
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ОКТАБРЬ № 4 2022 ДЕКАБРЬ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

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

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 4	Октябрь–Декабрь 2022
----------------	-------------------------------	-----	-------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Даниловский К.Н., Москаев И.А. Эволюция приборов электромагнитного каротажа в процессе бурения (по материалам отечественной и зарубежной литературы)	4
Оленченко В.В., Бортникова С.Б., Девятова А.Ю. Применение электроразведочных методов при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности). Обзор.....	23
Макась А.Л., Кудрявцев А.С., Трошков М.Л. Новый подход к измерению комбинированного изотопного состава метана с целью его генетической характеристики.....	41
Василенко Н.К., Митрофанов Г.М., Гореев Н.А., Кушнарев Р.С. Особенности определения параметра затухания по реальным данным	54
Полозов С.С., Быкадоров А.И., Харламов А.С., Зайцев А.В. Опыт экспериментальной регистрации сейсмической эмиссии приборного массива при открытой отработке угольных месторождений.....	65
Задоев А.Ю., Петрович Т.А., Орлов Ю.А., Дучков А.А., Митрофанов Г.М. Методика определения параметров физических моделей для сейсмических экспериментов	75
Кушнарев Р.С., Гореев Н.А., Митрофанов Г.М. Разработка и тестирование процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд	89
Соболев А.Ю., Москалев Г.В. Оценка нефтенасыщенности коллектора по данным высокочастотного индукционного каротажа: численный эксперимент с использованием многофизических моделей пластов	105

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2022

ISSN 2619-1563 (Online)

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 4	October–December 2022
-----------------	-----------	------	--------------------------

CONTENTS

Danilovskiy K.N., Moskaev I.A. Evolution of electromagnetic logging while drilling tools (based on national and foreign literature)	4
Olenchenko V.V., Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu. Application of electrical prospecting methods for technogenic bodies (stored wastes of the mining industry) studies: Review	23
Makas A.L., Kudryavtsev A.S., Troshkov M.L. The new approach to determination of the combined isotopic composition of methane for its genetic characterization	41
Vasilenko N.K., Mitrofanov G.M., Goreyavchev N.A., Kushnarev R.S. Particulars of the attenuation parameter determining from real data	54
Polozov S.S., Bykadorov A.I., Kharlamov A.S., Zaitsev A.V. Experience of experimental recording of seismic emission of the side array during open mining of coal deposits.....	65
Zadoev A.Yu., Petrochenko T.A., Orlov Yu.A., Duchkov A.A., Mitrofanov G.M. Methodology of physical models parameters determining for seismic experiments	75
Kushnarev R.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M. Testing processing algorithms for seismic data from laboratory modeling	89
Sobolev A.Yu., Moskalev G.V. Recovering oil reservoir parameters according to high-frequency induction logging data: numerical study using multiphysics modeling	105



ЭВОЛЮЦИЯ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

К.Н. Даниловский, 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 важные этапы в развитии аппаратуры электромагнитного каротажа по материалам отечественной и зарубежной литературы: адаптация традиционных приборов для измерений в процессе бурения и модификация аппаратуры для измерений в процессе бурения с целью обеспечения возможности проведения более глубоких и азимутальных измерений. Кратко описываются применяемые алгоритмы моделирования и интерпретации данных, приводятся примеры приборов, используемых при бурении нефтяных скважин, в том числе отечественная разработка.

Электромагнитный каротаж в процессе бурения, глубинные измерения, азимутальные измерения, инверсия, геонавигация

EVOLUTION OF ELECTROMAGNETIC LOGGING WHILE DRILLING TOOLS (BASED ON NATIONAL AND FOREIGN LITERATURE)

K.N. Danilovskiy, I.A. Moskaev

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

Important stages in the development of electromagnetic logging tools based on national and foreign literature are considered: adaptation of traditional tools to logging while drilling and modification of tools for logging while drilling in order to provide the possibility of carrying out deeper and azimuthal measurements. Applied algorithms for modeling and interpreting data are briefly described, examples of tools which are used while drilling oil wells, including the national tool, are given.

Electromagnetic logging while drilling, deep measurements, azimuthal measurements, inversion, geosteering

ВВЕДЕНИЕ

В последние 40 лет разрабатывается и все более широко внедряется каротаж в процессе бурения (на английском языке: logging while drilling или LWD) [Patton et al., 1977; Gravley, 1983]. Преимущество каротажа в процессе бурения над каротажем на кабеле состоит в том, что при использовании каротажа в процессе бурения не нужно дополнительно тратить время на спуск и подъем измерительного прибора. Благодаря этому скважина не простаивает и, как следствие, сокращаются денежные расходы на осуществление работ на скважине. По этой причине каротаж в процессе бурения постепенно вытесняет каротаж на кабеле [Аксельрод, 2001].

Одна из первых коммерческих телеметрических систем, позволявших проводить измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов в процессе бурения, была предложена в начале

1980-х гг. компанией Schlumberger [Tanguy, Zoeller, 1981; Gravley, 1983]. В качестве прибора для определения УЭС использовался потенциал-зонд, устанавливаемый за буровым долотом. Такой потенциал-зонд применялся для корреляции геологических маркеров, определения характеристик флюидов в пористых пластах и порового давления в глинах [Jan, Campbell, 1984].

Однако потенциал-зонды обладают малой радиальной глубиной и низким вертикальным разрешением. Более того, будучи устройствами постоянного тока, потенциал-зонды не работают в непроводящих буровых растворах на углеводородной основе [Rodney, Wisler, 1986]. Альтернатива методам, основанным на постоянном токе, была найдена в применении электромагнитного каротажа (ЭМК) в процессе бурения, который широко используется в настоящее время.

В данной статье выделены и рассмотрены важные этапы в развитии приборов ЭМК в процессе бурения: 1) адаптация традиционных приборов ЭМК для измерений в процессе бурения, 2) модификация приборов ЭМК в процессе бурения с целью обеспечения возможности проведения более глубоких и азимутальных (направленных) измерений с помощью данных приборов. Приводятся примеры реальных приборов, используемых при бурении нефтяных скважин.

ПРИБОРЫ ТРАДИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ КАТУШКАМИ

Для оперативного получения информации о распределении УЭС горных пород из скважин с растворами на нефтяной основе в 80-е гг. XX века приборы ЭМК начали адаптировать к измерениям в процессе бурения [Clark et al., 1988; Fredericks et al., 1989; Bittar et al., 1993; Oberkircher et al., 1993; Gianzero et al., 1994; Meyer et al., 1994; Wisler et al., 1998].

