мелового времени сформировался соответствующий современному структурный план территории исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В западной части Вилуйской гемисинеклизы перспективными в отношении нефтегазоносности являются верхнепермские и нижнетриасовые отложения. Анализ материалов 3D сейсморазведки и глубокого бурения позволяет сделать вывод о том, что залежи газа Среднетюнгского месторождения контролируются антиκлинальной ловушкой – структурой IV порядка, площадью около 120 км².

Структурные поверхности реперных ОГ качественно совпадают и характеризуются значительным перепадом высот.

Прослеживаемые тектонические нарушения малоамплитудные и затухают на различных уровнях – в верхней перми, триасе, юре или нижнем мелу.

Главный этап формирования структуры связан с меловой эпохой. В рельефе подошвы триасовых отложений Среднетюнгское поднятие было сформировано в эпоху тектонической активизации территории к концу мелового времени.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0008 «Цифровые геолого-геофизические модели Лено-Тунгусской и Лено-Вилуйской нефтегазоносных провинций, анализ закономерностей размещения нефтяных и газовых месторождений, оценка перспектив нефтегазоносности в основных продуктивных комплексах верхнего протерозоя и фанерозоя, включая карбонатные горизонты венда и кембрия с трудноизвлекаемыми ресурсами, изучение влияния интрузий траппов на нефтегазоносность».

ЛИТЕРАТУРА

Белоусов В.В. Мощность отложений как выражение режима колебательных движений земной коры // Советская геология. – 1940. – № 2–3. – С. 14–28.

Гарецкий Р.Г., Яншин А.Л. Тектонический анализ мощностей. Методы изучения тектонических структур. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 115–166.

Драгунов О.Д. Подсчет запасов газа и конденсата верхнепермских продуктивных горизонтов Среднетюнгского месторождения ЯАССР. Т. 1. – 1984. – 396 с.

Конторович А.Э., Полякова И.Д., Колганова М.М., Соболева Е.И. Превращения органического вещества в мезо– и апокатагенезе // Советская геология. – 1988. – № 7. – С. 26–36.

Конторович А.Э., Гребенюк В.В., Фрадкин Г.С., Бакин В.Е., Дивина Т.А., Зотеев А.М., Матвеев В.Д., Матвеев А.И., Микуленко К.И., Полякова И.Д., Сафронов А.Ф., Соболева Е.И., Хмелевский В.Б. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 4. Лено-Вилуйский бассейн. – Новосибирск, 1994. – 76 с.

Конторович В.А. Мезозойско-кайнозойская тектоника и нефтегазоносность Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2009. – № 50 (4). – С. 461–474.

Космачева А.Ю. Структурная характеристика, история тектонического развития и нефтегазоносность верхнепалеозойских и мезозойских отложений Вилуйской гемисинеклизы // Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2021»: Материалы конф. (Москва, 12–23 апр. 2021 г.). – М., 2021, https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22043/121574_uid340149_report.pdf.

Космачева А.Ю., Федорович М.О. Структурная характеристика и история тектонического развития мезозойских отложений Вилуйской гемисинеклизы // Геофизические технологии. – 2021. – № 1. – С. 4–18, doi: 10.18303/2619-1563-2021-1-4.

Микуленко К.И. Тектоника осадочного чехла краевых депрессий Сибирской платформы (в связи с нефтегазоносностью) // Геология и нефтегазоносность мезозойских седиментационных бассейнов Сибири. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 90–104.

Полякова И.Д., Богородская Л.И., Соболева Е.И. Преобразование органического вещества угленосных отложений Вилуйской синеклизы на больших глубинах // Геохимия нефтегазовых отложений Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1991. – С. 48–57.

Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А., Погодаев А.В., Слепцова М.И. Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилуйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – № 12 (1). – С. 1–20, doi: 10.17353/2070-5379/9_2017.

Тучков И.И. Палеогеография и история развития Якутии в позднем палеозое и мезозое. – М.: Наука, 1973. – 210 с.

Тучков И.И., Андрианов В.Н., Горнштейн Д.К., Киселев А.Е., Семенов Г.Т., Ушаков А.И., Фрадкин Г.С. История развития и палеогеографические условия накопления нефтегазовых отложений на территории Якутии // Геологическое строение и нефтегазовость восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов. – М.: Недра, 1968. – С. 25–41.

Фролов С.В., Карньюшина Е.Е., Коробова Н.И., Бакай Е.А., Курдина Н.С., Крылов О.В., Тарасенко А.А. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилуйского нефтегазового бассейна // Георесурсы. – 2019. – № 21 (2). – С. 13–30, doi: 10.18599/grs.2019.2.13-30.

REFERENCES

Belousov V.V. The thickness of deposits as an expression of the mode of oscillatory movements of the Earth's crust // Soviet Geology. – 1940. – Vol. 2–3. – P. 14–28.

Dragunov O.D. Calculation of gas and condensate reserves of the Upper Permian productive horizons of the Srednetyungsky field of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. Vol. 1. – 1984. – 396 p.

Frolov S.V., Karnyushina E.E., Korobova N.I., Bakay E.A., Kurdina N.S., Krylov O.V., Tarasenko A.A. Features of the structure, sedimentary complexes and hydrocarbon systems of the Leno-Vilyuisky oil and gas basin // Georesources. – 2019. – Vol. 21 (2). – P. 13–30, doi: 10.18599/grs.2019.2.13-30.

Garetskiy R.G., Yanshin A.L. Tectonic power analysis. Methods for studying tectonic structures. – Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1960. – P. 115–166.

Kontorovich A.E., Polyakova I.D., Kolganova M.M., Soboleva E.I. Transformations of organic matter in meso- and apocatagenesis // Soviet Geology. – 1988. – Vol. 7. – P. 26–36.

Kontorovich A.E., Grebenyuk V.V., Fradkin G.S., Bakin V.E., Divina T.A., Zoteev A.M., Matveev V.D., Matveev A.I., Mikulenko K.I., Polyakova I.D., Safronov A.F., Soboleva E.I., Khmelevsky V.B. Petroleum basins and regions of Siberia. Lena-Vilyui Basin. – SO RAN, Novosibirsk, 1994. – 107 p.

Kontorovich V.A. The Meso-Cenozoic tectonics and petroleum potential of West Siberia // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50 (4). – P. 346–357, doi: 10.1016/j.rgg.2009.03.012.

Kosmacheva A.Yu. Structural characteristics, history of tectonic development and oil and gas potential of the Upper Paleozoic and Mesozoic deposits of the Vilyui hemisyncline // International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2021": Proceedings of Conf. (Moscow, 12–23 April 2021). – M., 2021, https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22043/121574_uid340149_report.pdf, free.

Kosmacheva A.Yu., Fedorovich M.O. Structural description and tectonic development history of the Mesozoic deposits in the Vilyui hemisyncline // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2021. – Vol. 1. – P. 4–18, doi: 10.18303/2619-1563-2021-1-4.

Mikulenko K.I. Tectonics of the sedimentary cover of the marginal depressions of the Siberian Platform (in connection with the oil and gas potential) // *Geology and oil and gas potential of the Mesozoic sedimentary basins of Siberia*. – Nauka, Novosibirsk, 1983. – P. 90–104.

Polyakova I.D., Bogorodskaya L.I., Soboleva E.I. Transformation of organic matter in coal-bearing deposits of the Vilyuy syncline at great depths // *Geochemistry of oil and gas bearing deposits of Siberia*. – SNIIGiMS, Novosibirsk, 1991. – P. 48–57.

Sitnikov V.S., Alekseev N.N., Pavlova K.A., Pogodaev A.V., Sleptsova M.I. Newest forecast and data updating of Vilyuy Syncline (Eastern Siberia) petroleum objects // *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. – 2017. – Vol. 12 (1). – P. 1–20, doi: 10.17353/2070-5379/9_2017.

Tuchkov I.I. Paleogeography and history of the development of Yakutia in the Late Paleozoic and Mesozoic. – Nauka, Moscow, 1973. – 210 p.

Tuchkov I.I., Andrianov V.N., Gorshtein D.K., Kiselev A.E., Semenov G.T., Ushakov, A.I., Fradkin G.S. History of development and paleogeographic conditions for the accumulation of oil and gas deposits on the territory of Yakutia // *Geological structure and oil and gas potential of the eastern part of the Siberian platform and adjacent areas*. – Nedra, Moscow, 1968. – P. 25–41.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ФЕДОРОВИЧ Марина Олеговна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа Сибирской платформы Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Специалист в области геологии, поиска и разведки месторождений нефти и газа Западной и Восточной Сибири. Область научных интересов: расчленение и корреляция отложений юры и мела Западной Сибири, геологическое строение и оценка перспектив нефтегазоносности на основе комплексирования сейсмогеологических, геохимических и литологических исследований с использованием бассейнового и фациального моделирования в программных комплексах PetroMod компании «Шлюмберге» и DIONISOS компании «BeicipFranlab».

ИВАШИНЕНКО Сергей Сергеевич – студент 4 курса бакалавриата геолого-геофизического факультета, направления геологии и геохимии горючих ископаемых. Будущий специалист в области геологии поиска и разведки месторождений нефти и газа западной и восточной Сибири. Область научных интересов: реконструкция истории тектонического развития и сравнительный анализ нефтегазоносных комплексов, отложений триаса, юры на бортах Вилуйской гемисинеклизы.

КОСМАЧЕВА Алина Юрьевна – научный сотрудник лаборатории проблем геологии, разведки и разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Специалист в области геологии, поиска и разведки месторождений нефти и газа Западной и Восточной Сибири. Область научных интересов: геологическое строение и оценка перспектив нефтегазоносности на основе комплексирования сейсмогеологических, геохимических и литологических исследований с использованием бассейнового и фациального моделирования в программных комплексах PetroMod компании «Шлюмберге» и DIONISOS компании «BeicipFranlab».

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2022 г.,
принята к публикации 22 декабря 2022 г.*



ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.А. Петроченко³, А.Ю. Задоев^{1,2}, А.А. Дучков^{1,2,3}, Г.М. Митрофанов^{1,2,3}

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,*

³*Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru*

В данной работе рассматривается пример использования физического моделирования для получения сейсмических данных, подобных тем, которые регистрируются во время полевых съемок. Показано, что особенности данных близки к тем, что наблюдаются в реальном эксперименте. Это служит обоснованием возможности тестирования методов обработки, используемых в практике сейсморазведки на данных лабораторного моделирования сейсмических съемок. В качестве примера в работе приводятся результаты типовой обработки набора модельных данных по методике МОВ ОГТ с получением итогового сейсмического разреза, демонстрирующего все структурные особенности используемой модели среды.

Физическое моделирование, сейсморазведка, обработка данных сейсморазведки

TESTING PROCESSING ALGORITHMS FOR SEISMIC DATA FROM LABORATORY MODELING

T.A. Petrochenko³, A.Yu. Zadoev^{1,2}, A.A. Duchkov^{1,2,3}, G.M. Mitrofanov^{1,2,3}

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

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

³*Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,
e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru*

In this paper, we consider an example of obtaining data similar to seismic surveys in the process of conducting physical modeling. It is shown that the features of the data are close to those observed in a real experiment. This is proof of the possibility of testing the processing methods used in the practice of seismic exploration on the data of laboratory modeling of seismic surveys. In particular, the application of a certain set of processing procedures for the considered data related to the simulated environmental object showed that the resulting time sections contain all the inherent structural features of the model.

Physical modeling, seismic exploration, seismic processing

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов распространения упругих колебаний в различных средах длительное время осуществлялось путем проведения прямых измерений или посредством выполнения физического

моделирования. Это позволяло изучать материальные объекты и их свойства, а также выявлять закономерности и формулировать законы распространения упругих колебаний в различных средах [Terada, Tsuboi, 1927; Hilterman, 1970]. Полученные законы переводились в математическую форму и в последующем использовались уже для численного моделирования, которое, с развитием вычислительной техники, в итоге вышло на первый план в большинстве применений.

Математическое моделирование очень удобно и эффективно, однако полностью ограничено той теоретической моделью, которая лежит в его основе. Часто используемая модель является сильно упрощенной, и это делает математическое моделирование для ряда ситуаций неполным либо некорректным. Физическое же моделирование таких процессов, выполняемое на современном уровне [Wong et al., 2009, Попов и др., 2016], позволяет накопить эталонные знания о зависимостях «среда-поле-отклик» минуя этап математических моделей. Кроме того, физическое моделирование процессов и сред призвано повысить эффективность математических моделей среды и ее взаимодействий с различными, в частности сейсмическими, полями. В работе [Wang et al., 2018] представлена информация о лабораторных автоматических установках физического моделирования сейсморазведки, работающих по всему миру. Эти установки обеспечивают выполнение физического моделирования сейсмических процессов для различных сложнопостроенных моделей сред, в частности, трещиноватых и анизотропных. Примерами таких работ являются [Wang et al., 2018; Попов и др., 2019; Dugarov et al., 2022].

В представленной работе мы показываем результаты 2D профильной съемки на модели, содержащей структурную неоднородность. Материал обрабатывался с использованием типовых процедур обработки наземных данных. На результирующем временном разрезе выделяются все структурные неоднородности, заложенные в модель. Таким образом, может быть сделан вывод о том, что регистрируемое нами волновое поле содержит информацию о модельной среде. Такая информация может быть нами выделена и интерпретирована. Одновременно выполняется решение задачи о качестве выделения информации, а при наличии нескольких альтернативных алгоритмов (процедур) выполняется их сравнение.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторное моделирование сейсморазведочных работ, проводилось на полностью автоматизированной установке, находящейся в научно-образовательном центре Газпромнефть-НГУ (НОЦ НГУ). Общий вид установки показан на рис. 1, а.

В качестве источников и приемников звуковых волн в проводимых экспериментах выступают ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи продольных волн (рис. 1, б). Резонансная частота преобразователей составляет примерно 660 кГц. Возбуждение ультразвуковых волн осуществляется генератором NI PXI-5421, который позволяет подавать на пьезокерамический излучатель сигналы произвольной формы. Используется усилитель, повышающий амплитуду сигнала до 50 В. Регистрация акустического сигнала осуществляется с помощью осциллографа NI PXIe-5122.

На рисунке 2 показаны фрагменты записей, полученных на установке при проведении испытаний на повторяемость регистрируемого сигнала. Испытания проводились на поверхности листа оргстекла толщиной 5 см, расстояние источник–приемник составляло 5 см. Изображенные сигналы являлись отраженными от нижней границы оргстекла. При формировании *seg-u* использовался масштабирующий коэффициент по времени 10^4 .

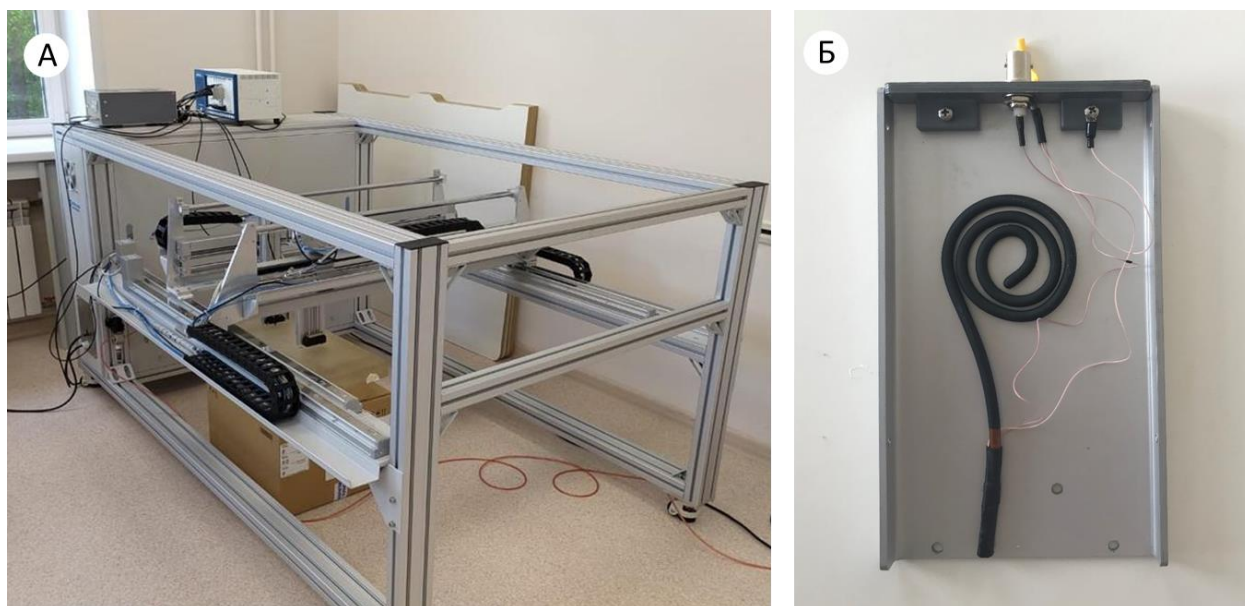


Рис. 1. А – установки для физического моделирования волновых процессов в НГУ; Б – ультразвуковой датчик

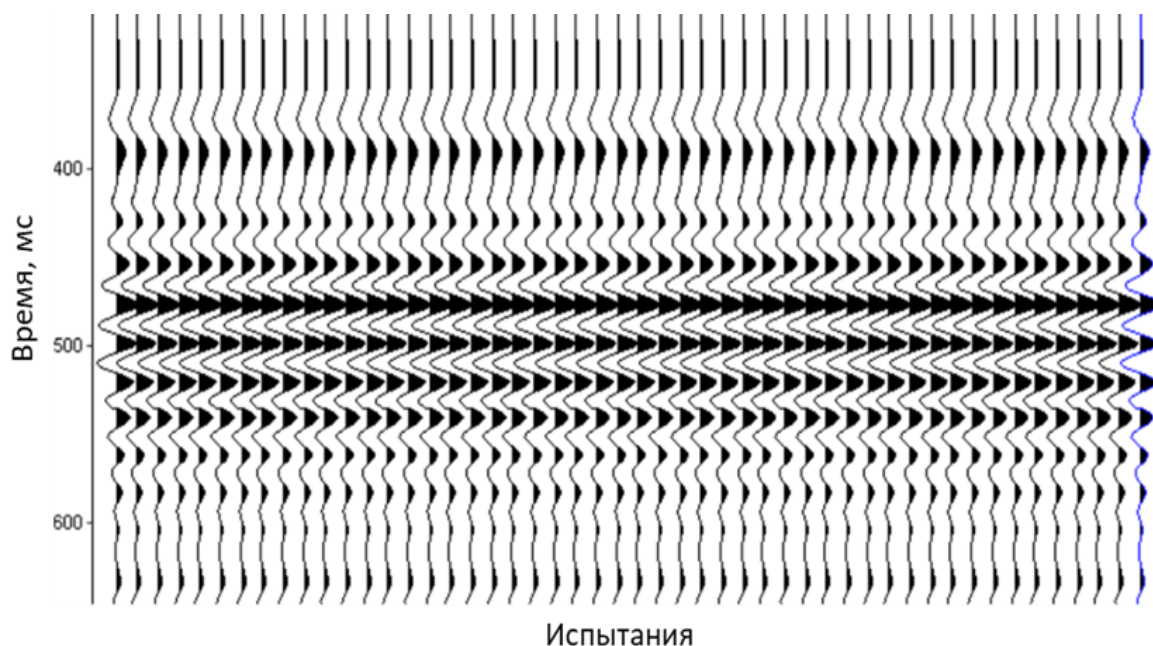


Рис. 2. Пример записи испытаний на повторение формы сигнала

Система позиционирования состоит из сервоприводов, осуществляющих перемещение источников и приемников ультразвуковых волн в горизонтальной плоскости. После прихода в нужные координаты с помощью пневмоклапанов осуществляется спуск датчиков на поверхность модели. Давление в пневмосистеме, влияющее на прижим датчиков и, соответственно, на амплитуды получаемых сигналов, поддерживается постоянным в течении всего эксперимента. Для смягчения удара датчиков о поверхность модели при их опускании к корпусам датчиков присоединены демпферы из пенополиуретана. Передвижение датчиков, генерация и прием акустических сигналов осуществляется с помощью модулей National Instruments. Платы расположены в крейте NI PXI Express.

Система управления установкой, созданная одним из авторов этой работы, является полностью автоматизированной и позволяет проводить съемку без участия человека. Программное обеспечение

написано в среде разработки LabWindows/CVI. Данные, получаемые в ходе эксперимента, изначально имеют формат TXT. Для чтения файлов в программах обработки геофизических данных на языке Python был написан скрипт, переводящий данные формата TXT в формат SEG-Y.

Погрешность позиционирования датчиков на модели определена как 0.06 мм, что в соответствии с выбранным нами коэффициентом пропорциональности 10^4 составит 60 см в масштабе реальных полевых работ.

Максимальные размеры модели, которую можно исследовать с помощью установки, составляет: длина 1.2 м, ширина 0.8 м и высота 0.5 м. Это соответствует модели среды с размерами: 12х8х5 км, если масштабирующий коэффициент эксперимента выбрать равным 10^{-4} .

Выбор коэффициента пропорциональности.

Для физического моделирования необходимо обеспечить подобие основных параметров:

- схожесть глубин и мощностей слоев по отношению к длине волны исследуемого сигнала;
- схожесть коэффициентов отражения (скачков акустических жесткостей на границах).

При создании физических моделей скорости распространения и плотности в сходных слоях натуры и модели сохраняются. В таком случае константа подобия времени, а значит и частот, зависит только от константы геометрического подобия [Ивакин, 1969].

Таким образом, масштабирующий коэффициент между полевым и лабораторным экспериментом был выбран равным 10^{-4} для расстояний и времен. То есть 1 мм лабораторной модели представляет собой 10 м полевого эксперимента, а 1 мс полевой записи моделируется 10^{-7} секунды записи физического эксперимента. Наше решение не уникально. Многие исследователи проводили свои эксперименты в подобном же масштабе, например [Wang et al., 2018]. Однако встречаются и другие решения, например в работе [Попов, 2016] физическое моделирование было проведено в масштабе $2 \cdot 10^{-4}$.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для оценки работы установки, качества регистрируемого материала, а также для проверки возможности обработки регистрируемых данных, была создана модель среды. Она представляла собой двухслойную модель: первый слой мощностью 50 мм (500 м) выполнен из пластика, второй слой – плита алюминия, толщиной 60 мм (600 м). Здесь и далее в скобка указывается размеры условной моделируемой среды, полученные пересчетом с коэффициентом подобия.

Для изготовления модели использовался двухкомпонентный заливочный пластик Polycast SoSlow. Твердость по Шору Д при 23 °С (ASTM D 676) – 70 ± 2 единицы. Компоненты смеси – изоцианат и полиол в соотношении 1:1 по объему. Время потери текучести после смешивания компонент при 23 °С – 6 минут. Перед смешиванием компоненты подвергались дегазации в течение 20 минут при давлении близком к 1 Кпа.

В пластике заключается неоднородность в виде клина, выполненного из пескобетона. Мощность слоя бетона в его большей части 26 мм (160 м), в меньшей 11 мм (110 м). Размер пластикового слоя в поперечном (относительно профиля) направлении составил примерно 170 мм (1700 м). Этого достаточно для того, чтобы волны, отраженные от боковых поверхностей модели, имели существенно большие времена пробега, чем однократно отраженные от границ раздела, тем самым, не попадая в целевой временной диапазон записи. На рисунке 4 показана схема полученной модели с указанием линейных размеров.

Клин располагается внутри пластика, его подошва не соприкасается с кровлей подстилающей толщи, мощность прослойки пластика между клином и подстилающей толщей около 3 мм (30 м). На рисунке 3 показана модель в процессе изготовления перед заливкой верхнего слоя пластиком и в готовом варианте.



Рис. 3. Модель в процессе изготовления (слева) и готовый вариант (справа)

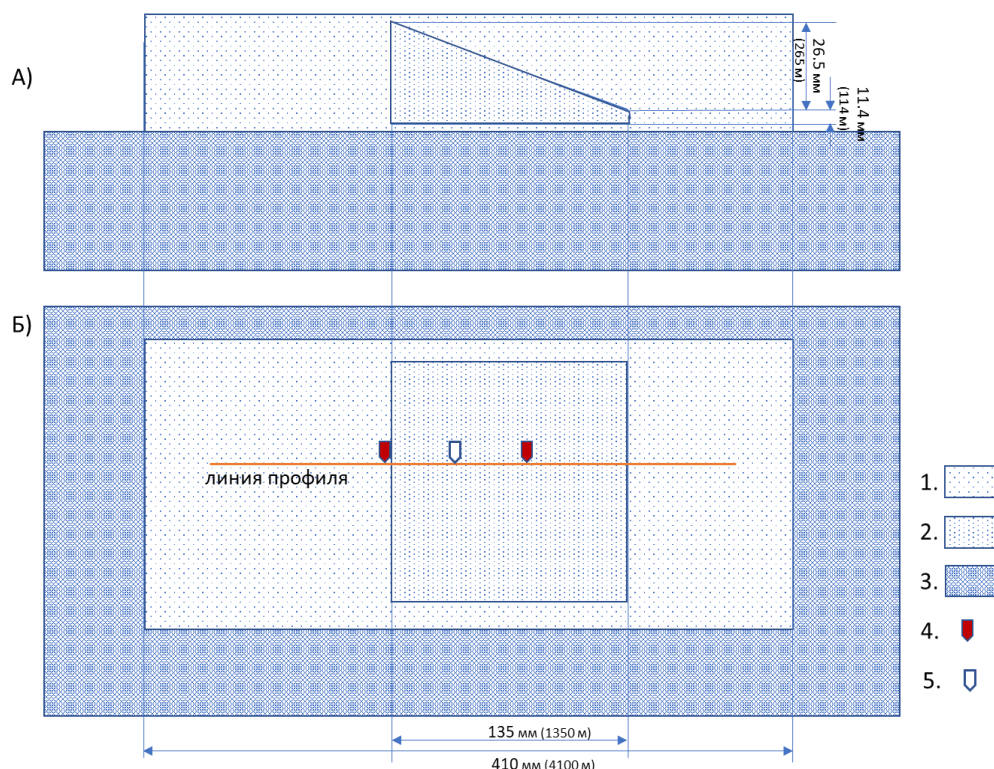


Рис. 4. Схема модели и расположение профиля на поверхности наблюдения. Материалы: 1 – пластик; 2 – пескобетон; 3 – алюминий; 4 – расположение ПВ, рассмотренных на рис. 5; 5 – воздушный пузырь. А – вид сбоку; Б – вид сверху

Во время изготовления модели были допущены некоторые ошибки, в результате чего рельеф модели имеет явный перепад высот, а в верхней части слоя пластика образовался воздушный пузырь, местоположение которого показано на рис. 4. К тому же, мы предполагаем, что в месте образования воздушного пузыря произошло локальное проникновение пластика в толщу пескобетона, то есть граница пластик-бетон не всегда резкая.

Скорость распространения продольных волн в пескобетоне составляет 2100 м/с, плотность бетона 1900 кг/м куб. В пластике скорость V_p составила 1850 м/с, плотность 1040 кг/м куб. Для алюминия V_p 6100 м/с, плотность 2700 кг/м куб. Скорости распространения продольных волн в использованных материалах определялись путем акустического просвечивания физической модели, а так же изготовленных вместе с моделью контрольных образцов. Показатели плотности частично определены в лаборатории, частично взяты из справочных материалов [Кошкин, Ширкевич, 1972; Физическая энциклопедия, 1988].

Модель имеет наклон дневной поверхности. Перепад высот на протяжении профиля составляет 5.85 мм в масштабе эксперимента, то есть 58.5 м в масштабе реального объекта и обработки. При обработке материала финальным уровнем приведения была выбрана высота первой точки наблюдения на профиле, скорость приведения – 1850 м/с – скорость продольных волн в пластике, выполняющем роль верхнего слоя модели.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ

На модели была проведена съемка 2D сейсмического профиля. Параметры системы наблюдений в масштабе эксперимента таковы: шаг ПВ 5 мм (что соответствует 50 м моделируемой среды); шаг ПП 5 мм; количество приемников в регистрирующей косе 61; количество ПВ 61; минимальное удаление 15 мм; максимальная кратность ОГТ 58; шаг дискретизации $1 \cdot 10^{-7}$ с (или 1 мс полевой записи); длина записи 5000 отсчетов; количество накоплений 800.

На рисунке 5 показаны две сейсмограммы ОПВ с наложенными теоретическими годографами. Первая сейсмограмма получена на ПВ 19, что соответствует верхней точке клина, вторая – ПВ 37. На рисунке 4 красным цветом обозначены точки этих ПВ на профиле.

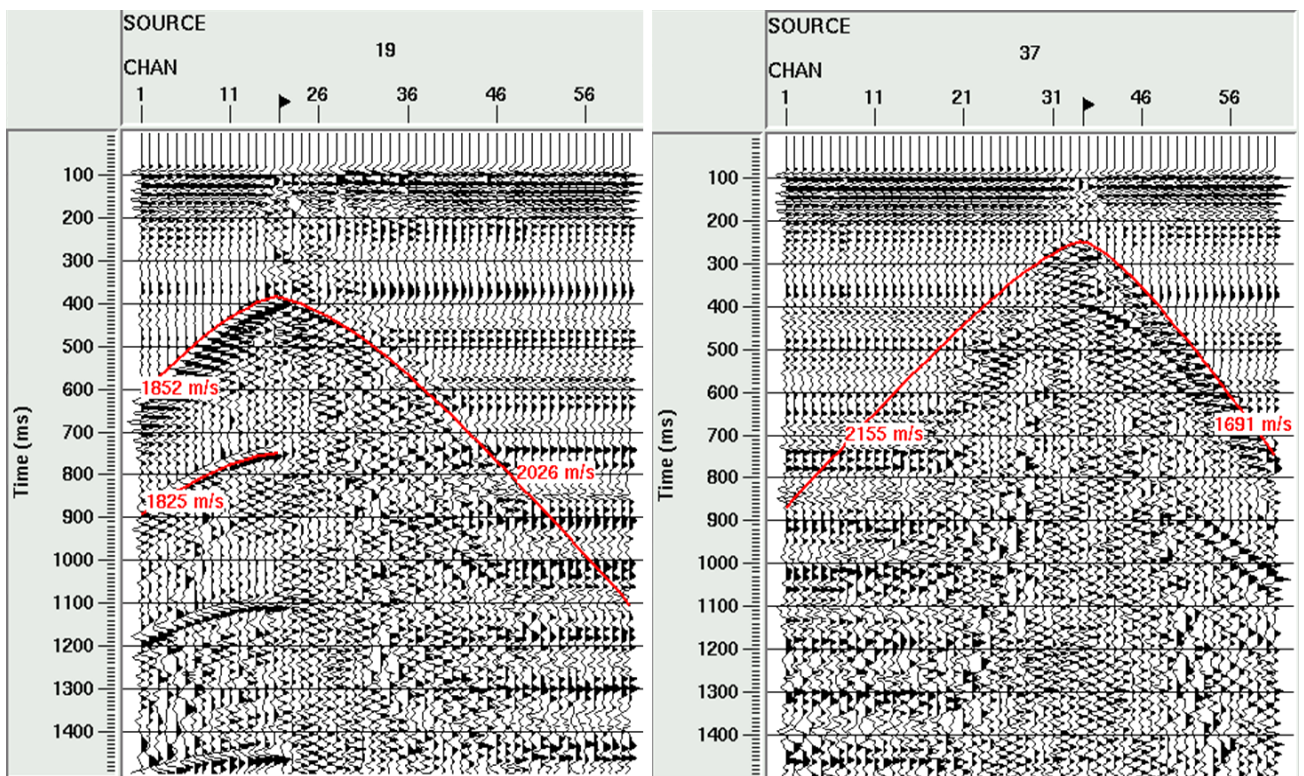


Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ с наложенными теоретическими годографами, полученными на модели "Клин"

Рассмотрим сейсмограмму ПВ 19. В сторону уменьшения нумерации каналов записи мы наблюдаем отраженную волну, скорость распространения которой определяется 1852 м/с. Это отраженная от границы пластик/алюминий волна. Ниже мы наблюдаем двукратно отраженную от той же границы волну. По другую сторону от ПВ, в сторону увеличения нумерации каналов записи, мы видим волну, отраженную от той же границы, но с большей скоростью – существенная часть траектории движения волны проходит через пескобетон, скоростные свойства которого выше, чем у пластика.

Вторая сейсмограмма записана на ПВ над серединой клина (см. рис. 4, Б). На картинке выделена отраженная от границы пластик/пескобетон волна. В сторону падения границы кажущаяся скорость отраженной волны уменьшается, в сторону восстания границы – увеличивается [Гурвич, Боганик, 1980].

Отметим некоторые особенности зарегистрированного материала.

Получаемые нами данные осложнены регулярными помехами, вызванными приемным трактом установки. Однако решению кинематической задачи данные явления не мешают. При этом уровень случайных помех гораздо ниже, чем в случае реального полевого материала и при использовании процедур, чувствительных к общему уровню белого шума стоит искусственно его завышать.

Наличие таких жестких акустических границ как пластик–алюминий дает нам многочисленные кратные отражения на зарегистрированных сейсмограммах, что, в свою очередь, позволяет исследовать поведение алгоритмов подавления кратных волн в таких экстремальных условиях.