Преимущества ЭМК по сравнению с методами постоянного тока состоят в том, что приборы ЭМК имеют большую радиальную глубину и работают во всех типах буровых растворов.

Устройства индукционного каротажа широко использовались при проведении каротажа на кабеле благодаря их большей глубинности, чем у приборов высокочастотного ЭМК. Однако устройства индукционного каротажа изначально были достаточно хрупкими, чтобы выдержать жесткие условия бурения. Поэтому приборы высокочастотного ЭМК, как более прочные конструктивно, выступили в качестве альтернативы устройствам индукционного каротажа в процессе бурения [Clark et al., 1988].

Недостаток приборов ЭМК состоит в том, что они не подходят для геонавигации в случаях, если УЭС граничащих пластов слабо отличаются между собой.

Одним из первых коммерческих устройств ЭМК стал прибор под названием Electromagnetic Wave Resistivity (EWR), представленный в 1986 году компанией NL Information Services [Rodney, Wisler, 1986]. В конфигурацию прибора входит один зонд, состоящий из одной генераторной и двух приемных катушек (рис. 1).



Рис. 1. Схема конфигурации прибора EWR, красным цветом обозначена генераторная катушка, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

В конце 1980-х гг. различными геофизическими компаниями разработаны другие варианты приборов ЭМК в процессе бурения, такие как CDR (представлен компанией Schlumberger в 1988 году) [Clark et al., 1988], DPR (представлен компанией Teleco в 1989 году) [Fredericks et al., 1989].

В 1995 году компания Schlumberger представила прибор для ЭМК в процессе бурения под названием Array Resistivity Compensated (ARC5) [Bonner et al., 1995]. Прибор ARC5 состоит из набора трехкатушечных зондов и включает в себя пять генераторных и две приемных катушки (рис. 2). Каждая генераторная катушка работает на частоте 2 МГц. Разность фаз и отношение амплитуд сигнала для каждой из генераторных катушек измеряются между двумя приемными катушками, предоставляя в общей сложности десять исходных сигналов. Наибольшее расстояние между двумя катушками составляет около 1.5 м.

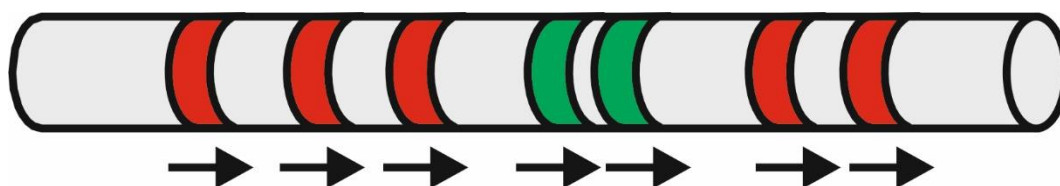


Рис. 2. Схема конфигурации прибора ARC5, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Характеристики и количество производимых измерений прибора ARC5 были преднамеренно выбраны такими же, как для созданных ранее приборов ЭМК на кабеле, с целью сделать возможным применение для прибора ARC5 той же методики интерпретации данных, что и для приборов ЭМК на кабеле.

Первым отечественным вариантом аппаратуры для каротажа в процессе бурения является телеметрическая система, разработанная НПП ГА «Луч» и Институтом нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Весь аппаратно-программный комплекс данной системы включает в себя методы высокочастотного индукционного каротажа (ВИКПБ), гамма-каротажа, бокового, нейтрон-нейтронного и гамма-гамма плотностного каротажа, инклинометрию. В середине 2010-х гг. завершена разработка, проведены успешные испытания и начато внедрение этой аппаратуры. В ВИКПБ используются две генераторные и три приемные катушки, ориентированные вдоль оси прибора (рис. 3).

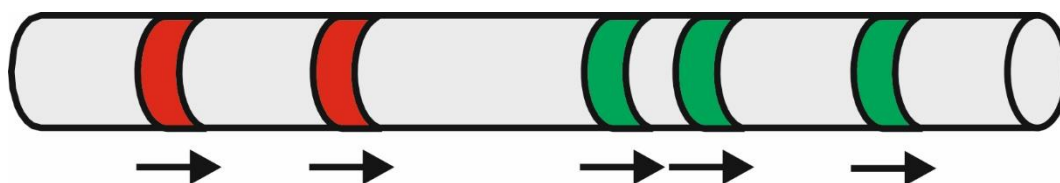


Рис. 3. Схема конфигурации прибора ВИКПБ, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Измерения осуществляются двумя основными и четырьмя дополнительными трехкатушечными зондами с длинами 1.4, 1.05 и 0.7 м, работающими на двух частотах: 880 кГц и 3.5 МГц с регистрацией относительных амплитудно-фазовых характеристик в приемных катушках. Зонды одинаковой длины

различаются базой, то есть расстоянием между дальней и ближней приемными катушками. Глубинность прибора в среднем составляет до 2.0 м.

Основные преимущества многозондовых приборов ЭМК заключаются в более точной оценке электрофизических свойств неизменных пластов, возможностях исследования профиля проникновения бурового раствора, содержащего полезную информацию о фильтрационно-емкостных свойствах изучаемой среды: проницаемости и пористости, а также определения параметров анизотропии [Bonner et al., 1995].

Традиционные приборы ЭМК в процессе бурения в силу своей недостаточной глубинности и отсутствия азимутальных измерений не всегда могли решать задачи удаленного определения границ пластов при бурении наклонно-горизонтальных скважин. В частности, по их измерениям без привлечения дополнительной информации невозможно определить, сверху или снизу происходит приближение геоэлектрической границы пластов. Решение этой проблемы найдено в применении азимутальных и более глубинных приборов ЭМК.

ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА С ПОВЫШЕННОЙ ГЛУБИННОСТЬЮ И АЗИМУТАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОНАВИГАЦИИ И КАРТИРОВАНИЯ ГРАНИЦ

Так как коллекторы становятся все более труднодостижимыми, а скважины – все более сложными, геонавигация требует более современных геофизических методов [Calleja et al., 2010]. Более современные методы, помимо прочих, включают в себя сверхглубинный и азимутальный ЭМК в процессе бурения, отличающиеся от традиционного ЭМК.