Так как возбуждение и регистрация сигнала ведется на очень высоких частотах, материалы лабораторного моделирования, в отличие от полевых материалов, не содержат низкоскоростных и низкочастотных помех, вызванных техногенными источниками. Однако при отсутствии в модели зоны малых скоростей, прямые поперечные волны на записях вертикальной компоненты становятся источником линейных помех. При этом прямая продольная волна практически отсутствует на записях.

Данные профильных наблюдений были обработаны по следующему графу:

- компенсация дрейфа нуля;
- учет геометрического расхождения фронта волны, скорость среды принимается равной 1850 м/с, постоянная по профилю;
- полосовая фильтрация в окне 15-70 Гц, дополнительный режекторный фильтр на 15 Гц со склоном 4 Гц;
- подавление кратных волн – фильтрация в области Радона;
- сортировка по ОСТ;
- введение кинематических поправок – скорости суммирования переменные по профилю;
- суммирование;
- фильтрация в FK-области после суммирования;
- временная миграция Кирхгофа после суммирования.

На рисунке 6 показан результат после обработки по указанному графу и первоначальный разрез, полученный по стандартному для такого рода разрезов графу: АРУ, полосовая фильтрация, суммирование с постоянной скоростью, в данном случае 1850 м/с. На всех этапах обработки материал вел себя ожидаемым образом, волновое поле адекватно реагировало на все примененные процедуры. Это дает нам основание считать данные лабораторного моделирования, получаемые на данной

установке, пригодными для тестирования каких-либо алгоритмов кинематической обработки данных сейсморазведки.

На рисунке 7 приведен скоростной разрез, полученный по профилю модели. На этом разрезе мы ожидаемо видим скоростную неоднородность (клина), влияние которой распространяется на всю временную глубину записи.

На результирующем разрезе мы наблюдаем наклонную поверхность клина, на поверхности клина – участок изменения фазы сигнала, ассоциированный нами с воздушным пузырем, образовавшемся при заливке модели. Действительно, граница пластик/воздух имеет отрицательный коэффициент отражения, что приводит к смене фазы отраженной волны. Подобный эффект возникает на границах газовых залежей и был неоднократно описан в литературе, например, [Воскресенский, 2001].

На разрезе скоростей суммирования мы не видим влияния низкоскоростного артефакта, в том числе потому, что линейные размеры низкоскоростной области довольно малы, по сравнению с полной длиной пробега отраженных волн. Соответственно и влияние этой области на времена прихода волн минимальны. Так же немалый усредняющий эффект дает группирование нескольких точек отражения и объединение нескольких сейсмограмм ОГТ, которое применяется при стандартном скоростном анализе.

Граница пластик/алюминий наблюдается на всем протяжении профиля. Таким образом, на разрезе отображаются все структурные особенности, заложенные при построении модели.

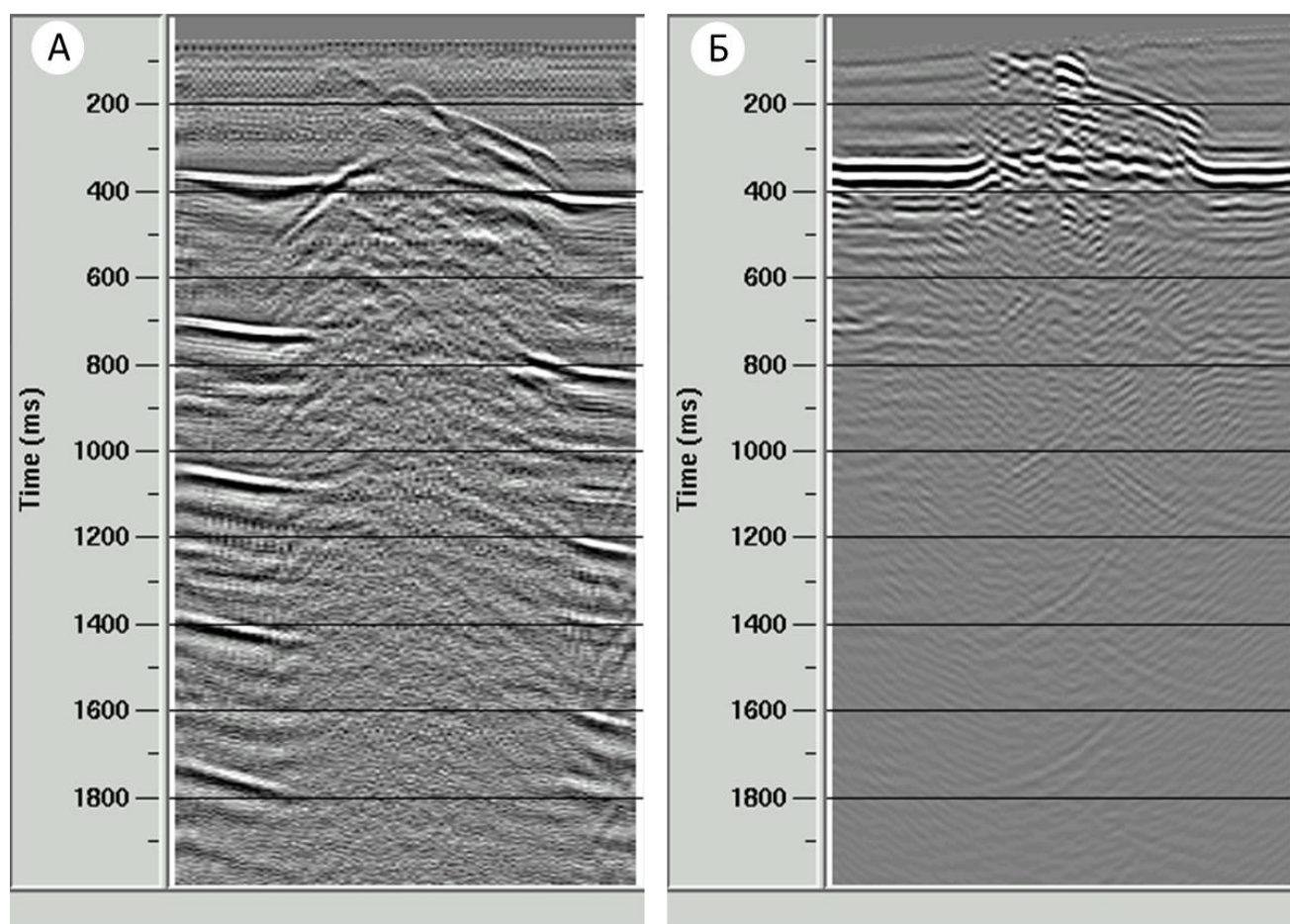


Рис. 6. Временной разрез, полученный по профилю модели. А – разрез с постоянной скоростью без обработки и Б – результат применения графа обработки.

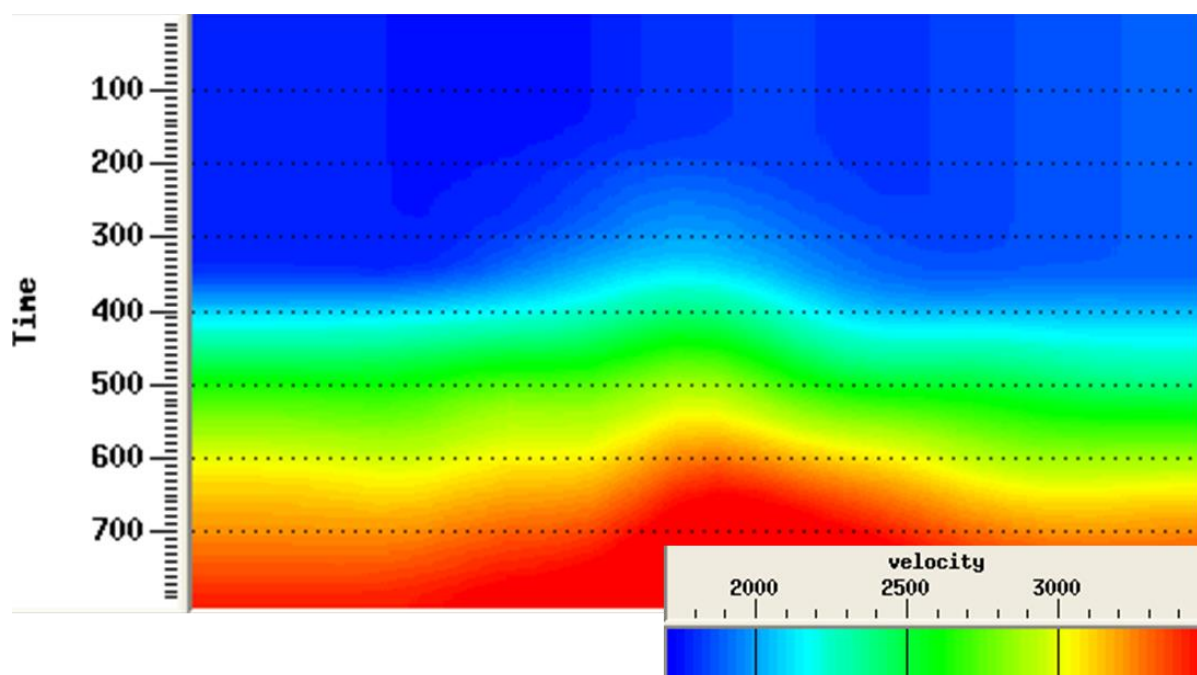


Рис. 7. Разрез скоростей суммирования по профилю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По поверхности модели среды, содержащей структурную высокоскоростную неоднородность, была проведена съемка, моделирующая профильные наземные сейсморазведочные работы. Результаты физического моделирования находятся в полном соответствии с используемой моделью. В частности, в регистрируемом волновом поле содержится информация об основных элементах моделируемой среды (отраженные волны и пр.). Эта информация может быть нами выделена и проинтерпретирована.

Профильная съемка на поверхности модели и дальнейшее изучение полученного материала показали, что на данном этапе готовности установки, методики съемки, а также технологии изготовления моделей сред, позволяет сделать нам обоснованные выводы о структурных особенностях исследуемой модели. Так же мы можем с уверенностью фиксировать наличие неоднородности границы отражения.

ЛИТЕРАТУРА

- Воскресенский Ю.Н.** Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: РГУ нефти и газа, 2001. – 68 с.
- Гурвич И.И., Боганик Г.Н.** Сейсмическая разведка. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
- Ивакин Б.Н.** Методы моделирования сейсмических волновых явлений. – М.: Наука, 1969. – 287 с.
- Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1972. – 256 с.
- Попов Д.А., Мусин М.В., Половков В.В.** Использование физического моделирования при изучении строения консолидированной земной коры сейсмическими методами: Материалы конференции «Геофизические методы исследования Земли и ее недр». – Санкт-Петербург, 2016. – С. 102–111.
- Попов Д.А., Чичина Т.И., Половков В.В., Корсакова И.О., Пинбо Д., Каштан Б.М., Троян В.Н.** Физическое моделирование распространения упругих колебаний в анизотропных средах для задач сейсморазведки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2019. – № 64 (3). – С. 454–465.

Физическая энциклопедия / Под ред. Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 4.

Dugarov G.A., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Orlov Y.A., Ngomayezwe L. Acoustic measurements on synthetic fractured samples made using FDM 3D printing technology: Processes in GeoMedia. – Springer Verlag, Berlin, 2022. – Vol. 4. – P. 9–15, doi: 10.1007/978-3-030-76328-2_2.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling. – Geophysics. – 1970. – Vol. 35. – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on three-term Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // CSEG Recorder. – 2009. – Vol. 34 (3). – P. 36–43.

REFERENCES

Dugarov G.A., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Orlov Y.A., Ngomayezwe L. Acoustic measurements on synthetic fractured samples made using FDM 3D printing technology: Processes in GeoMedia. – Springer Verlag, Berlin, 2022. – Vol. 4. – P. 9–15, doi: 10.1007/978-3-030-76328-2_2.

Gurvich I.I., Boganic G.N. Seismic exploration. Textbook for high schools. – Nedra, Moscow, 1980.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling. – Geophysics. – 1970. – Vol. 35. – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Ivakin B.N. Methods for modeling seismic wave phenomena. – Nauka, Moscow, 1969.

Koshkin N.I., Shirkevich M. G., 1972, Handbook of elementary physics. M., Nauka. Edition 5th.

Physical encyclopedia / Ed. Prokhorov A.M. – Soviet Encyclopedia, Moscow, 1988. –Vol. 4.

Popov D.A., Chichinina T.I., Polovkov V.V., Korsakova I.O., Pinbo D., Kashtan B.M., Troyan V.N. A new approach in physical modeling for velocity anisotropy studies // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. – 2019. – Vol. 64 (3). – P. 454–465.

Popov D.A., Musin M.V., Polovkov V.V. Seismic physical modeling for consolidated crust studies // Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil. – St. Petersburg, 2016. – P. 102–111.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Voskresenskiy Y.N. Study of changes in the amplitudes of seismic reflections for prospecting and exploration of hydrocarbon deposits. Textbook for high schools. – Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 2001.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on three-term Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // CSEG Recorder. – 2009. – Vol. 34 (3). – P. 36–43.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОЧЕНКО Татьяна Анатольевна – аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основные научные интересы: обработка сейсмической информации.

ЗАДОЕВ Алексей Юрьевич – инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: физическое моделирование.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных, решение обратных задач геофизики.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсморазведка, геотермия.

*Статья поступила в редакцию 5 декабря 2022 г.,
принята к публикации 22 декабря 2022 г.*



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Я.К. Леопольд, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

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

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

e-mail: Yaroslav.Leopold@gmail.com

При проведении геофизических съемок методом переходных процессов объектов, содержащих суперпарамагнитные частицы, эффекты магнитной вязкости могут оказывать значительное влияние на получаемый сигнал. В настоящее время подобные эффекты считаются помехой, в то время как некоторые исследователи указывают на то, что они содержат полезную информацию об исследуемой среде.

В статье приведено моделирование импульсных характеристик вязкой намагниченности. Используя модель логнормального распределения частиц, были смоделированы различные импульсные характеристики намагниченности. Представлены результаты попыток восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. Приведена оценка эффективности инверсии синтетических импульсных характеристик.

Магнитная вязкость, суперпарамагнетизм, импульсная характеристика, математическое моделирование, инверсия, погрешность

MATHEMATICAL MODELING OF IMPULSE RESPONSE OF VISCOUS REMANENT MAGNETIZATION

Ya.K. Leopold, N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov

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

e-mail: Yaroslav.Leopold@gmail.com

TEM survey under objects that containing superparamagnetic particles, the effects of magnetic viscosity can have a significant impact on the received signal. At present, such effects of magnetic viscosity are considered a nuisance, while some researchers point out that they contain useful information.

The article presents a mathematical modeling of impulse response of viscous remanent magnetization. Using the lognormal particle distribution model, various impulse responses of the magnetization were modeled. The results of attempts to restore the distribution parameters σ and V_m of model impulse responses are presented. An estimate of the effectiveness of the inversion of synthetic impulse responses is given.

Viscous magnetization, superparamagnetism, impulse response, mathematical modeling, inversion, accuracy

ВВЕДЕНИЕ

Мелкодисперсные магнитные частицы привлекают интерес исследователей с 40-х годов прошлого века, изучение их свойств является непростой научной и технической задачей [Néel, 1949; Dormann et al., 1997]. Связанные с ними эффекты магнитной вязкости может быть следствием различных физических процессов.

В большинстве случаев при проведении геофизических съемок методом переходных процессов (МПП) эффекты магнитной вязкости слабо проявлены по сравнению с вкладом вихревых токов. Однако существуют геологические природные и антропогенные объекты, в присутствии которых эффекты магнитной вязкости становятся заметными или даже преобладающими. Обычно проявления магнитной вязкости рассматривают как геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию данных МПП в терминах «нормальной» электропроводности [Buselli, 1982; Pasion et al., 2002]. Вместе с тем, результаты некоторых исследований свидетельствуют о том, что измеряемые с помощью индуктивных методов эффекты магнитной вязкости отражают особенности генезиса и строения природных и антропогенных геологических сред и объектов, а также происходивших в приповерхностных слоях геологических процессов [Kozhevnikov et al., 2001].