Благодаря развитию приборов ЭМК в процессе бурения, включающих в себя катушки, разнесенные на относительно большие расстояния, а также неосесимметричные катушки и, как следствие, предоставляющих возможность проведения более глубинных и азимутальных измерений соответственно [Iversen et al., 2003; Helgesen et al., 2005b; Meyer et al., 2008; Bittar et al., 2009; Beer et al., 2010], осуществляется геонавигация в пределах сложных коллекторов.

С помощью приборов для азимутальных измерений ЭМК возможно определять расстояние до приближающейся границы между пластами и, в отличие от приборов лишь с осесимметричными катушками, направление ее приближения [Bell et al., 2006; Meyer et al., 2008; Tilsley-Baker et al., 2013]. Азимутальные измерения ЭМК в процессе бурения могут быть полезны при размещении скважины в пластах таким образом, чтобы траектория скважины проходила в наиболее продуктивной зоне, а также была настолько плавной, насколько это возможно. Полевые испытания показали, что азимутальные измерения ЭМК в процессе бурения обеспечивают ценную геологическую информацию для опережающей геонавигации [Bell et al., 2006].

Разработка приборов ЭМК с измерениями LWD, характеризующимися высокой глубинностью и наличием азимутальной чувствительности, выделена во второй этап эволюции приборов ЭМК в процессе бурения.

Сверхглубинный прибор ЭМК в процессе бурения DeepTrak разработан компанией Baker Hughes для улучшения качества геонавигации протяженных горизонтальных участков скважин. Данный прибор не обладает азимутальной чувствительностью, а большая глубинность достигается за счет более низких рабочих частот и большего расстояния между генераторной и приемными катушками [Helgesen et al., 2005a].

Измерения прибора DeepTrak дают возможность заблаговременного обнаружения приближения границы в реальном времени. Таким образом, в траекторию скважины могут быть внесены необходимые корректировки.

Прибор DeepTrak включает в себя одну генераторную и две приемные катушки (рис. 4).

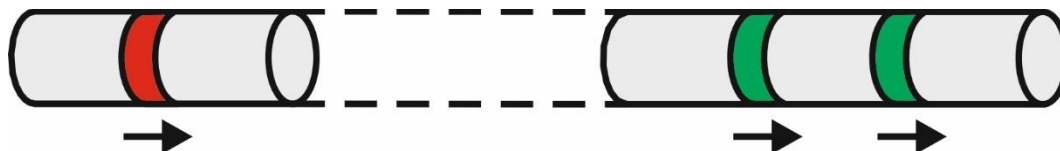


Рис. 4. Схема конфигурации прибора DeepTrak, красным цветом обозначена генераторная катушка, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Данное устройство позволяет выполнять измерения на двух частотах: 20 и 50 кГц. Полная длина всей компоновки низа бурильной колонны (КНБК), включающей прибор DeepTrak, составляет 23 м. Расстояния от генераторной до приемных катушек равны 12 и 17 м. Чтобы расстояния между генераторными и приемными катушками достигали таких больших значений, катушки располагаются на отдельных подсистемах КНБК. Между катушками находится система OnTrak, включающая в себя, помимо прочих устройств, установку традиционного многозондового ЭМК. Ошибки измерения прибора ниже 0.033° и 0.01 дБ для разностей фаз и отношений амплитуд соответственно. Глубинность прибора DeepTrak примерно в пять раз больше, чем глубинность традиционных приборов, и составляет от 1 до 12 м [Helgesen et al., 2005a].

К 2005 году фирмой Schlumberger разработана и испытана в полевых условиях в различных частях мира технология каротажа в процессе бурения под названием PeriScope, которая дает возможность осуществлять направленные измерения ЭМК в процессе бурения путем использования поперечных и наклонных катушек [Li et al., 2005; Zhang et al., 2008].

PeriScope включает в себя пару приемных катушек, наклоненных к его оси на 45° и размещенных на противоположных концах прибора (рис. 5). Кроме того, в его конструкцию включены шесть генераторных катушек, сгруппированных между наклонными катушками. Одна из генераторных катушек имеет поперечную ориентацию, тогда как магнитные моменты остальных генераторных катушек ориентированы вдоль оси прибора. Также в конфигурацию PeriScope включена дополнительная пара приемных катушек, которая в сочетании с осесимметричными генераторными катушками дает возможность осуществлять ненаправленные измерения ЭМК. Наибольшее расстояние между генераторной и приемной катушками составляет примерно 2.4 м.

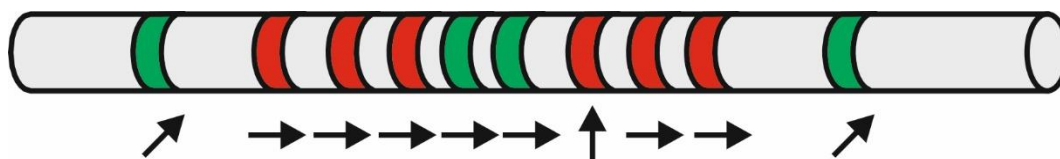


Рис. 5. Схема конфигурации прибора PeriScope, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

В общем и целом, PeriScope обеспечивает направленные измерения разностей фаз и отношений амплитуд при четырех различных расстояниях между генераторными и приемными катушками (244, 213, 86 и 56 см) и на трех частотах: 100 кГц, 400 кГц и 2 МГц. К тому же, сочетание поперечной генераторной и наклонных приемных катушек позволяет производить измерения с особенной чувствительностью к анизотропии пластов. Данное измерение выполняется на двух частотах: 100 и 400 кГц. Прибор PeriScope позволяет обнаруживать и прослеживать границы слоев в режиме реального времени на расстоянии до 4.5 м вокруг скважины [Li et al., 2005].

К 2008 году компанией Baker Hughes разработан и введен в эксплуатацию прибор AziTrak (рис. 6), который дает возможность выполнять измерения азимутального ЭМК, традиционного многозондового ЭМК и другие в режиме реального времени [Bell et al., 2006; Meyer et al., 2008; Abhurimen et al., 2012; Podberezheny et al., 2017]. Глубинность прибора составляет примерно 6 м [Meyer et al., 2008].