Для исследования свойств магнитной вязкости во временной области была создана лабораторная индукционная установка на базе электроразведочной FastSnap для метода переходных процессов. Разработанная установка дала возможность исследовать переходные процессы, связанные с релаксацией намагниченности суперпарамагнитных частиц. Для описания получаемых импульсных характеристик намагниченности обычно использовалась степенная функция at^{-b} . Различные образцы имели разную амплитуду a и показатель степени b , причем отличия показателя степени b от единицы превышали погрешности его определения (об установке и результатах ее использования можно прочесть в статье [Камнев и др., 2015]). Следующим шагом исследований было математическое моделирование импульсных характеристик вязкой намагниченности для оценки возможностей проведения интерпретации переходных процессов магнитной вязкости с целью получения полезной информации о свойствах исследуемых образцов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ

При выборе более подходящей модели, на основе которой можно было бы давать интерпретацию импульсных характеристик использовалась литература по магнитной гранулометрии, согласно которой, распределение объемов частиц в геологических средах близко к логнормальному [Worm, 1999; Kodama, 2013]. Напомним, что плотность вероятности для логнормального распределения описывается как:

$$P(V, V_m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma V} \exp \left[-\frac{(\ln V - \ln V_m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (1)$$

где V_m – средний объем, σ – среднеквадратичное отклонение логарифмов объемов. Для проверки пригодности такой функции распределения при описании результатов измерений магнитной вязкости во временной области было проведено математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности.

Лабораторная установка измеряет ЭДС, индуцируемую в измерительной катушке изменяющимся магнитным потоком вследствие релаксации намагниченности образца. Чтобы результаты моделирования не были «привязаны» к какой-то конкретной измерительной системе и/или образцу, т. е. носили более общий характер, вместо ЭДС рассчитывалась производная вязкой остаточной намагниченности $J_r(t)$ ансамбля однодоменных частиц с логнормальным распределением объемов. $J_r(t)$ вычислялось по формуле [Wang et al., 2010]:

$$J_r(t) = \frac{\int_0^\infty J_0 \exp[-t/\tau(V)] VP(V) dV}{\int_0^\infty VP(V) dV},$$

$$\tau(V) = \tau_0 \exp\left(\frac{\mu_0 H_k J_s V}{kT}\right),$$

где J_0 – начальная (т. е. в момент, когда выключается намагничивающее поле) намагниченность. При расчете τ использовались параметры для магнетита: $\mu_0 H_k = 25$ мТ, $J_s = 478$ кА/м [Dunlop and Özdemir, 1997]. Предполагалось, что $T = 293$ °К, что соответствует комнатной температуре. Также было принято, что начальная намагниченность J_0 и суммарный объем частиц, определяемый интегралом в знаменателе, равны единице; значения ЭДС при этом получаются в условных единицах.

В верхней части рис. 1а показаны три распределения $f(V)$, описываемые выражением (1). Они имеют одно и то же среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 0.8$), однако разный средний объем: $V_m = 2 \cdot 10^{-24}$, $4 \cdot 10^{-24}$ и $8 \cdot 10^{-24}$ м³. На рис. 1а приведены соответствующие импульсные характеристики. Влияние среднеквадратичного отклонения иллюстрирует рис. 1б. Здесь вверху приведены графики распределений, характеризующихся одним и тем же средним объемом ($V_m = 4 \cdot 10^{-24}$ м³), но разным среднеквадратичным отклонением ($\sigma = 0.6, 0.8$ и 1.0). Импульсные характеристики намагниченности показаны в нижней части рис. 1, б.

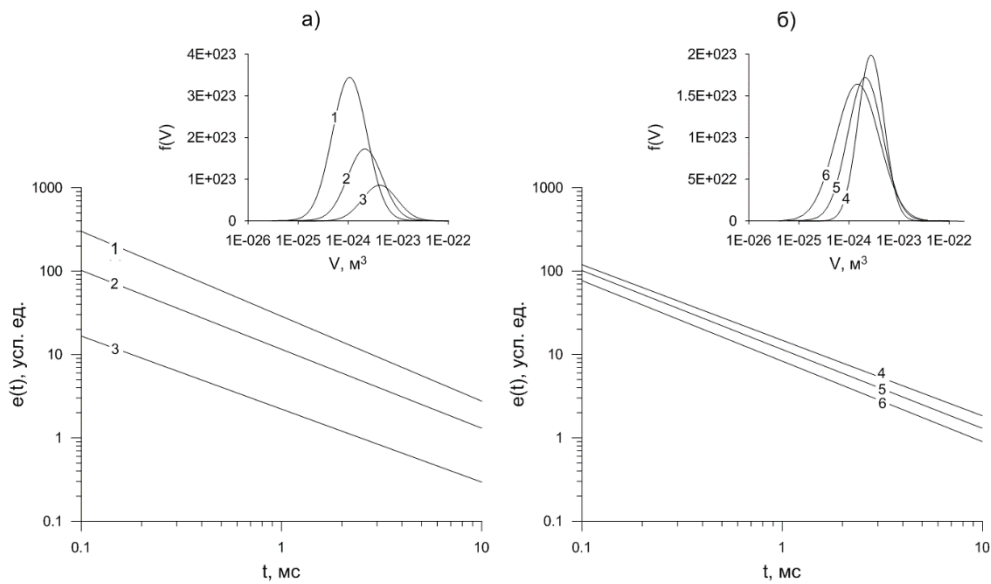


Рис. 1. Влияние параметров V_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов однодоменных частиц на импульсные характеристики намагниченности

Параметры распределения, а также степенной зависимости, аппроксимирующей импульсные характеристики, объединены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры распределения и степенной зависимости, аппроксимирующей соответствующую импульсную характеристику

Распределение, №	$V_m, 10^{-24} \text{ м}^3$	σ	a	b
1	2	0.8	33.2	1.10
2, 5	4	0.8	29.5	1.02
3	8	0.8	12.5	0.95
4	4	0.6	44	1.04
6	4	1.0	20	1.01

Спад ЭДС, описываемый степенной зависимостью $a \cdot t^{-b}$ с показателем степени b аппроксимирующей функции близким к единице, очень схож с ЭДС индуцируемой ансамблем частиц с распределением Фрелиха [Камнев и др., 2015]. Если бы такие данные были бы получены в полевых работах или лаборатории, то отличие показателя степени от единицы можно было бы отнести к влиянию погрешности измерений.

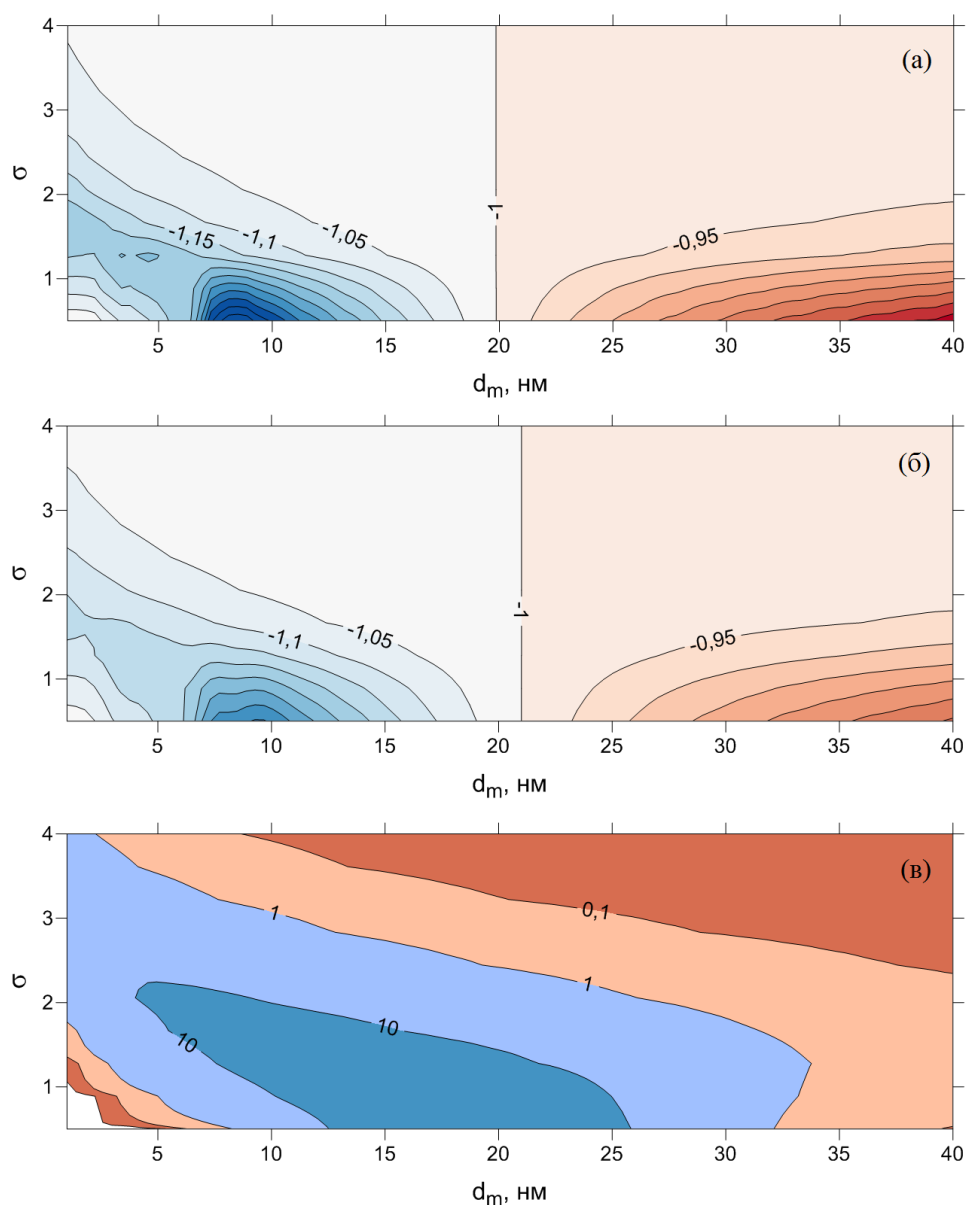


Рис. 2. Карты значений показателя степени (а, б) и амплитуды (в) степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности в зависимости от различных параметров логнормального распределения объемов частиц (σ , d_m). Аппроксимации проводились в двух временных диапазонах. На рисунке (а) представлены значения показателя степени при аппроксимации во временном диапазоне от 100 мкс до 1 мс. На рисунках (б, в) представлены значения показателя степени и амплитуды соответственно при аппроксимации во временном диапазоне от 1 до 10 мс

На рисунке 2 изображены параметры степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности при различных параметрах логнормального распределения объемов магнитных частиц σ , V_m (в большинстве публикаций размеры частиц представляются их диаметром, поэтому здесь и далее вместо среднего объема V_m приводится диаметр частицы среднего

объема d_m). Аппроксимация проводилась в двух временных диапазонах: 100 мкс – 1 мс и 1 мс – 10 мс. Из рисунка 2, а, б видно, что в различных временных диапазонах модельные импульсные характеристики аппроксимируются разными степенными функциями. Подобное поведение наблюдалось и у экспериментально полученных импульсных характеристик намагниченности.

Модельные импульсные характеристики намагниченности по форме схожи с получаемыми экспериментально. Это обстоятельство свидетельствует о возможности описания импульсных характеристик намагниченности в рамках модели логнормального распределения по размерам мелких магнитных частиц.

Результаты математического моделирования также показали (рис. 2, в), что от параметров распределения объемов частиц (σ , d_m) зависит амплитуда импульсной характеристики. Полученные результаты можно использовать для оценки чувствительности лабораторной установки к распределениям частиц с различными параметрами. Как видно из рис. 2, в лабораторная установка более чувствительна к узким распределениям. ($\sigma < 2$) с диаметром частиц среднего объема d_m в диапазоне от 10 нм до 25. Исходя из того, что различие по амплитуде полученных экспериментально импульсных характеристик составляет примерно два порядка, можно условно обозначить область чувствительности лабораторной установки «синей» областью на рис. 2, в.

ИНВЕРСИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Используя модель логнормального распределения частиц, были смоделированы различные импульсные характеристики намагниченности. Следующий шаг заключался в попытке восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. Для решения обратной задачи была написана программа на языке Matlab. При определении параметров минимизировалась целевая функция:

$$F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left\{ \left[\frac{u(t_n)}{u(t_1)} - \frac{v(t_n)}{v(t_1)} \right] \frac{u(t_n)}{u(t_1)} \right\}^2},$$

где $u(t)$ – синтетическая импульсная характеристика, а $v(t)$ – импульсная характеристика, рассчитанная при заданных параметрах σ и V_m . В таком представлении целевая функция реагирует только на форму импульсной характеристики, а не на амплитуду. Нормирование на начальную амплитуду необходимо, потому что она зависит не только от параметров распределения, но и от суммарного объема частиц, параметров намагничивающего поля, геометрии генераторно-измерительной системы и т. д. Однако, зная параметры функции распределения σ и V_m , и эмпирически определив константы, связанные с измерительной установкой, из начальной амплитуды можно рассчитать суммарный объем частиц.

Написанная программа для решения обратной задачи однозначно определяла параметры σ и V_m модельных кривых. Однако реальные переходные процессы осложнены случайными шумами. От этих шумов зависит погрешность определения параметров распределения. Для того чтобы оценить возможности восстановления параметров зашумленных импульсных характеристик, была проведена серия численных экспериментов.

При лабораторных измерениях импульсных характеристик намагниченности было установлено, что относительное среднеквадратичное отклонение измеряемых сигналов составляет примерно 2–7 % в

зависимости от амплитуды (а). Важно отметить, что часть (для сильномагнитных образцов значительная) этой погрешности приходится на дрейф импульсной характеристики. При этом, поскольку подбирается только форма сигнала, на решение обратной задачи влияет только погрешность, вносимая случайными шумами.

Сначала была предпринята попытка подобрать параметры модельной импульсной характеристики с параметрами $\sigma = 1$ и $V_m = 2.4 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ (что соответствует частице с $d_m = 20 \text{ нм}$), на которую наложен нормальный шум с $\sigma_{\text{ш}} = 3 \%$. Временной диапазон был выбран от 1 до 10 мс, в нем почти для всех измеренных образцов удавалось зарегистрировать стабильный переходный процесс на порядок выше уровня шумов. Для отыскания оптимального решения строилась карта целевой функции (рис. 3, а).

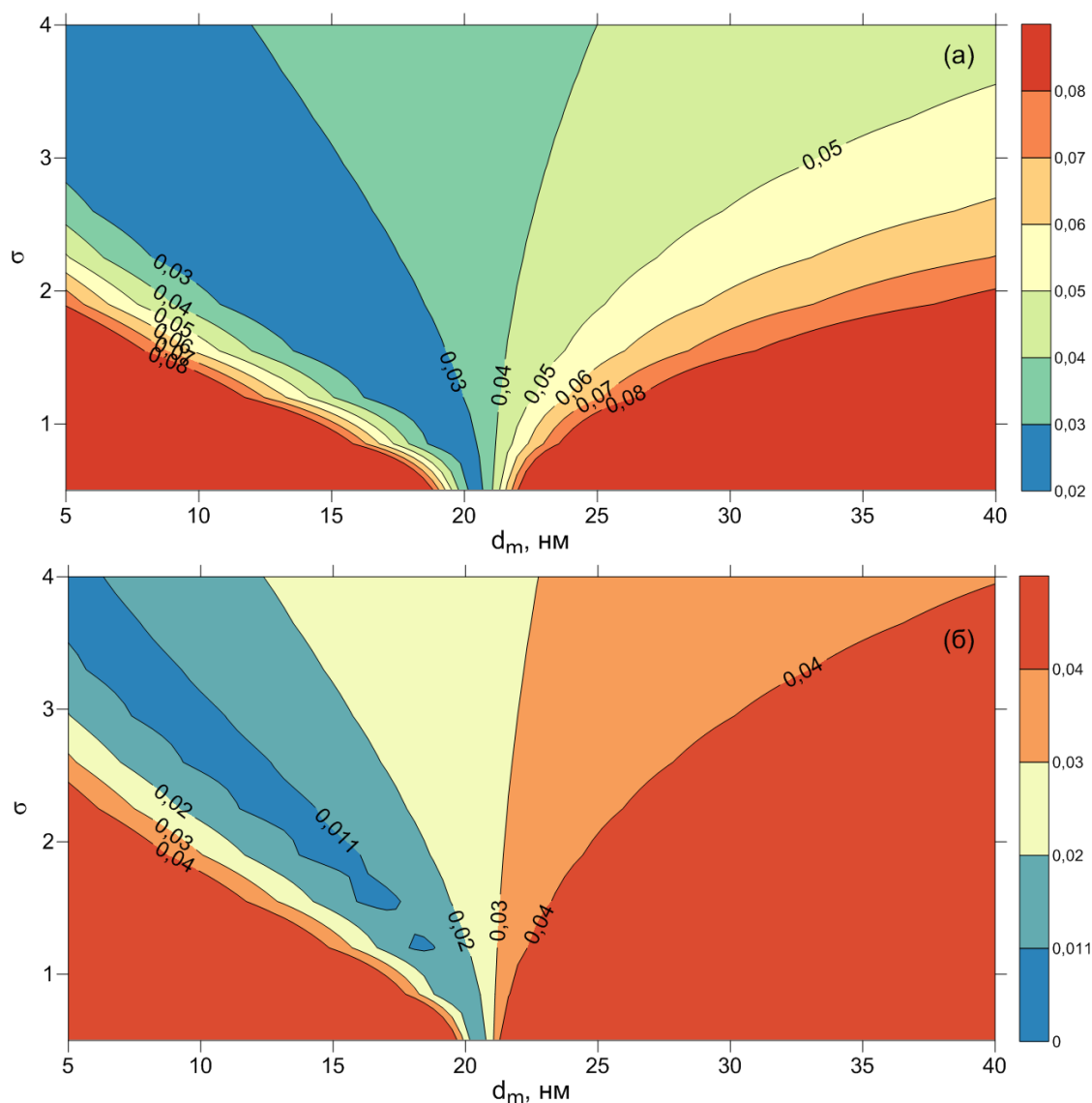


Рис. 3. Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20 \text{ нм}$) рассчитанной во временном диапазоне 1–10 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{\text{ш}}=3 \%$ (а) и $\sigma_{\text{ш}}=1 \%$ (б)

На рисунке видно, что область минимума целевой функции растянулась от «истинных» параметров до граничных значений параметров σ и d_m . Значения целевой функцией располагаются внутри этой границы порядка погрешности, вносимой шумами. Очевидно, что при 3 % нормальном шуме можно оценить область возможных значений параметров модельной импульсной характеристики, однако

она довольно большая и почти перекрывает всю предполагаемую чувствительность лабораторной установки. Уменьшение уровня шумов до 1 % несколько сужает область возможных решений (рис. 3, б), однако она все равно остается сильно вытянутой и содержит большое множество возможных комбинаций параметров начального распределения.