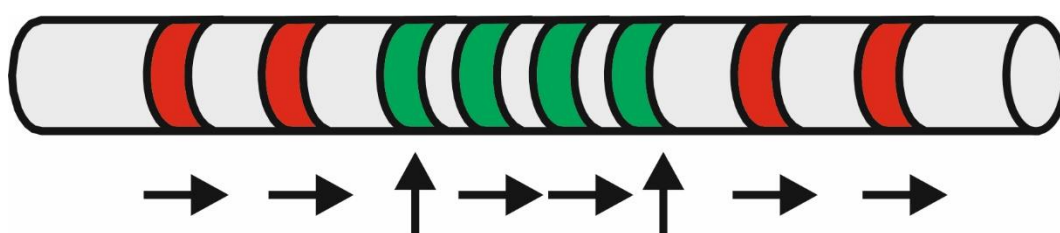


Рис. 6. Схема конфигурации прибора AziTrak, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Данные УЭС получают при различных положениях отклонителя (углах установки отклонителя) по мере вращения буровой колонны. Прибор AziTrak позволяет получать данные из 16 секторов, расположенных равномерно. Таким образом, центральный угол, соответствующий каждому сектору, равен 22.5° , а сумма центральных углов составляет 360° .

Аппаратура трехкомпонентного азимутального ЭМК в процессе бурения GuideWave компании Weatherford разработана в начале 2010-х гг. В ее конструкцию входят генераторные и приемные катушки, ориентированные как параллельно (в направлении z), так и перпендикулярно (в направлении x) ее оси [Shanjun et al., 2014] (рис. 7). Кроме того, катушки прибора располагаются симметрично относительно его центра. Общая длина прибора составляет около 3.9 м, рабочие частоты – 100, 400 и 2 МГц.

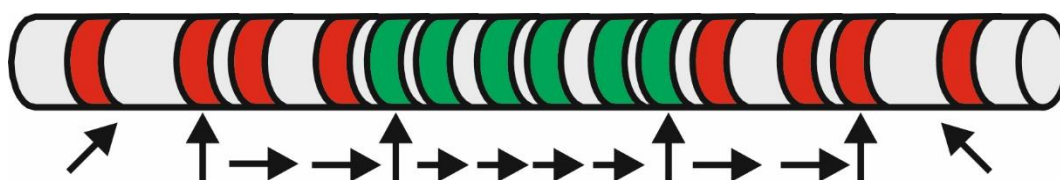


Рис. 7. Схема конфигурации прибора GuideWave, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Соответственно, с использованием этой аппаратуры могут быть получены три типа сигналов: ZZ – стандартные (ненаправленные) измерения УЭС, ZX – азимутальные измерения, XX – измерения с чувствительностью к анизотропии.

Разности фаз и отношения амплитуд (измерения ZZ) получают с помощью z -направленных генераторных катушек: двух генераторных и двух приемных. Эти сигналы устойчивы к влиянию температуры среды.

Сигналы ZX позволяют определить направление и расстояние до границы пласта. Для получения этих измерений применяются поперечные генераторные и соосные приемные катушки. Данные прибора в каждой точке записываются при его вращении вокруг своей оси с полным оборотом.

Для измерений компоненты XX используются генераторные и приемные катушки, ориентированные в направлении x . Как и для сигналов ZX , при этом также требуется полный оборот прибора вокруг оси z . Утверждается, что сигналы XX чувствительны к электрической анизотропии при любом наклоне пластов относительно каротажного прибора [Chen et al., 2016].

Прибор ЭМК в процессе бурения GeoSphere, представленный компанией Schlumberger в 2010-х гг., позволяет производить многокомпонентные направленные измерения за счет использования наклонных катушек. Конфигурация прибора включает в себя четыре отдельных модуля, из которых один – генераторный и три других – приемные (рис. 8). Каждый модуль содержит наклонные катушки [Duru, Denichou, 2015].

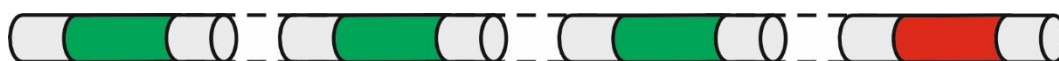


Рис. 8. Схема конфигурации прибора GeoSphere, красным цветом обозначен генераторный модуль, зеленым – приемные модули

Каждый модуль расположен внутри трубы длиной около 4 м и находится в составе КНБК, обеспечивая измерения разности фаз и отношения амплитуд на разных частотах (от нескольких единиц до примерно 100 кГц). Модульность аппаратуры обеспечивает глубинность, составляющую 30 м и более (зависящую от расстояния между источником и приемником, рабочей частоты, которые можно выбирать в соответствии с подходящими ожидаемыми УЭС среды, а также от уровня помех при измерениях, УЭС и геометрии пластов) [Seydoux et al., 2014].

Благодаря вращению аппаратуры в скважине становится доступным измерение девяти компонент электромагнитного поля, которые используются для получения четырех типов измерений разности фаз и отношения амплитуд. Первый тип соответствует симметризованному направленному измерению, которое также было доступно для прибора предыдущего поколения (PeriScope), но характеризовалось меньшей глубинностью. Остальные измерения обеспечивают дополнительную чувствительность к анизотропии пород и кажущемуся углу падения пластов.

Рассчитаны оптимальные диапазоны рабочих частот прибора в зависимости от расстояния между источником и приемником, а также от УЭС модели [Seydoux et al., 2014]. Диапазон низких частот важен при посадке скважины из проводящих глин в целевой пласт с высоким сопротивлением: в этом случае глубинность прибора уменьшается примерно до половины длины зонда из-за относительно низкого соотношения сигнал/шум и уменьшенной толщины скин-слоя. В высокоомной среде рабочие частоты от 50 кГц позволяют проследить границы слоев.

Измерения в полевых условиях показали, что аппаратура GeoSphere позволяет:

- осуществлять посадку скважины в целевой интервал, при этом кровля коллектора прослеживалась на расстоянии 15 м ниже прибора, мощность коллектора была оценена по данным аппаратуры до его вскрытия (бурение в Северном море);
- проводить геонавигацию скважины в верхней части коллектора на расстоянии 10–14 м от водонефтяного контакта (ВНК) и одновременно прослеживать положения кровли коллектора и ВНК (нефтегазоносный бассейн Карнарвон в западной Австралии, месторождение Римфакс в Норвегии);
- обнаруживать блоки разломов для корректировки траектории скважины (бурение в Бразилии).

Компанией Baker Hughes разработан сверхглубинный азимутальный прибор VisiTrak, включающий в себя соосные генераторную и две приемных катушки, а также поперечную генераторную катушку [Alyaeu et al., 2021] (рис. 9).

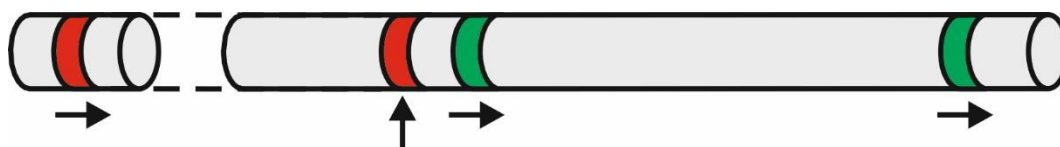


Рис. 9. Схема конфигурации прибора VisiTrak, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Сигналы (реальная и мнимая часть) зонда, состоящего из поперечной генераторной и соосной приемной катушек, обладают азимутальной чувствительностью, а с помощью зонда лишь с соосными катушками возможно получение ненаправленных измерений ЭМК (разности фаз и отношения амплитуд). Кроме того, измерения проводятся на различных рабочих частотах: 20 и 50 кГц.

Глубинность прибора VisiTrak составляет десятки метров, и его данные обеспечивают возможность направленного прослеживания нескольких пластов выше и ниже траектории скважины без непосредственного вскрытия этих слоев [Hartmann et al., 2014]. Удаленное картирование границ по результатам интерпретации данных позволяет оценивать мощность слоя, в котором проходит траектория скважины, и вмещающих пластов, выдержанность коллектора, обнаружить выклинивание пласта или разломы. Проведены полевые испытания прибора с определением геоэлектрической модели среды по результатам инверсии данных из двух стволов скважины.

В конце 2010-х гг. компанией Halliburton представлен прибор трехкомпонентного сверхглубинного азимутального ЭМК EarthStar. Теоретическое моделирование и результаты полевых испытаний показали, что глубинность прибора может составлять более 60 м [Wu et al., 2018] и, подобно разработкам других компаний (в частности, GeoSphere от Schlumberger), зависит от выбранных расстояния между источником и приемником, рабочей частоты, а также свойств геологической среды (в частности, ее удельного сопротивления). Аппаратура позволяет получать направленные измерения геосигнала и удельного сопротивления.

В конфигурацию прибора входят один генераторный модуль и два приемных модуля, каждый из которых расположен внутри трубы (рис. 10).

Генераторный модуль включает в себя две катушки: одну наклонную и одну соосную прибору, каждый приемный модуль – три наклонные катушки, ориентированные под разными азимутальными углами вокруг оси прибора. Расстояние между модулями обеспечивается установкой между ними на КНБК других приборов каротажа в процессе бурения или специально предназначенных труб. Чтобы достичь

глубинности приблизительно 30 м, расстояние от генераторного до ближнего приемного модуля должно составлять примерно 15 м, а до дальнего приемного модуля – 30 м. Рабочие частоты генераторных катушек составляют 1, 2, 4, 8, 16 и 32 кГц.

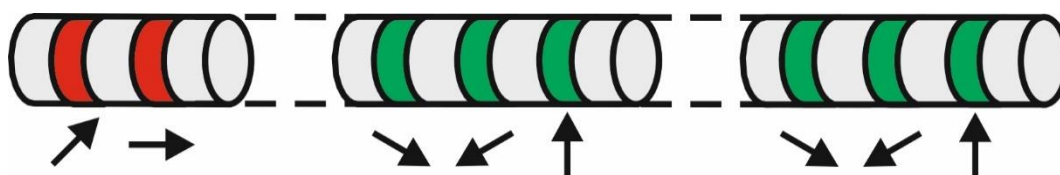


Рис. 10. Схема конфигурации прибора EarthStar, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

В 2019 году компанией Schlumberger представлена аппаратура для опережающей геонавигации IriSphere, позволяющая исследовать породы, находящиеся перед буровым долотом. Направленные электромагнитные измерения, используемые в этой аппаратуре, обеспечивают глубинность до 30 метров впереди долота. Кроме того, прибор предоставляет возможность отличать тонкие пропластки с высоким удельным сопротивлением от целевых коллекторов [Леонтиев, 2020].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

Интерпретационная база отечественной аппаратуры ВИКПБ в задачах каротажа и геонавигации состоит из двух частей. Первая – это численное моделирование сигналов с оценкой их чувствительности к модельным параметрам. Вторая – численная инверсия данных с определением геоэлектрических параметров и оценкой их погрешности [Эпов и др., 2015].

При интерпретации данных ВИКПБ используется трансверсально-изотропная горизонтально-слоистая модель среды с учетом наклона прибора относительно горизонтальных границ пластов. Геоэлектрическая модель описывается вертикальным распределением удельной электропроводности [Эпов и др., 2014].

Численное моделирование включает расчет значений разностей фаз и отношений амплитуд, определяемых в трехкатушечных зондах ВИКПБ. Решение прямой задачи об электромагнитном поле произвольного гармонического источника основано на его представлении в виде суперпозиции нормального и аномального полей и преобразовании Фурье по вертикальной координате, ортогональной плоским границам.

Численная инверсия данных представляет собой минимизацию среднеквадратического отклонения измеренных данных от синтетических путем изменения модельных параметров по заданному алгоритму. Алгоритм численной инверсии основан на методе деформируемых многогранников, особенно эффективным, когда число определяемых параметров не превышает шести. Оценка погрешности определения параметров модели среды выполняется с помощью линейного анализа чувствительности.

Азимутальные приборы ЭМК обычно могут производить два типа измерений: УЭС и геосигналов. Данные разбиваются по секторам (направлениям по азимуту) и могут быть представлены в виде имиджей или отдельных графиков для нужных секторов.

Геосигнал – это средство визуализации, которое позволяет упрощать сложное измерение азимутального прибора с переводом его в простую величину для быстрой оценки [Calleja et al., 2010].

Геосигнал может быть использован для любого азимутального измерения и представляет собой нормированную разность значений измерений вокруг прибора, в основном, для противоположных секторов.

Положительное (либо отрицательное) значение геосигнала указывает на наличие границы УЭС в области чувствительности прибора, тогда как положение сектора, соответствующее этому значению, говорит о направлении приближения границы. Например, для верхнего сектора положительное значение геосигнала указывает на то, что более проводящий пласт находится сверху по отношению к прибору, тогда как отрицательная величина для верхнего сектора означает, что более проводящий пласт располагается внизу. Обычно верхний и нижний секторы рассматриваются для большей части геологических коллекторов, но правый и левый секторы очень важны при бурении в окрестности разломов.