Импульсные характеристики намагниченности ансамблей частиц с параметрами распределения внутри этой «синей» окрестности незначительно отличаются друг от друга. Как показало моделирование, для того чтобы различить параметры распределения, необходимо измерить импульсные характеристики намагниченности с очень высокой точностью, порядка 0.1 %. Достичь такой точности измерения импульсных характеристик в лабораторных условиях пока не представляется возможным. Вместо этого был расширен временной диапазон расчета модельных импульсных характеристик намагниченности: с 1–10 до 0.1–100 мс. В этом временном диапазоне лабораторная установка позволяет исследовать переходные процессы для образцов с высоким содержанием суперпарамагнитных частиц ($a > 20$). Карта целевой функции, построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности в расширенном временном диапазоне и наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш} = 1 - 3 \%$, изображена на рис. 4.

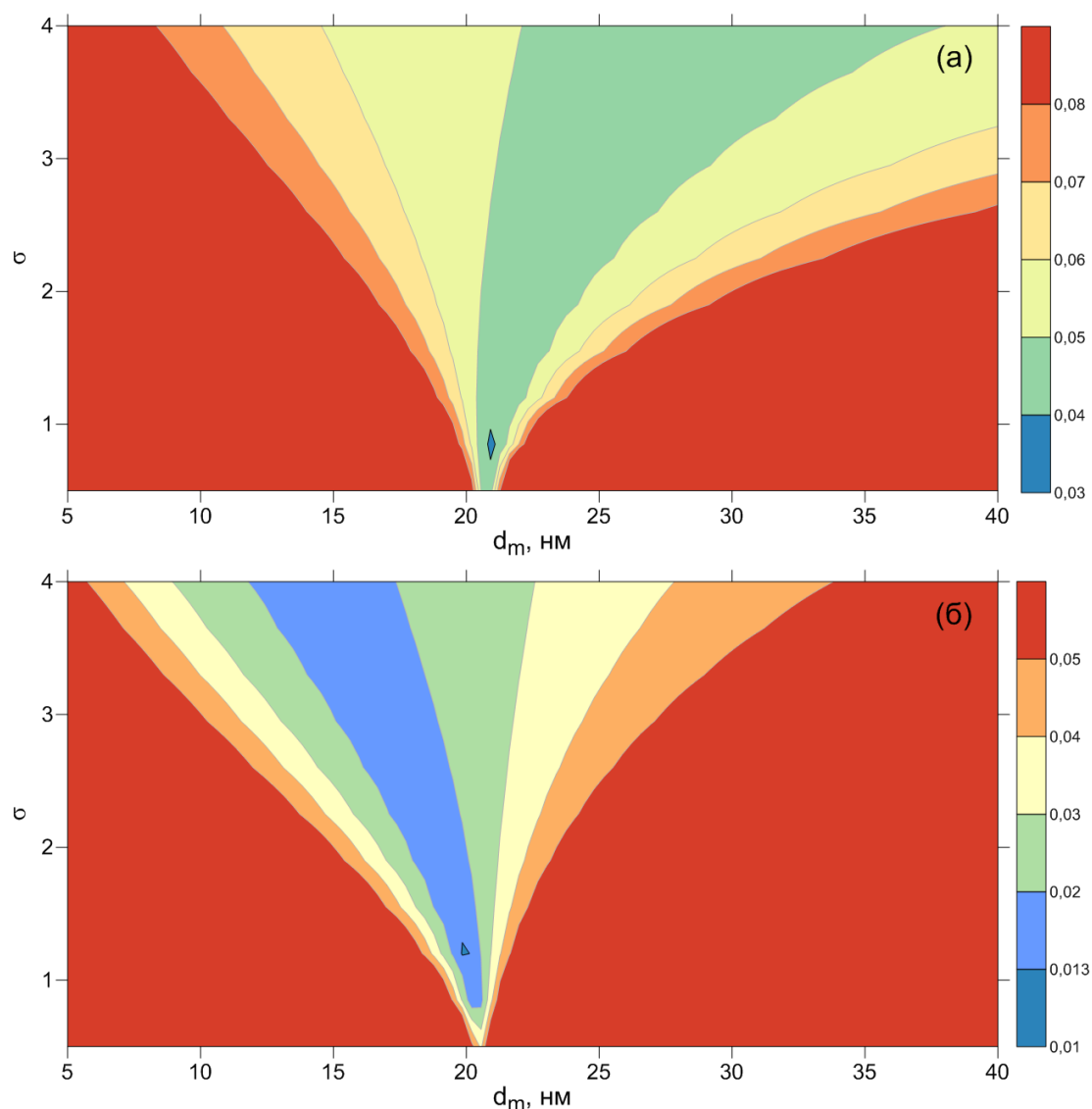


Рис. 4. Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20$ нм) рассчитанной во временном диапазоне 0.1–100 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш}=3 \%$ (а) и $\sigma_{ш}=1 \%$ (б)

На картах целевой функции, рассчитанных для расширенного временного диапазона измерений, почти всегда имеется небольшая область минимума, находящаяся возле параметров изначального не зашумленного переходного процесса. Область возможных значений становится уже и ближе к изначальным параметрам по мере уменьшения уровня нормального шума. Таким образом, для импульсных характеристик намагниченности смоделированных во временном диапазоне 0.1–100 мс с наложенным нормальным шумом $\sigma_{ш} = 1 - 3 \%$ картируется небольшая область возможных параметров логнормального распределения размеров суперпарамагнитных частиц, близкая к параметрам (или включающая их) изначальной, не зашумлённой модельной импульсной характеристики намагниченности.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕРСИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Как уже отмечалось ранее, амплитуда и форма импульсной характеристики намагниченности зависит от параметров распределения объемов частиц. Логично предположить, что при различных начальных параметрах распределения область возможных параметров, определенная по зашумленным данным, будет тоже отличаться.

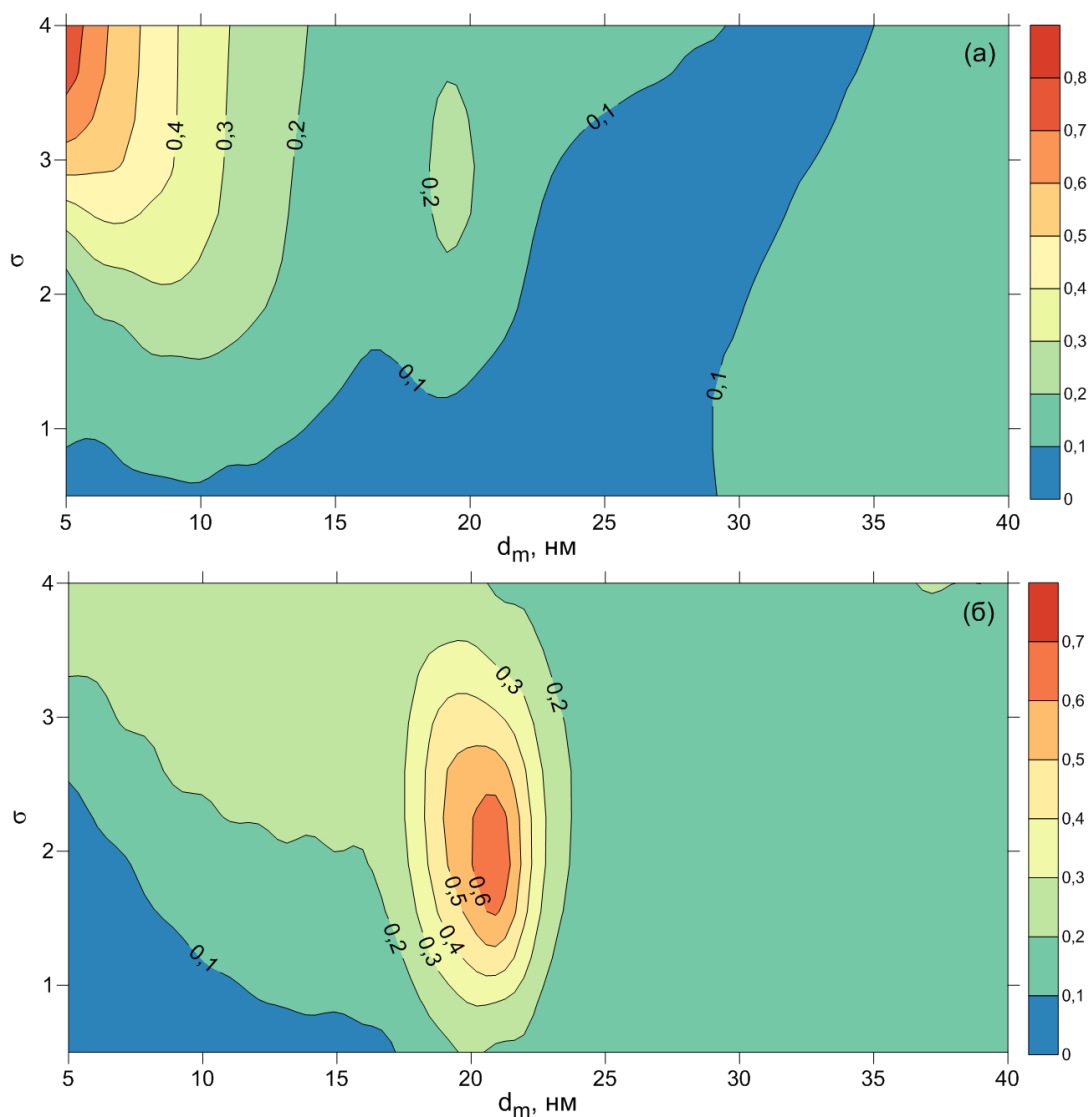


Рис. 5. Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 1 % нормальным шумом во временном диапазоне 0.1–100 мс.

Для оценки погрешности решения обратной задачи проведен численный эксперимент. Была взята область параметров $\sigma \in [0.5; 4]$ $d_m \in [5; 30]$, которая покрывает большую часть зоны чувствительности экспериментальной установки. Внутри этой области для каждого набора параметров с шагом $\sigma = 0.01$ и $d_m = 0.1$ нм рассчитывались 500 импульсных характеристик с наложенным разным 1 и 5 % нормальным шумом. Целевая функция минимизировалась с помощью алгоритма Нелдера-Мида [Nelder, 1965]. Начальная точка для поиска была выбрана с координатами $0.8 \cdot \sigma$ $1.2 \cdot d_m$, чтобы алгоритм подбора остановился на нижней границе области возможных решений. Полученный набор подобранных параметров использовался для статистической оценки их среднеквадратичного отклонения от начальных параметров. Результаты эксперимента приведены на рис. 5, 6.

Из рисунка 5 видно, при низком уровне шума (1 %) параметр d_m подбирается с погрешностью 10–20 % практически на всей области параметров. Только при широких распределениях с малым d_m погрешность вырастает до 50–80 %. Параметр σ тоже неплохо подбирается (с погрешностью 10–20 %) на большой области параметров, однако погрешность возрастает вблизи параметров $d_m = 22$ нм, $\sigma = 2$ и может составлять 60 %.

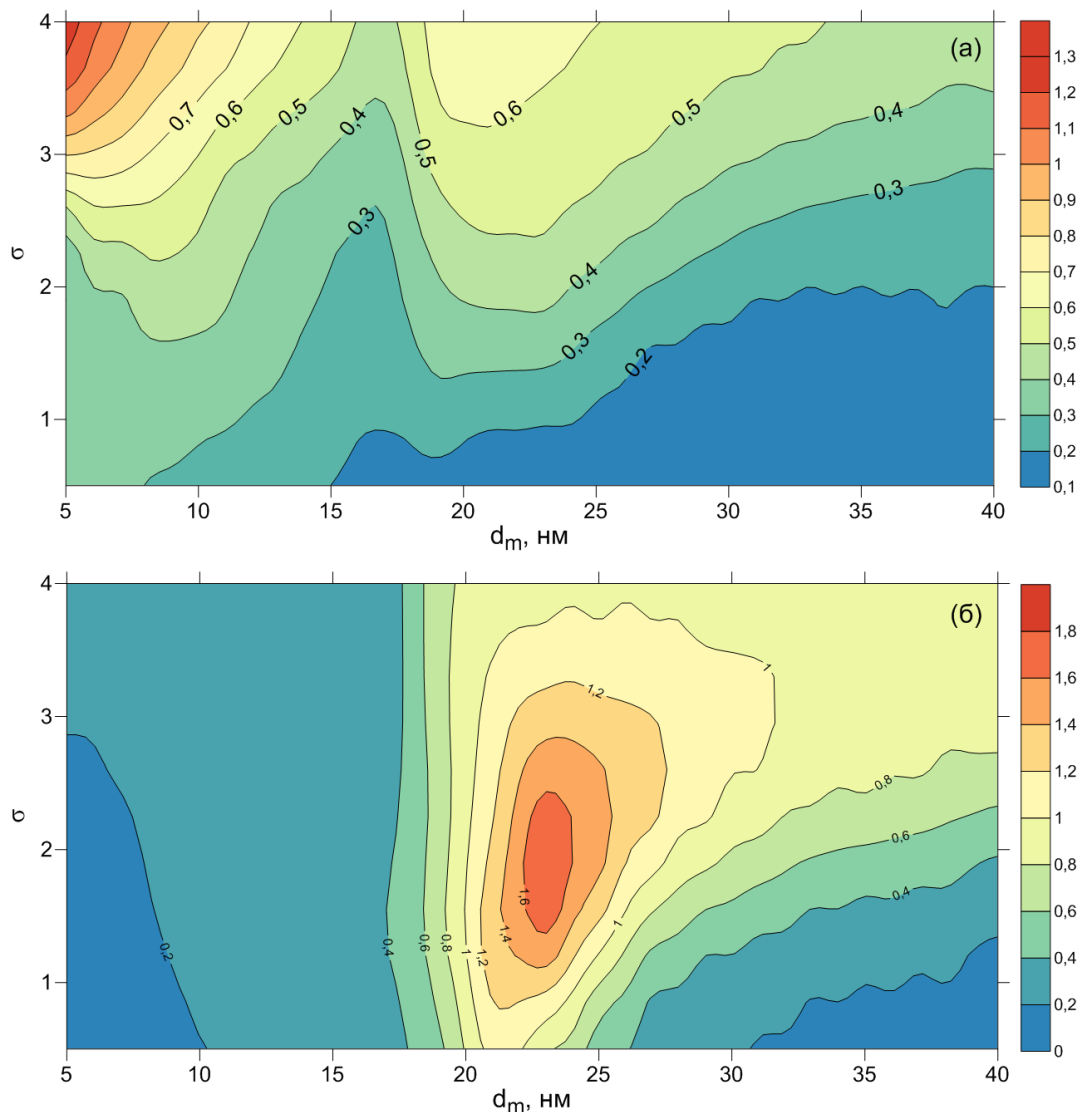


Рис. 6. Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 5 % нормальным шумом во временном диапазоне 0.1–100 мс.