Теоретическое моделирование также показывает, что геосигнал достигает максимума (по модулю), когда прибор находится вблизи границы УЭС и нормали к поперечным катушкам параллельны нормали к границе между пластами. Геосигнал равен нулю, когда нормали к поперечным катушкам параллельны границе между слоями.

Величина геосигнала зависит, в первую очередь, от разности электрической проводимости слоев, отделенных границей. Геосигнал является почти линейной функцией от разности проводимостей [Bell et al., 2006]. Напротив, интерпретация уровня геосигнала в смысле отношения УЭС соседних пластов менее проста, так как значение сигнала проявляет сильную нелинейность при изменении контраста УЭС. Уровень геосигнала зависит не только от контраста УЭС соседних слоев, но также и от величины УЭС горных пород.

Перед бурением может осуществляться генерация моделей УЭС, отвечающих наиболее вероятным геологическим обстановкам. Для интерпретации данных аппаратуры DeerpTrak при бурении, как правило, шесть кривых, соответствующих измерениям с различными глубинностями, передаются с забоя скважины на поверхность в реальном времени. В частности, это две кривые из системы «OnTrak»: разности фаз зонда, работающего на частоте 2 МГц, и отношения амплитуд зонда, работающего на частоте 400 кГц, а также четыре кривые, относящиеся к измерениям прибора DeerpTrak: разности фаз и отношения амплитуд зондов с рабочими частотами 20 и 50 кГц [Helgesen et al., 2005a].

Затем определяется наилучшее соответствие практических данных и одной из набора моделей, сгенерированных до бурения. Таким образом, рассчитывается высота прибора над водонефтяным контактом или расстояние до границ коллектора.

При обработке данных прибора PeriScope используется симметризация измерений («measurement symmetrization»), чтобы рассчитать отклик, чувствительный только к расстояниям до границ, контрастам УЭС и не возмущаемый эффектами анизотропии УЭС, наклона пластов. Это позволяет улучшить интерпретируемость направленных измерений [Li et al., 2005].

Симметризация измерений выполняется посредством наложения направленных измерений двух пар генераторных и приемных катушек, расположенных зеркально по отношению друг к другу. В результате получают сигнал, аналогичный по простоте поведения сигналам в изотропных пластах. Данное измерение чувствительно к кажущемуся углу падения слоев только при малых расстояниях до границ. На достаточно больших расстояниях до границ оно нечувствительно к анизотропии УЭС или углу падения пластов.

При инверсии направленных измерений аппаратуры PeriScope не предполагается наличие априорной информации о залегании пластов: утверждается, что процесс инверсии автоматизирован [Li et

al., 2005]. Инверсия может быть использована в сложных геологических обстановках, когда в области чувствительности прибора присутствуют две границы одновременно (например, сверху и снизу).

Направленные измерения прибора PeriScope позволяют определять анизотропию пластов в вертикальных скважинах при умеренных значениях коэффициента анизотропии (до 2–3), тогда как традиционные приборы в вертикальных скважинах чувствительны только к горизонтальному УЭС. В случае более высокого коэффициента анизотропии возможность его определения для прибора сокращается.

Для оценки потенциальных ограничений направленных измерений важно учитывать влияние внешних факторов. Предварительное моделирование влияния ожидаемых внешних факторов, таких как наличие переходной зоны между пластами, наклон границы в области чувствительности прибора или присутствие трещин в горных породах, помогает оценить, насколько велики такие эффекты в конкретном случае.

Для расчетов расстояния до границы ближайшего пласта и кажущегося угла падения слоев в реальном времени данные измерения УЭС азимутальной направленности могут использоваться совместно с данными гамма-имиджеров (аппаратура AziTrak) [Bell et al., 2006].

При решении прямой задачи для сигналов прибора ЭМК в процессе бурения GuideWave (в том числе в рамках инверсии данных) могут использоваться: одномерная параллельно-слоистая геоэлектрическая модель, трехмерная модель (с применением метода конечных элементов) или комплексный метод изображений (зеркальных отображений). Однако использование при расчетах одномерной параллельно-слоистой модели может быть неоправданно для некоторых случаев, например, когда траектория скважины проходит в среде с двумя непараллельными границами или пересекает плоскость разлома. Метод конечных элементов может применяться для решения прямой задачи в указанных моделях, но обычно это занимает относительно много времени. Поэтому в работе [Chen et al., 2016] предлагается использование комплексного метода изображений, который практически не уступает по точности расчету методу конечных элементов в таких моделях. В рамках комплексного метода изображений граница между пластами с различными удельными сопротивлениями заменяется фиктивным источником, аналогичным реальной генераторной катушке, но зеркально симметричным ей относительно этой границы. При этом полное поле в среде равно суперпозиции полей от реального и фиктивного источников в предположении, что геоэлектрическая граница между пластами отсутствует. Кроме того, расстояние между источником и границей при расчетах изменяется на некоторую комплексную величину, зависящую от УЭС пластов, разделенных этой границей. Недостаток комплексного метода изображений состоит в том, что дальнейшее увеличение количества границ в модели (более двух границ) усложняет использование метода.

Для данных прибора GeoSphere в целом затруднительна предварительная интерпретация по резким скачкам сигналов, свойственным для аппаратуры предыдущего поколения при пересечении прибором границы. Это объясняется чувствительностью сигналов GeoSphere одновременно к нескольким геоэлектрическим границам в силу большой глубинности, что обуславливает необходимость проведения одномерной инверсии, позволяющей определять число пластов слоистой модели, их мощности и УЭС, оценить относительный угол падения слоев и параметры анизотропии, а также направление приближения границы при геонавигации.

При оценке параметров среды применяется вероятностный подход: в результате инверсии рассчитывается набор моделей, соответствующих данным прибора. Такой набор может включать в себя

десятки тысяч различных вариантов моделей [Seydoux et al., 2014]. Кроме того, производится количественная оценка погрешностей параметров моделей и поиск наиболее подходящей модели среды.

Также по данным аппаратуры GeoSphere возможно обнаружение таких структурных форм, как разломы или несогласные залегания, с использованием двумерной инверсии [Dupuis et al., 2013].

Инверсия сигналов прибора VisiTrak основана на решении прямой задачи в рамках одномерной трансверсально-изотропной горизонтально-слоистой модели среды с учетом зенитного угла наклона прибора и угла его поворота вокруг своей оси, а также на последующей минимизации сложной целевой функции, зависящей от параметров нескольких пластов с учетом модели шумов [Hartmann et al., 2014].