На рисунке 6 видно, что при высоком уровне шумов (5 %), среднеквадратичное отклонение подобранных параметров имеет схожее (с низким уровнем шумов) поведение, однако значения погрешностей значительно возрастают. Но все же, в некоторых областях параметры изначального логнормального распределения подбираются с точностью порядка 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют, что при исследованиях во временном диапазоне 0.1–100 мс при низком уровне шумов можно восстанавливать значения начальных параметров модельного логнормального распределения частиц с приемлемой погрешностью почти во всей области чувствительности лабораторной индукционной установки.

ВЫВОДЫ

Как показало математическое моделирование, импульсные характеристики длительностью от 1 до 10 мс при средней погрешности измерений могут быть использованы для определения области возможных значений параметров распределения. Импульсные характеристики длительностью от 0.1 до 100 мс позволяют получать более точные значения параметров σ и V_m со среднеквадратичным отклонением до 10–20 %. Априорная информация о параметрах распределения и увеличение точности измерений может позволить существенно уменьшить погрешность определения параметров распределения магнитных частиц.

Таким образом, результаты исследований магнитной вязкости во временной области с помощью лабораторной установки можно использовать для оценки параметров распределения магнитных частиц в рамках логнормальной модели.

ЛИТЕРАТУРА

- Камнев Я.К., Кожевников Н.О., Казанский А.Ю., Стефаненко С.М.** Импульсная характеристика вязкой намагниченности и ее измерение с помощью лабораторной индукционной установки // Геология и геофизика. – 2015. – № 56 (11). – С. 2076–2091, doi: 10.15372/GiG20151110.
- Buselli G.** The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients // Geophysics. – 1982. – Vol. 47 (9). – P. 1315–1324, doi: 10.1190/1.1441392.
- Dormann J.L., Fiorani D., Tronc E.** Magnetic relaxation in fine-particle systems // Advances in chemical physics, Vol. 48. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – P. 283–494, doi: 10.1002/9780470141571.ch4.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.** Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. – Cambridge University Press, 1997. – 573 p.
- Kodama K.** Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2013. – Vol. 118 (1). – P. 1–12, doi: 10.1029/2012JB009502.
- Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Kozhevnikov O.K.** An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal // Journal of Applied Geophysics. – 2001. – Vol. 47 (2). – P. 107–122, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00051-9.
- Néel L.** Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites // Annales de Géophysique. – 1949. – Vol. 5. – P. 99–136.
- Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.
- Pasion L.R., Billings S.D., Oldenburg D.W.** Evaluating the effects of magnetic soils on TEM measurements for UXO detection // Expanded Abstracts. – Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2002. – P. 1428–1431.
- Wang X., Løvlie R., Zhao X., Yang Z., Jiang F., Wang S.** Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2010. – Vol. 11 (10). – Q10008, doi: 10.1029/2010GC003194.

Worm H.-U. Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry // *Geophysical Research Letter*. – 1999. – Vol. 26 (16). – P. 2557–2560, doi: 10.1029/1999GL008360.

REFERENCES

- Buselli G.** The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47 (9). – P. 1315–1324, doi: 10.1190/1.1441392.
- Dormann J.L., Fiorani D., Tronc E.** Magnetic relaxation in fine-particle systems // *Advances in chemical physics*, Vol. 48. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – P. 283–494, doi: 10.1002/9780470141571.ch4.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.** *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. – Cambridge University Press, 1997. – 573 p.
- Kamnev Ya.K., Kozhevnikov N.O., Kazansky A.Yu., Stefanenko S.M.** Impulse response of viscous remanent magnetization: laboratory measurements by a pulse induction system // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – Vol. 56 (11). – P. 1642–1651, doi: 10.1016/j.rgg.2015.10.010.
- Kodama K.** Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118 (1). – P. 1–12, doi: 10.1029/2012JB009502.
- Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Kozhevnikov O.K.** An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 47 (2). – P. 107–122, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00051-9.
- Néel L.** Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites // *Annales de Géophysique*. – 1949. – Vol. 5. – P. 99–136.
- Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.
- Pasion L.R., Billings S.D., Oldenburg D.W.** Evaluating the effects of magnetic soils on TEM measurements for UXO detection // *Expanded Abstracts*. – Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2002. – P. 1428–1431.
- Wang X., Løvlie R., Zhao X., Yang Z., Jiang F., Wang S.** Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2010. – Vol. 11 (10). – Q10008, doi: 10.1029/2010GC003194.
- Worm H.-U.** Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry // *Geophysical Research Letter*. – 1999. – Vol. 26 (16). – P. 2557–2560, doi: 10.1029/1999GL008360.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЛЕОПОЛЬД Ярослав Константинович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: электроразведка, криолитозона, магнитная вязкость, машинное обучение.

КОЖЕВНИКОВ Николай Олегович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: импульсная индуктивная электроразведка, геофизика криолитозоны, археогеофизика, археометаллургия, Приольхонье.

АНТОНОВ Евгений Юрьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование электромагнитных полей, метод переходных процессов, вызванная поляризация.

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2022 г.,
принята к публикации 23 декабря 2022 г.*



УЧЕТ НАКЛОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО МАТЕРИАЛАМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

И.А. Москаев

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

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

e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Рассмотрены особенности и основные выводы публикаций, посвященных исследованию трансверсально-изотропных геоэлектрических моделей среды, характеризующихся наклоном оси электрической анизотропии относительно скважинного прибора. Такие модели могут описываться как горизонтальным и вертикальным удельными электропроводностями (либо обратными им величинами – удельными сопротивлениями) с ненулевым зенитным углом наклона каротажного прибора, так и тензором удельной электропроводности с наклоном главных осей.

Удельное электрическое сопротивление; удельная электропроводность; электромагнитный каротаж; электрический каротаж; трансверсально-изотропная модель; относительный наклон оси электрической анизотропии

ACCOUNTING FOR TILTED ELECTRICAL ANISOTROPY IN NUMERICAL SIMULATION AND INTERPRETATION OF RESISTIVITY LOGGING DATA (ANALYTICAL REVIEW BASED ON NATIONAL AND FOREIGN LITERATURE)

I.A. Moskaev

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

e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Features and main conclusions of publications devoted to the study of medium transverse-isotropic geoelectric models which are characterized by inclination of the electrical anisotropy axis relative to a logging tool are reviewed in this article. Such models can be defined either by horizontal and vertical conductivities (or their reciprocals, called resistivities) with a non-zero dip of a logging tool or by the conductivity tensor with the tilt of the principal axes.

Resistivity; conductivity; electromagnetic logging; electric logging; transverse-isotropic model; relative tilt of the electrical anisotropy axis

ВВЕДЕНИЕ

В среднем для осадочных пород характерна слоистость, обусловленная небольшими вариациями гранулярного и минерального состава осаждаемых частиц, и в этом случае пласты характеризуются одинаковой удельной электропроводностью (или удельным электрическим сопротивлением – УЭС) в любом направлении в плоскости слоистости и отличной – обычно меньшей – в нормальном направлении. В западносибирских меловых отложениях наибольшая анизотропия определяется для относительно

однородных глинистых пластов, что обусловлено квазигоризонтальной ориентацией под литостатическим давлением уплощенных частиц и кристаллов глинистых минералов, меньшая или ее отсутствие – для песчаных отложений. Если причиной электрической анизотропии породы является ориентация частиц и строение порового пространства между ними, вводят понятие микроанизотропии, если причина в чередовании тонких прослоев пород с разной электропроводностью, которое можно зафиксировать каким-либо зондом небольшого размера, то говорят о макроанизотропии [Сухорукова, Петров, 2021]. При этом как микроанизотропную, так и макроанизотропную среды для зондов большой длины можно описывать анизотропной геоэлектрической моделью.

В некоторых случаях условия осадконакопления приводили к формированию косослоистых пластов. Основные границы такого пласта являются горизонтальными, но между ними располагается чередование тонких прослоев разного гранулярного и минерального состава. Подобное строение рассматривается для некоторых юрских и ачимовских коллекторов Западной Сибири. Другой вариант наклонно-анизотропных отложений – это карбонатные пласты с наклонной системой микротрещин. В связи с тем, что в последние пару десятилетий в разработку вовлекаются экономически невыгодные ранее коллекторы сложного строения, усиливаются требования к достоверности оценки параметров косослоистых коллекторов. В силу трехмерности постановки как аналитическое, так и численное решения прямой задачи скважиной электрометрии оказываются достаточно сложными и ресурсоемкими. При этом построение аналитических решений прямых задач скважинной электрометрии в слоистых геоэлектрических моделях терригенных отложений с наклонной электрической анизотропией началось более 40 лет назад. Цель работы состоит в том, чтобы кратко описать основные этапы исследования геоэлектрических моделей сред с относительным наклоном между осью анизотропии и осью каротажного прибора с помощью анализа отечественных и зарубежных публикаций.

ИЗУЧЕНИЕ НАКЛОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

В работе [Табаровский, Эпов, 1977] предложен способ определения компонент электромагнитного поля произвольного гармонического источника, основанный на представлении всех составляющих через Фурье-образы его горизонтальных компонент. Источник расположен в одном из пластов слоистой среды с плоскопараллельными границами, в каждом из пластов задается свой тензор удельной электропроводности (УЭП) с ненулевым углом наклона главных осей (скважина не учитывается):

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \gamma_h & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_h \cos^2(\theta) + \gamma_v \sin^2(\theta) & (\gamma_h - \gamma_v) \cos(\theta) \sin(\theta) \\ 0 & (\gamma_h - \gamma_v) \cos(\theta) \sin(\theta) & \gamma_h \sin^2(\theta) + \gamma_v \cos^2(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ – тензор удельной электропроводности пласта в земной системе координат, γ_h , γ_v – горизонтальная и вертикальная компоненты удельной электропроводности пласта в системе координат главных осей анизотропии, θ – угол наклона главных осей тензора удельной электропроводности.

Теоретический анализ потенциала источника постоянного электрического тока в геоэлектрической модели, состоящей из двух полупространств с произвольно ориентированными главными осями тензоров электропроводности и также произвольно ориентированной плоской границей между ними представлен в статье [Moran, Gianzero, 1979]. Модель не включает скважину: случай со скважиной считается слишком

сложным для аналитических вычислений. Здесь же приведены результаты расчетов сигналов потенциал-зонда при нормальном и наклонном профилировании границы между полупространствами:

1) в случае характерной для осадочных отложений анизотропии: ось анизотропии ориентирована нормально границе полупространств (вертикальное удельное электрическое сопротивление ρ_v), электропроводность в параллельных границе направлениях одинакова (горизонтальное удельное электрическое сопротивление ρ_h);

2) в случае, соответствующем кривой слоистости в одном из полупространств (ось анизотропии наклонена в верхнем полупространстве, зонд пересекает границу под разными углами);

3) в случае совпадающего наклона зонда и оси анизотропии в обоих полупространствах относительно границы.

Используемые при расчетах значения параметров геоэлектрических моделей: для $\rho_h = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, для $\rho_v = 4$ и $8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, таким образом, коэффициент анизотропии $\lambda \left(\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}} \right)$ составляет 1.4 и 2. Те же авторы ссылаются на данные лабораторных измерений коэффициента анизотропии: «Laboratory measurements (Keller, Frischknecht, 1966; Hill, 1972;) have found λ in the range 1–2.5» [Moran, Gianzero, 1982]. В работе [Moran, Gianzero, 1979] рассматриваются различные значения зенитного и азимутального углов наклона (поворота) зонда и оси электрической анизотропии относительно нормали к плоской границе между полупространствами: $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$.

Публикация [Anderson et al., 1995] посвящена развитию программно-методического обеспечения в области решения прямой задачи индукционного каротажа на кабеле (приборы DIT и AIT), а также высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения (аппаратура CDR). Рассмотрена геоэлектрическая модель трансверсально-изотропных пластов с параметризацией горизонтальным и вертикальным УЭС, отношение вертикального УЭС к горизонтальному от 5 до 200, что соответствует коэффициенту анизотропии λ примерно от 2 до 14. Пересечение границ пластов индукционными зондами аппаратуры AIT и CDR наклонное вплоть до почти горизонтального (зенитный угол 85° и 86°). В приведенной работе можно выделить следующие конкретные модели, используемые при расчете сигналов:

- 1) слоистая с изотропными вмещающими глинистыми породами ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и трансверсально-изотропными пластами, характеризующимися значениями параметров: $\rho_h = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 9 \text{ м}$; $\rho_h = 0.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 0.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 12 \text{ м}$; $\rho_h = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 2.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 17 \text{ м}$ (как отмечают авторы, пласт с нетипичным соотношением удельных сопротивлений); каротажный прибор пересекает слои под зенитными углами 0° и 60° ;
- 2) однородная трансверсально-изотропная со значениями ρ_h : $0.33 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $3.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $33.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, соотношениями $\frac{\rho_v}{\rho_h}$: 5, 10, 20, 50, 100, 200; зенитный угол прибора изменяется от 0° до 90° с шагом 10° ;
- 3) верхнее изотропное и нижнее трансверсально-изотропное полупространства, ρ в верхнем пласте (и ρ_h в нижнем пласте) составляет $3.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $33.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; в анизотропном слое соотношение $\frac{\rho_v}{\rho_h}$ равно 10 и 100; наклон прибора – $0^\circ, 45^\circ, 85^\circ$.

При этом авторы не указывают напрямую, учитывается ли при моделировании скважина с раствором, ссылаясь на хороший алгоритм коррекции влияния скважины при обработке измеряемых сигналов. При моделировании сигналов катушки зондов приборов аппроксимируются точечными

магнитными диполями. Также не указан способ расчета, хотя по предыдущим статьям можно предположить численно-аналитический и конечно-элементный алгоритмы [Anderson, Chang, 1982; Chang, Anderson, 1984].

В связи с распространением субгоризонтального бурения и соответствующим усложнением интерпретации данных скважинной электрометрии разработаны алгоритмы трехмерного численного моделирования сигналов индукционного (прибор АИТ) [Anderson et al., 1996] и высокочастотного электромагнитного (приборы CDR и ARC5) [Anderson et al., 1997] каротажа, основанные на методе конечных разностей, использующие метод спектрального разложения Ланцоша для решения уравнений Максвелла. Подразумевается возможность совокупного использования алгоритмов для данных высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения и индукционного каротажа на кабеле с целью их совместной интерпретации и согласования.

Созданные конечно-разностные алгоритмы позволяют учитывать влияние наклона приборов относительно трансверсально-изотропных пластов, а также, в отличие от предшествовавших алгоритмов, влияние скважины, проникновения фильтрата бурового раствора и других эффектов (эксцентриситета прибора, наличия трещин, разломов, неравномерного проникновения) на сигналы зондов. Кроме того, для удобства пользователя создан графический интерфейс, позволяющий задавать слоистую геоэлектрическую модель среды, вскрытой скважиной с углом наклона от 0° до 90° , в трехмерном пространстве для дальнейшего численного моделирования.

Конечно-разностные алгоритмы для методов индукционного (прибор АИТ с рабочими частотами 26, 52 и 105 кГц) и высокочастотного (аппаратура CDR и ARC5 с рабочей частотой 2 МГц) электромагнитного каротажа верифицированы с применением аналитического алгоритма моделирования (указанного в [Anderson et al., 1995]), в том числе для модели с трансверсально-изотропным пластом и наклоном прибора относительно границы.

Сигналы индукционного каротажа рассчитаны в следующих моделях [Anderson et al., 1996]:

- 1) двухслойная, верхний пласт которой трансверсально-изотропный ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а нижний изотропный ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), при этом зенитный угол наклона прибора по отношению к пересекаемой границе равен 45° , влияние зоны проникновения не учитывается;
- 2) двухслойная с изотропным верхним пластом ($\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и трансверсально-изотропным нижним ($\rho_h = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), зонды прибора расположены в нижнем слое параллельно границе на различных расстояниях от нее, берется в расчет изотропная зона проникновения радиусом примерно 2.3 м ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

В работе [Anderson et al., 1996] не учитывалось непосредственное влияние скважины на данные прибора АИТ. Авторы объясняют это намерениями рассмотреть лишь эффекты геологической среды на сигналы зондов, а также моделировать данные, симулирующие практические сигналы аппаратуры АИТ, при обработке которых применена коррекция влияния скважины. Кроме того, учет влияния скважины осложнил бы проведение верификации ввиду того, что аналитический алгоритм не позволяет учесть этот эффект.

При расчетах сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа [Anderson et al., 1997] использована модель мощного трансверсально-изотропного пласта ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 26 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), пересекаемого прибором под зенитным углом 80° , с учетом влияния трансверсально-изотропной зоны проникновения (приблизительные значения: $\rho_h = 2.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 3.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) с изменяющимся радиусом от 0 до 1.3 м.