Начальные модели для инверсии сигналов аппаратуры многокомпонентного ЭМК в процессе бурения EarthStar создаются на основе каротажных данных, полученных из опорных скважин, расположенных в районе, где планируется бурение эксплуатационной наклонно-горизонтальной скважины. С помощью результатов инверсии данных EarthStar, проводимой в реальном времени, начальная модель уточняется, в том числе положения границ между пластами, что особенно важно для геонавигации. Инверсия может производиться поточно в одномерной слоистой модели с определением горизонтального, вертикального УЭС трансверсально-изотропной среды, зенитного угла наклона пластов и расстояний от прибора до границ слоев [Wu et al., 2018].

Ввиду большой глубинности аппаратуры традиционный подход к инверсии путем лишь минимизации функции невязки методом Гаусса–Ньютона недостаточен из-за существования локальных минимумов и неединственности решения обратной задачи. Поэтому при инверсии используется множество случайных начальных моделей с целью исследования максимального количества локальных и глобальных минимумов. Это позволяет рассматривать модели с различным числом слоев и обеспечивает более высокую вероятность достижения глобальных, а не локальных минимумов. Каждая из указанных случайных моделей является начальной для традиционного алгоритма инверсии. С применением метода Гаусса–Ньютона итеративным образом определяется модель с наименьшей невязкой для каждой случайной модели. Предполагается, что если найдено глобальное решение, то полученная в результате инверсии модель будет независима от выбранной случайной начальной модели, то есть полученные в результате инверсии модели должны быть идентичны между собой, несмотря на то, какими были начальные модели. Такой подход дает возможность рассмотреть широкий набор постинверсионных моделей. Затем менее точные модели удаляются на основании значений невязок между фактическими и расчетными данными, а в качестве итоговых выбираются наилучшие модели с минимальными невязками, которые сшиваются между собой для различных точек измерения по скважине, формируя псевдо-2D-модели.

Однако в более сложных случаях, например, когда траектория скважины под наклоном пересекает плоскости разломов, либо присутствуют латеральные литологические, структурные неоднородности или изменения флюидонасыщения, модели, полученные в результате одномерной инверсии, могут описывать коллектор некорректно с точки зрения дальнейшей геонавигации скважины. Азимутальные измерения УЭС прибора EarthStar, вдобавок к измерениям, используемым при одномерной инверсии, дают возможность выполнения геонавигации в трехмерной среде. Имиджи, построенные по направленным измерениям, позволяют идентифицировать и проследить латеральные изменения удельного сопротивления при приближении к ним траектории скважины.

Для трехмерной инверсии направленных измерений аппаратуры EarthStar требуется разбиение модели на ячейки (дискретизация), в каждой из которых электропроводность считается постоянной.

Ячейки вокруг скважины имеют малый размер и увеличиваются с удалением от нее, что позволяет имитировать чувствительность каротажного прибора. Подобно одномерной инверсии, модель электропроводности рассчитывается посредством минимизации целевой функции. Кроме того, используется функция регуляризации, которая накладывает штраф за резкие изменения параметров в модели. Время, затрачиваемое на процесс трехмерной инверсии, составляет порядка нескольких минут [Clegg et al., 2019]. По ее результатам возможно получение распределения удельного сопротивления вокруг скважины в трехмерной модели, учитывающей латеральные изменения среды.

ВЫВОДЫ

С использованием материалов отечественной и зарубежной литературы рассмотрены важные этапы в эволюции аппаратуры электромагнитного каротажа в процессе бурения. Традиционные приборы, включающие в себя соосные генераторные и приемные катушки, активно разрабатывались примерно с 1980-х до 2000-х гг. В связи с постепенным усложнением строения коллекторов требовалось усовершенствование существовавших методов: увеличение их глубинности и обеспечение возможности проведения направленных измерений для геонавигации скважин. Поэтому начиная с 2000-х гг. ведется разработка аппаратуры электромагнитного каротажа в процессе бурения, позволяющей определять расстояние до приближающейся границы между пластами и, в отличие от приборов лишь с осесимметричными катушками, направление ее приближения.

Приведены примеры приборов, используемых ранее и в настоящее время иностранными нефтесервисными компаниями при бурении нефтяных скважин, а также одной из применяемых в России отечественных разработок. Кратко описаны алгоритмы моделирования и интерпретации данных рассмотренной аппаратуры.

Научно-исследовательские работы выполнены в рамках проекта FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Аксельрод С.М.** Каротаж в процессе бурения (по материалам американских публикаций) // Каротажник. – 2001. – № 85. – С. 103–121.
- Леонтиев Д.С.** «Смотреть» впереди долота // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 3,5 (99.5). – С. 71–73.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В.** Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. – 2014. – № 11 (245). – С. 29–42.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н.** Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика. – 2015. – № 56 (8). – С. 1520–1529, doi: 10.15372/GiG20150809.
- Abhurimen T., Homburg H., Foekema N., Ibrahim C., Ogwumike J., Olare J.** 3D Extended reach drilling in soft sediments with precise wellbore // Nigeria Annual International Conference and Exhibition (August 6–8, 2012). – Lagos, Nigeria. – 2012. – Paper SPE-162942-MS, doi: 10.2118/162942-MS.
- Alyaeв S., Shahriari M., Pardo D., Omella Á.J., Larsen D.S., Jahani N., Suter E.** Modeling extra-deep electromagnetic logs using a deep neural network // Geophysics. – 2021. – Vol. 86 (3). – P. 269–281, doi: 10.1190/geo2020-0389.1.