Применительно к развитию методико-алгоритмического обеспечения в области интерпретации данных индукционного каротажа посредством решения прямой задачи известна работа [Nagiwara, 1995]. В ней произведены расчеты в рамках моделей:

- 1) изотропного слоя с УЭС 5, 10 и 20 Ом·м конечной мощности (около 1.5, 3, 6, 12 м), трансверсально-изотропных вмещающих пластов ($\rho_h = 1$ Ом·м, $\rho_v = 4$ Ом·м), вскрытых наклонной скважиной с зенитным углом 60° ;
- 2) трансверсально-изотропного слоя ($\rho_h = 1.9$ Ом·м, $\rho_v = 10.6$ Ом·м) с теми же мощностями, изотропных ($\rho = 1$ Ом·м), а также трансверсально-изотропных ($\rho_h = 1$ Ом·м, $\rho_v = 4$ Ом·м) вмещающих пластов, вскрытых наклонной скважиной с зенитным углом 60° .

Выполнен анализ влияния мощности, УЭС промежуточного слоя для моделей из пункта 1, а также влияния мощности промежуточного слоя для моделей из пункта 2 на кажущееся УЭС прибора 6FF40. Метод моделирования явно не указан, эффекты скважины не учтены для упрощения расчетов.

Результаты исследования зависимости коэффициента электрической анизотропии λ от литологических и петрофизических параметров тонких чередующихся пропластков в терригенном коллекторе приведены в [Klein et al., 1995]. Описаны лабораторные измерения по образцам песчаников, слагающих тонкослоистый коллектор месторождения Купарук (Аляска). В результате эксперимента рассчитаны значения соотношения вертикального и горизонтального УЭС $\left(\frac{\rho_v}{\rho_h}\right)$ примерно от 1 до 4 для коллектора месторождения в зависимости от его насыщения: с увеличением нефтенасыщенности соотношение УЭС возрастает. Кроме того, приведены данные электромагнитного каротажа из субгоризонтальной скважины, вскрывающей указанные отложения. В результате обработки сигналов разности фаз и отношения амплитуд рассчитаны значения УЭС песчаного коллектора: ρ_h от 2 до 20 Ом·м, ρ_v – от 10 до 1000 Ом·м, при этом соотношения УЭС песчаного коллектора принимают значения до 100, что соответствует коэффициенту анизотропии λ до 10. Авторами предложены уравнения, связывающие при определенных петрофизических условиях тангенциальную (перпендикулярную оси анизотропии) и нормальную (параллельную оси анизотропии) проницаемость анизотропных слоистых коллекторов с их нормальным и тангенциальным удельным сопротивлением соответственно. Аналитическими расчетами показано, что оценка тангенциальной проницаемости с использованием нормального удельного сопротивления дает более точные результаты, чем с применением тангенциального УЭС. Отмечается, что такая зависимость может быть полезна при условии, что есть возможность оценки нормального УЭС коллектора, например, при помощи данных электромагнитного каротажа из субгоризонтальной скважины, вскрывающей коллектор, описываемый трансверсально-изотропной моделью, когда ось каротажного прибора характеризуется относительным наклоном к оси электрической анизотропии пород.

В рамках развития теоретико-методической базы применительно к оценке параметров электрической анизотропии с относительным наклоном оси предложен способ определения горизонтального УЭС с использованием данных метода электромагнитного каротажа для однородной модели трансверсально-изотропного пласта (со значениями ρ_h от 0.5 до 10 Ом·м, величины коэффициента анизотропии λ не указаны в явном виде), пересеченного скважиной с высоким относительным углом наклона (например, для горизонтального пласта, вскрытого наклонно-горизонтальной скважиной) [Nagiwara, 1996]. Утверждается, что определение горизонтального УЭС геоэлектрической модели возможно с использованием математических соотношений и хотя бы двух значений сигналов электромагнитного каротажа. В качестве данных используются сигналы индукционного каротажа на кабеле либо разности фаз и отношения амплитуд высокочастотного электромагнитного каротажа в

процессе бурения, в том числе полученные для зондов различной длины или частоты. Преимущество метода состоит в том, что он не требует знания угла наклона скважины относительно нормали к границе пласта (угла θ) при расчете горизонтального УЭС. Более того, автор утверждает, что с использованием предложенного метода, после определения горизонтального УЭС, возможна оценка коэффициента электрической анизотропии, если известен угол θ , и, наоборот, возможна оценка угла θ , если известен коэффициент анизотропии.

Работа [Graciet, Shen, 1997] посвящена разработке программно-методического обеспечения: создан алгоритм расчета сигналов метода индукционного каротажа для частот, составляющих десятки кГц (прибор 6FF40) и 2 МГц (аппаратура CDR), в трансверсально-изотропных геоэлектрических моделях, но без учета влияния скважины и зоны проникновения. Отмечается, что для прибора высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения наличие анизотропии может быть установлено по расхождению значений кажущихся УЭС, определенных по разностям фаз и отношениям амплитуд [Каринский, 2018]. При моделировании данных использованы:

- 1) трехслойная модель; промежуточный трансверсально-изотропный пласт со значениями параметров: $\rho_h = 1.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 5.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.7$), мощность пласта h изменяется от 1 м до 6 м, УЭС вмещающих изотропных пород $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, зенитные углы наклона прибора θ – от 0° до 89° ;
- 2) та же модель с другими значениями параметров: $\rho_h = 2.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 16.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.7$), $h = 3 \text{ м}$, $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, θ – от 0° до 75° ;
- 3) трехслойная модель с трансверсально-изотропным промежуточным слоем: $\rho_h = 1.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 5.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.7$), $h = 1 \text{ м}$ и трансверсально-изотропными вмещающими пластами: $\rho_h = 2.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 16.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.7$), $\theta = 0^\circ\text{--}75^\circ$.

Возможности зондов ВИКИЗ при определении геоэлектрических параметров макроанизотропной среды в субгоризонтальных скважинах исследованы в [Эпов и др., 1998]. Рассмотрена трехслойная геоэлектрическая модель с трансверсально-изотропным тонкослоистым коллектором мощностью 1 м и изотропными вмещающими породами, зенитным углом наклона каротажного прибора от 80° до 89° и следующими геоэлектрическими параметрами:

- 1) для коллектора: $\rho_h = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\lambda = 1.05\text{--}1.2$, для вмещающих слоев: $\rho = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 2) коллектор: $\rho_h = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\lambda = 1.05\text{--}1.2$, вмещающие слои: $\rho = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Влияние скважины и зоны проникновения считается достаточно малым и не учитывается. Описана методика оценки эффективной мощности и УЭС терригенных тонкослоистых коллекторов с использованием спектрального анализа сигналов коротких зондов и автоматической инверсии данных длинных зондов ВИКИЗ. Зависимость сигналов низкочастотного и высокочастотного индукционного каротажа от вертикального УЭС слоистой пачки, возникающая в наклонных скважинах, рассматривается в [Эпов и др., 1999].

Решение прямой задачи электромагнитных зондирований в слоисто-однородной наклонно-анизотропной среде (с ненулевым углом наклона главных осей тензора удельной электропроводности) без учета влияния скважины и проникновения рассматривается в работе [Федоров, Эпов, 2003]. Получены аналитические представления для электромагнитных полей в моделях:

- 1) два наклонно-анизотропных полупространства ($\rho_h = 0.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, λ примерно равен 1.6 для обоих слоев), описываемые тензорами удельной электропроводности с малыми, неравными между собой углами наклона главных осей: $\theta_1 = 4^\circ$ (в верхнем полупространстве), $\theta_2 = 2^\circ$ (в нижнем полупространстве);

- 2) два трансверсально-изотропных (с нулевыми углами θ_1 и θ_3) полупространства с равными тензорами УЭП, между ними расположен пласт, в котором тензор удельной электропроводности в главных осях совпадает с таковым для вмещающей среды, а угол наклона главных осей (θ_2) считается малым; значения УЭС явно не указаны.

Кроме того, в работе [Федоров, Эпов, 2003] выполнено построение распределения вторичных источников электромагнитного поля в среде.

В публикации [Федоров, Эпов, 2005] предлагается способ определения элементов кажущегося тензора УЭП среды с помощью их выражения через значения сигналов трехкатушечного зонда с различной взаимной ориентацией моментов источника и приемных катушек. При расчетах применяется трехслойная модель с изотропными вмещающими полупространствами ($\rho_1 = 3.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_3 = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для верхнего и нижнего полупространств соответственно) и наклонно-анизотропным промежуточным слоем с $\rho_h = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.3$), мощностью 2 м и углом θ (между осью прибора и осью анизотропии) 27° .

Проведено математическое моделирование и анализ сигналов электромагнитного и электрического каротажа, а также функций их чувствительности для макроанизотропной среды, без учета влияния скважины и проникновения [Эпов и др., 2016]. Рассмотрены модели:

- 1) однородная трансверсально-изотропная, $\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 9; 16 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.5; 2$), с различными значениями зенитного угла между каротажным прибором и вертикалью – от 0° до 90° (глинистая покрывка в терригенном разрезе);
- 2) двухслойная горизонтально-слоистая, оба пласта трансверсально-изотропные, в верхнем полупространстве $\rho_{h1} = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v1} = 9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.5$), в нижнем – $\rho_{h2} = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v2} = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2$), зенитный угол наклона прибора 60° (глинистая покрывка и нефтенасыщенный песчаник);
- 3) трехслойная горизонтально-слоистая, два верхних пласта – трансверсально-изотропные (глинистая покрывка и нефтенасыщенный песчаник), $\rho_{h1} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v1} = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.4$), $\rho_{h2} = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v2} = 75 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.2$), нижний – изотропный (водонасыщенный песчаник), $\rho_3 = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, каротажный прибор перемещается в пределах модели по криволинейной траектории.

Результатами расчетов показано, что совместное использование данных в силу независимости поведения сигналов вблизи геоэлектрических границ позволяет определять параметры рассматриваемых макроанизотропных моделей и значительно повысить достоверность результатов интерпретации.

В начале 2000-х годов осуществлено расширение аппаратно-методической базы применительно к методу многокомпонентного индукционного каротажа, сигналы которого чувствительны к электрической анизотропии при любом наклоне скважины в среде [Kriegshaüser et al., 2000; Rabinovich et al., 2004]. Компанией Baker Atlas разработан прибор многокомпонентного индукционного каротажа 3DEX, предназначенный для определения параметров электрической анизотропии коллекторов [Page et al., 2001]. Прибор включает в себя три генераторные и три приемные катушки, ориентированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1), обеспечивая 9 различных измеряемых характеристик [Zhang et al., 2007].



Рис. 1. Схема конфигурации прибора 3DEX: Т – генераторная катушка (красным цветом), R – приемная катушка (синим цветом); x, y, z – пространственные ориентации катушек

Генераторные катушки прибора наводят токи во всех трех пространственных направлениях, а приемные катушки регистрируют характеристики соответствующих магнитных полей. Токи, наведенные горизонтально расположенными генераторными катушками, текут и перпендикулярно, и параллельно напластованию. Следовательно, зонды, включающие в себя такие катушки, чувствительны как к горизонтальному, так и к вертикальному УЭС. Таким образом, с использованием этих зондов возможно восстановление горизонтального и вертикального УЭС горных пород при проведении каротажа в вертикальных, наклонных и горизонтальных скважинах. Помимо этого, по данным аппаратуры может быть определен угол наклона прибора по отношению к анизотропному пласту. Однако определение геометрических и геоэлектрических параметров пласта по сигналам этого прибора требует применения трехмерного моделирования и инверсии [Davydycheva, Frenkel, 2010].

Известно, что для упрощения численных расчетов сигналов традиционного индукционного каротажа источники и приемники представляются в виде точечных магнитных диполей. Такой подход эффективен для расчета сигналов в приемных катушках с магнитными моментами, соосными скважине. В работе [Kriegshauser et al., 2000] показано, что приемные катушки с магнитными моментами, перпендикулярными осям прибора и скважины, тоже могут быть представлены в виде точечных магнитных диполей ввиду малой вносимой погрешности в сигнал – до 0.5 %.

Выбор параметров рассматриваемого прибора основан на исследованиях его разрешающей способности. При соответствующих расчетах применялись цилиндрически-слоистые, горизонтально-слоистые и двумерные слоистые модели, учитывающие влияние скважины, зоны проникновения. Более того, для оценки оптимальности выбранных параметров выполнен анализ чувствительности данных к параметрам отложений, а также к таким источникам помех, как неровности стенок скважины, эксцентриситет, изгиб прибора. Для реалистичной оценки разрешающей способности аппаратуры создана комплексная модель шумов, которая учитывает наиболее значительные виды влияния на данные. Такой подход позволил провести количественное сравнение различных вариантов конструкции прибора и выбрать оптимальный из них. По результатам расчетов сделан вывод, что с использованием сигналов прибора возможно определение параметров анизотропных пластов мощностью порядка 2–3 м. Аппаратура применена в полевых условиях, а полученные и проинтерпретированные данные подтвердили ее прогнозируемые возможности.

Также в начале 2000-х годов компанией Schlumberger разработан прибор многокомпонентного индукционного каротажа Rt Scanner [Rosthal et al., 2003, Hu et al., 2017], сигналы которого чувствительны к тангенциальному и нормальному УЭС электрически анизотропной среды при любом относительном угле наклона прибора [Wang et al., 2006]. Кроме того, утверждается, что Rt Scanner позволяет оценить угол и азимут падения электрически анизотропного пласта [Zhang et al., 2007].

На рисунке 2 схематически изображена конфигурация прибора Rt Scanner. Он включает в себя один комплект генераторных и шесть комплектов приемных катушек с совмещенными центрами. Каждый такой комплект представляет собой три взаимно-ортогональные катушки, расположенные в одной общей точке. Набор зондов прибора, состоящих из этих комплектов, позволяет проводить трехкомпонентные измерения с различными глубинностями (для разных комплектов приемных катушек). Более того, в конфигурацию прибора входят три соосные прибору приемные катушки, составляющие вместе с комплектом генераторных катушек три коротких зонда.

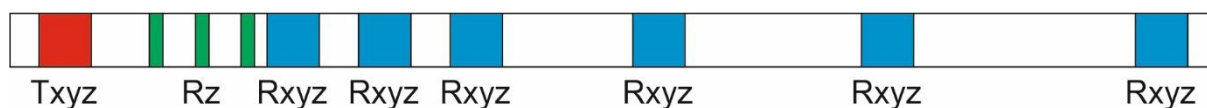


Рис. 2. Схема конфигурации прибора Rt Scanner; Txyz – комплект генераторных катушек с совмещенными центрами (красным цветом), Rxyz – комплекты приемных катушек с совмещенными центрами (синим цветом), Rz – три соосные прибору приемные катушки

Предложен способ оценки угла наклона скважины относительно пласта, а также коэффициента анизотропии с помощью соотношения между компонентами сигнала прибора Rt Scanner без проведения инверсии [Hagiwara, 2010]. Для учета влияния мощности и коэффициента анизотропии пласта на оцениваемые кажущиеся параметры геоэлектрической модели выполнено моделирование синтетических сигналов Rt Scanner (с дальнейшим применением для них предлагаемого метода) в трехслойной модели с изотропными вмещающими породами с УЭС 10 Ом·м, промежуточным трансверсально-изотропным пластом со значениями $\rho_h = 10$ Ом·м, $\rho_v = 10.2; 10.8; 12.7; 91.5$ Ом·м ($\lambda = 1.01; 1.04; 1.125; 3.025$), мощностью 13 м, 25 м, 50 м, 100 м. Зенитный угол наклона прибора составляет 30° . При этом явно не указывается, учитывается ли влияние скважины. В работе [Щетинина и др., 2020] при интерпретации данных ГИС применяются результаты исследования керна и инверсии трехкомпонентных измерений прибора Rt Scanner из наклонно-направленных и субгоризонтальных участков скважины. Авторами приведен пример зависимости вертикального УЭС ρ_v от горизонтального УЭС ρ_h , определяемой с использованием указанного комплекса методов и выраженной в виде степенных функций, для песчаных и глинистых пород анизотропной толщи.

В статье [Nechaev et al., 2021] проведен анализ возможностей оценки горизонтального и вертикального удельных сопротивлений, а также угла наклона θ главных осей тензора УЭС (относительно оси вертикальной скважины) анизотропной среды по комплексу данных отечественных методов скважинной электрометрии (ВИКИЗ и БКЗ). Вид тензора УЭС подобен представленному в (1) для тензора УЭП. Моделирование синтетических сигналов выполнено с использованием метода конечных элементов в следующих моделях:

- 1) УЭС скважины $\rho_c = 1$ Ом·м, радиус скважины $r_c = 0.108$ м, однородный наклонно-анизотропный пласт: $\rho_h = 4; 15$ Ом·м, $\rho_v = 9; 75$ Ом·м ($\lambda = 1.5; 2.2$ соответственно), $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ (песчано-глинистые породы Западной Сибири);
- 2) $\rho_c = 1$ Ом·м, $r_c = 0.108$ м, однородный наклонно-анизотропный пласт: $\rho_h = 50$ Ом·м, $\rho_v = 50\text{--}800$ Ом·м ($\lambda = 1\text{--}4$), $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ (отложения баженовской свиты);
- 3) горизонтально-слоистая; $\rho_c = 1$ Ом·м, $r_c = 0.108$ м; перекрывающий и подстилающий слои – аргиллиты с $\rho_h = 10$ Ом·м, $\lambda = 1.2$, $\theta = 1^\circ$; карбонатные породы мощностью $h = 4$ м, $\rho_h = 200$ Ом·м, $\lambda = 3.5$, $\theta = 85^\circ$; карбонатно-кремнистые микститы: $h = 4$ м, $\rho_h = 150$ Ом·м, $\lambda = 3$, $\theta = 45^\circ$; слой силицитов: $h = 6$ м, $\rho_h = 100$ Ом·м, $\lambda = 1.5$, $\theta = 2.5^\circ$; аргиллитно-кремнисто-карбонатные микститы: $h = 12$ м, $\rho_h = 50$ Ом·м, $\lambda = 2$, $\theta = 5^\circ$ (обобщенная двумерная модель баженовской свиты).

Результатами расчетов показано, что по сигналам этих методов с использованием созданного программного обеспечения и с учетом наклона оси электрической анизотропии возможно более точное изучение трещиновато-тонкослоистых интервалов баженовской свиты, являющихся чрезвычайно перспективными на залежи нефти.

ВЫВОДЫ

Изучение геологической среды, характеризующейся наклоном оси электрической анизотропии относительно оси каротажного прибора, началось более 40 лет назад. На ранних этапах оно проводилось с помощью аналитических вычислений, затем – с использованием специально разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения для численного моделирования сигналов скважинной электрометрии. Кроме того, проектировалась и создавалась измерительная аппаратура многокомпонентного индукционного каротажа, предназначенная для оценки параметров геоэлектрических моделей с произвольным относительным углом между осью анизотропии и осью каротажного прибора.

В работах отечественных и зарубежных ученых с использованием аналитических выражений предложен способ определения компонент электромагнитного поля произвольного гармонического источника, а также выполнен теоретический анализ потенциала источника постоянного электрического тока в слоистых наклонно-анизотропных моделях среды. Кроме того, показана связь фильтрационно-емкостных параметров слоистых коллекторов с их удельными сопротивлениями в различных направлениях, а также предложены зависимости, позволяющие с определенными ограничениями оценить значения УЭС и относительного угла наклона оси электрической анизотропии по сигналам электромагнитного каротажа.

В связи с необходимостью повышения точности решения прямых задач отмечается постепенное усложнение со временем трансверсально-изотропных моделей, используемых для расчетов сигналов. Появление и дальнейшее совершенствование численных алгоритмов решения прямых задач позволило учитывать при моделировании (примерно с конца 1990-х годов) различные эффекты: влияние скважины, неравномерного проникновения фильтрата бурового раствора, эксцентриситета прибора, трещин и разломов на данные зондов.

Разработка зарубежными компаниями приборов многокомпонентного индукционного каротажа, чувствительных к горизонтальному и вертикальному УЭС среды при различных зенитных углах скважины, позволила повысить эффективность определения параметров геоэлектрических моделей с относительным наклоном оси электрической анизотропии. Однако при этом требуется применение ресурсоемких алгоритмов трехмерного моделирования и инверсии.

Среди рассмотренных трансверсально-изотропных моделей, используемых для решения прямой и обратной задач, выделяются как параметризуемые горизонтальным и вертикальным УЭС с ненулевым зенитным углом наклона прибора, так и описываемые тензором УЭП (либо УЭС) с наклоном главных осей. Кроме того, применяются как однородные, так и слоистые модели, с учетом и без учета влияния скважины. Значения геоэлектрических параметров моделей изменяются в широких пределах: горизонтального УЭС – от 0.33 до 200 Ом·м, вертикального УЭС – от 0.6 до 1000 Ом·м, коэффициента анизотропии – от 1 до 14, зенитного угла наклона каротажного прибора (или угла наклона главных осей тензора УЭП) – от 0° до 90°.

Одним из дальнейших возможных направлений развития исследований является изучение возможности переинтерпретации архивных данных комплекса стандартных отечественных методов скважинной электрометрии в рамках моделей с наклоном оси электрической анизотропии относительно оси каротажного прибора.

Научно-исследовательские работы выполнены в рамках проекта FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Каринский А.Д.** Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды. – М.: ГЕОС, 2018. – 184 с.
- Сухорукова К.В., Петров А.М.** Электрическая анизотропия терригенных отложений: краткий обзор подходов к ее определению по данным электрокаротажа в вертикальных скважинах // Геофизические технологии. – 2021. – № 3. – С. 41–66, doi: 10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-41.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Электромагнитные поля гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика. – 1977. – № 18 (1). – С. 101–109.
- Федоров А.И., Эпов М.И.** Переменное электромагнитное поле в наклонно-анизотропной слоистой среде // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2003. – № 6 (4). – С. 119–131.
- Федоров А.И., Эпов М.И.** Определение элементов тензора электропроводности пород по данным электромагнитного каротажа // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2005. – № 8 (1). – С. 143–152.
- Щетинина Н.В., Гильманов Я.И., Паромов С.В., Мамяшев В.Г.** Изучение анизотропии геолого-геофизических параметров горных пород с целью совершенствования методики интерпретации данных геофизических исследований горизонтальных участков скважин (Восточная Сибирь) // Каротажник. – 2020. – № 1 (301). – С. 84–93.
- Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Оценка параметров тонкослоистых коллекторов по данным высокочастотных электромагнитных зондирований в горизонтальных скважинах // Геология и геофизика. – 1998. – № 39 (11). – С. 1608–1614.
- Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Оценка электрической анизотропии по диаграммам ВИКИЗ // Каротажник. – 1999. – № 54. – С. 17–29.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Глинских В.Н.** Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Каротажник. – 2016. – № 2 (260). – С. 64–79.
- Anderson B., Chang S.** Synthetic induction logs by the finite element method // The Log Analyst. – 1982. – Vol. 23 (6). – P. 17–26.
- Anderson B., Barber T., Lüling M.** The response of induction tools to dipping, anisotropic formations // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-D. – 12 p.
- Anderson B., Barber T., Druskin V., Lee P., Dussan, V.E., Knizhnerman L., Davydycheva S.** The response of multiarray induction tools in highly dipping formations with invasion and in arbitrary 3D geometries // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-A. – 14 p.
- Anderson B.I., Druskin V., Lee P., Lüling M.G., Schoen E., Tabanou J., Wu P., Davydycheva S., Knizhnerman L.** Modeling 3D effects on 2-MHz LWD resistivity logs // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997-N. – 14 p.
- Chang S., Anderson B.** Simulation of induction logging by the finite element method // Geophysics. – 1984. – Vol. 49 (11). – P. 1943–1958, doi: 10.1190/1.1441606.
- Davydycheva S., Frenkel M.A.** Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // PIERS Proceedings. – Cambridge, 2010. – P. 390–396.
- Graciet S., Shen L.C.** Simulation of induction and MWD resistivity tools in anisotropic dipping beds // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997- M. – 14 p.

- Hagiwara T.** Anisotropic shale and induction log shoulder bed corrections for deviated boreholes // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-Z. – 12 p.
- Hagiwara T.** A new method to determine horizontal-resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-Q. – 8 p.
- Hagiwara T.** Determination of dip and anisotropy from multi-frequency tri-axial induction measurements // PIERS Online. – 2010. – Vol. 6 (5). – P. 445–449, doi: 10.2529/PIERS091217080307.
- Hill D.G.** A laboratory investigation of electrical anisotropy in Precambrian rocks // Geophysics. – 1972. – Vol. 37 (6). – P. 1022–1038, doi: 10.1190/1.1440311.
- Hu Y., Wang G., Liang L., Abubakar A.** Estimation of reservoir parameters from inversion of triaxial induction data constrained by mud-filtrate invasion modeling // IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques. – 2017. – Vol. 2. – P. 228–236, doi: 10.1109/JMMCT.2017.2787652.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** Electrical methods in geophysical prospecting. – Pergamon Press, Oxford, 1966. – 517 p.
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F.** The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-HH. – 12 p.
- Kriegshäuser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., Gupta P., v. d. Horst J.** A new multicomponent induction logging tool to resolve anisotropic formations // SPWLA 41st Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-D. – 14 p.
- Moran J.H., Gianzero S.** Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements // Geophysics. – 1979. – Vol. 44 (7). – P. 1266–1286, doi: 10.1190/1.1441006.
- Moran J.H., Gianzero S.** Electrical anisotropy: its effect on well logs // Developments in Geophysical Exploration Methods—3. – Springer, Dordrecht, 1982. – P. 195–238, doi: 10.1007/978-94-009-7349-7_6.
- Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I.** Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 2021. – Vol. 29 (2). – P. 295–304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.
- Page G.C., Fanini O.N., Kriegshäuser B.F., Mollison R.A., Yu L., Colley N.** Field example demonstrating a significant increase in calculated gas-in-place: an enhanced shaly sand reservoir characterisation model utilizing 3DEX™ multicomponent induction data // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, 2001. – Paper SPE-71724-MS. – 14 p., doi: 10.2118/71724-MS.
- Rabinovich M., Besspalov A., Corley B., Merchant G., Wang T., Quint E., Morrison J.** Effect of fractures on multi-component and multiarray induction logs // SPWLA 45th Annual Logging Symposium. – Noordwijk, 2004. – Paper SPWLA-2004-UU. – 16 p.
- Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K.-C., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Minerbo G., Schlein R., Villegas L., Wang H., Zhou F.** Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // SPWLA 44th Annual Logging Symposium. – Galveston, Texas, 2003. – Paper SPWLA-2003-QQ. – 14 p.
- Wang H., Barber T., Morriss C., Rosthal R., Hayden R., Markley M.** Determining anisotropic formation resistivity at any relative dip using a multiarray triaxial induction tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 2006. – Paper SPE-103113-MS, doi: 10.2118/103113-MS.

Zhang Z., Akinsamni O., Ha K.-T., Bourgeois T., Jock S., Blumhagen C., Stromberg S. Triaxial induction logging – an operator's perspective // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – Austin, Texas, 2007. – Paper SPWLA-2003-Y. – 16 p.

REFERENCES

Anderson B., Chang S. Synthetic induction logs by the finite element method // *The Log Analyst*. – 1982. – Vol. 23 (6). – P. 17–26.

Anderson B., Barber T., Lüling M. The response of induction tools to dipping, anisotropic formations // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-D. – 12 p.

Anderson B., Barber T., Druskin V., Lee P., Dussan, V.E., Knizhnerman L., Davydycheva S. The response of multiarray induction tools in highly dipping formations with invasion and in arbitrary 3D geometries // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-A. – 14 p.

Anderson B.I., Druskin V., Lee P., Lüling M.G., Schoen E., Tabanou J., Wu P., Davydycheva S., Knizhnerman L. Modeling 3D effects on 2-MHz LWD resistivity logs // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997-N. – 14 p.

Chang S., Anderson B. Simulation of induction logging by the finite element method // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49 (11). – P. 1943–1958, doi: 10.1190/1.1441606.

Davydycheva S., Frenkel M.A. Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // *PIERS Proceedings*. – Cambridge, 2010. – P. 390–396.

Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N. Estimation of parameters for thin-layered formations from high-frequency induction logging data in horizontal boreholes // *Russian Geology and Geophysics*. – 1998. – Vol. 39 (11). – P. 1608–1614.

Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N. Estimation of electrical anisotropy using VIKIZ diagrams // *Karotazhnik*. – 1999. – Vol. 54. – P. 17–29.

Epov M.I., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Glinskikh V.N. Studies on capabilities of electric and electromagnetic logs in electrically macroanisotropic formations exposed by inclined horizontal boreholes // *Karotazhnik*. – 2016. – Vol. 2 (260). – P. 64–79.

Fedorov A.I., Epov M.I. A variable electromagnetic field in an obliquely anisotropic layered medium // *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. – 2003. – Vol. 6 (4). – P. 119–131.

Fedorov A.I., Epov M.I. Determination of the elements of the rocks electrical conductivity tensor based on electromagnetic logging data // *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. – 2005. – Vol. 8 (1). – P. 143–152.

Graciet S., Shen L.C. Simulation of induction and MWD resistivity tools in anisotropic dipping beds // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997- M. – 14 p.

Hagiwara T. Anisotropic shale and induction log shoulder bed corrections for deviated boreholes // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-Z. – 12 p.

Hagiwara T. A new method to determine horizontal-resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-Q. – 8 p.

Hagiwara T. Determination of dip and anisotropy from multi-frequency tri-axial induction measurements // *PIERS Online*. – 2010. – Vol. 6 (5). – P. 445–449, doi: 10.2529/PIERS091217080307.

- Hill D.G.** A laboratory investigation of electrical anisotropy in Precambrian rocks // *Geophysics*. – 1972. – Vol. 37 (6). – P. 1022–1038, doi: 10.1190/1.1440311.
- Hu Y., Wang G., Liang L., Abubakar A.** Estimation of reservoir parameters from inversion of triaxial induction data constrained by mud-filtrate invasion modeling // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. – 2017. – Vol. 2. – P. 228–236, doi: 10.1109/JMMCT.2017.2787652.
- Karinsky A.D.** Electromagnetic field in models of an electrically anisotropic medium [in Russian]. – GEOS, Moscow, 2018. – 184 p.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** Electrical methods in geophysical prospecting. – Pergamon Press, Oxford, 1966. – 517 p.
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F.** The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs // *SPWLA 36th Annual Logging Symposium*. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-HH. – 12 p.
- Kriegshaüser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., Gupta P., v. d. Horst J.** A new multicomponent induction logging tool to resolve anisotropic formations // *SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-D. – 14 p.
- Moran J.H., Gianzero S.** Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (7). – P. 1266–1286, doi: 10.1190/1.1441006.
- Moran J.H., Gianzero S.** Electrical anisotropy: its effect on well logs // *Developments in Geophysical Exploration Methods—3*. – Springer, Dordrecht, 1982. – P. 195–238, doi: 10.1007/978-94-009-7349-7_6.
- Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I.** Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 2021. – Vol. 29 (2). – P. 295–304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.
- Page G.C., Fanini O.N., Kriegshäuser B.F., Mollison R.A., Yu L., Colley N.** Field example demonstrating a significant increase in calculated gas-in-place: an enhanced shaly sand reservoir characterisation model utilizing 3DEX™ multicomponent induction data // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – New Orleans, Louisiana, 2001. – Paper SPE-71724-MS. – 14 p., doi: 10.2118/71724-MS.
- Rabinovich M., Besspalov A., Corley B., Merchant G., Wang T., Quint E., Morrison J.** Effect of fractures on multi-component and multiarray induction logs // *SPWLA 45th Annual Logging Symposium*. – Noordwijk, 2004. – Paper SPWLA-2004-UU. – 16 p.
- Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K.-C., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Minerbo G., Schlein R., Villegas L., Wang H., Zhou F.** Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // *SPWLA 44th Annual Logging Symposium*. – Galveston, Texas, 2003. – Paper SPWLA-2003-QQ. – 14 p.
- Shchetinina N.V., Gilmanov Ya. I., Paromov S.V., Mamyashev V.G.** A study of the anisotropy of the geologic and geophysical parameters of the rocks for the purpose of the improvement of the well log interpretation technique for horizontal borehole intervals (East Siberia) // *Karotazhnik*. – 2020. – No. 1 (301). – P. 84–93.
- Suhorukova K.V., Petrov A.M.** Electrical anisotropy of terrigenous deposits: a brief overview of approaches to its determination from electrical logging data in vertical wells // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2021. – Vol. 3. – P. 41–66, doi: 10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-41.
- Tabarovsky, L.A., Epov, M.I.** Electromagnetic field of harmonic sources from the stratified anisotropic media // *Russian Geology and Geophysics*. – 1977. – Vol. 18 (1). – P. 101–109.

Wang H., Barber T., Morriss C., Rosthal R., Hayden R., Markley M. Determining anisotropic formation resistivity at any relative dip using a multiarray triaxial induction tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 2006. – Paper SPE-103113-MS, doi: 10.2118/103113-MS.

Zhang Z., Akinsamni O., Ha K.-T., Bourgeois T., Jock S., Blumhagen C., Stromberg S. Triaxial induction logging – an operator's perspective // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – Austin, Texas, 2007. – Paper SPWLA-2003-Y. – 16 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МОСКАЕВ Илья Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, обоснование новых методов исследования скважин, новые способы интерпретации, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных.

*Статья поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.,
принята к публикации 24 декабря 2022 г.*