- Beer R., Dias L.C.T., Cunha A.M.V., Coutinho M.R., Schmitt G. H., Seydoux J., Morriss C., Legendre E., Yang J., Li Q., Silva A.C., Ferraris P., Barbosa E., Guedes A.B.F.** Geosteering and/or reservoir characterization the prowess of new-generation LWD tools // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-93320. – 14 p.
- Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R., Helgesen T., Meyer H., Peveto C., Poppitt A., Randall R., Signorelli J., Wang T.** Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 24–27, 2006). – San Antonio, Texas, USA. – 2006. – Paper SPE-102637-MS, doi: 10.2118/102637-MS.
- Bittar M.S., Rodney P.F., Mack S.G., Bartel R.P.** A multiple depth of investigation electromagnetic wave resistivity sensor: theory, experiment and prototype field test results // SPE Formation Evaluation. – 1993. – Vol. 8 (3). – P. 171–176, doi: 10.2118/22705-PA.
- Bittar M.S., Klein J.D., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J.L., Golla C., Althoff G.D., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.D.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 2009). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2009. – Paper SPE-109971-PA, doi: 10.2118/109971-PA.
- Bonner S.D., Tabanou J.R., Wu P.T., Seydoux J.P., Moriarty K.A., Seal B.K., Kwok E.Y., Kuchenbecker M.W.** New 2-MHz multiarray borehole-compensated resistivity tool developed for MWD in slim holes // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 22–25, 1995). – Dallas, Texas, USA. – 1995. – Paper SPE-30547-MS, doi: 10.2118/30547-MS.
- Calleja B., Market J., Pitcher J., Bilby C.** Multi-Sensor Geosteering // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-82670. – 16 p.
- Chen J., Wang J., Yu Y.** An improved complex image theory for fast resistivity modeling and its application to geosteering // SPE Journal. – 2016. – Vol. 21 (04). – P. 1450–1457.
- Clark B., Lüling M. G., Jundt J., Ross M., Best D.** A dual depth resistivity measurement for formation evaluation while drilling // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio (June 5–8, 1988). – San Antonio, Texas, USA. – 1988. – Paper SPWLA-1988-A. – 25 p.
- Clegg N., Parker T., Djefel B., Monteilhet L., Marchant D.** The final piece of the puzzle: 3-D Inversion of Ultra-Deep Azimuthal Resistivity LWD data // SPWLA 60th Annual Logging Symposium (June 15–19, 2019). – The Woodlands, Texas, USA. – 2019. – Paper SPWLA-2019-HHH. – 10 p.
- Dupuis C., Denichou J.-M.** Automatic inversion of deep-directional-resistivity measurements for well placement and reservoir description // The Leading Edge. – 2015. – Vol. 34 (5). – P. 504–512, doi: 10.1190/tle34050504.1.
- Dupuis C., Omeragic D., Chen Y.-H., Habashy T.** Workflow to image unconformities with deep electromagnetic LWD measurements enables well placement in complex scenarios // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166117-MS, doi: 10.2118/166117-MS.
- Fredericks P.D., Hearn F.P., Wisler M.M.** Formation evaluation while drilling with a dual propagation resistivity tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 8–11, 1989). – San Antonio, Texas, USA. – 1989. – Paper SPE-19622-MS, doi: 10.2118/SPE-19622-MS.
- Gianzero S., Merchant G.A., Haugland M., Strickland R.W.** New developments in 2 MHz electromagnetic wave resistivity measurements // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-MM. – 25 p.

- Gravley W.** Review of downhole measurement-while-drilling systems // *Journal of Petroleum Technology*. – 1983. – Vol. 35 (8). – P. 1439–1445, doi: 10.2118/10036-PA.
- Hartmann A., Vianna A., Maurer H.M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A.; Constable M.V.** Verification testing of a new extra-deep azimuthal resistivity measurement // *SPWLA 55th Annual Logging Symposium* (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-MM. – 12 p.
- Helgesen T.B., Fulda C., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Iversen M., Rønning K.J.** Reservoir navigation with an extra deep resistivity LWD service // *SPWLA 46th Annual Logging Symposium* (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005a. – Paper SPWLA-2005-I. – 13 p.
- Helgesen T.B., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Fulda C., Ronning K.J., Iversen M.** Accurate wellbore placement using a novel extra deep resistivity service // *SPE Europec/EAGE Annual Conference* (June 13–16, 2005). – Madrid, Spain. – 2005b. – Paper SPE-94378-MS, doi: 10.2118/94378-MS.
- Iversen M., Fejerskov M., Skjerdingsstad A.-L., Clark A.J., Denichou J.M., Ortenzi L., Seydoux J., Tabanou J.R.** Geosteering using ultradeep resistivity on the Grane field, Norwegian North Sea // *SPWLA 44th Annual Logging Symposium* (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, USA. – 2003. – Paper SPWLA-2004-v45n3a1. – 13 p.
- Jan Y.-M., Campbell, Jr. R.L.** Borehole correction of MWD gamma ray and resistivity logs // *SPWLA 25th Annual Logging Symposium* (June 10–13, 1984). – New Orleans, Louisiana, USA. – 1984. – Paper SPWLA-1984-PP. – 20 p.
- Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K., Smits J., Yang J., Lau T., Liu C., Dworak R., Dreuillault V., Ye H.** New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // *SPWLA 46th Annual Logging Symposium* (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005. – Paper SPWLA-2005-UU. – 16 p.
- Meyer W.H., Thompson L.W., Wisler M.M., Wu J.-Q.** A New slimhole multiple propagation resistivity tool // *SPWLA 35th Annual Logging Symposium* (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-NN. – 22 p.
- Meyer W.H., Hart E., Jensen K.** Geosteering with a combination of extra deep and azimuthal resistivity tools // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (September 21–24, 2008). – Denver, Colorado, USA. – 2008. – Paper SPE-115675-MS, doi: 10.2118/115675-MS.
- Oberkircher J., Steinberger G., Robbins B.** Applications for a multiple depth of investigation MWD resistivity measurement device // *SPWLA 34th Annual Logging Symposium* (June 13–16, 1993). – Calgary, Alberta, Canada. – 1993. – Paper SPWLA-1993-OO. – 18 p.
- Patton B.J., Gravley W., Godbey J.K., Sexton J.H., Hawk D.E., Slover V.R., Harrell J.W.** Development and successful testing of a continuous-wave, logging-while-drilling telemetry system // *Journal of Petroleum Technology*. – 1977. – Vol. 29 (10). – P. 1215–1221, doi: 10.2118/6157-PA.
- Podbereznyy M., Polushkin S., Makarov A.** Novel approach for evaluation of petrophysical parameters from time-lapse induction logging-while-drilling measurements in deviated and horizontal wells // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (October 16–18, 2017). – Moscow, Russia. – 2017. – Paper SPE-187911-MS, doi: 10.2118/187911-MS.
- Rodney P.F., Wisler M.M.** Electromagnetic wave resistivity MWD tool // *SPE Drilling Engineering*. – 1986. – Vol. 1 (5). – P. 337–346, doi: 10.2118/12167-PA.

- Seydoux J., Legendre E., Mirto E., Dupuis C., Denichou J.M., Bennett N., Kutiev G., Kuchenbecker M., Morriss C., Yang L.** Full 3D deep directional resistivity measurements optimize well placement and provide reservoir-scale imaging while drilling // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-LLLL. – 14 p.
- Shanjun L., Jiefu C., Binford T.L.** Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-EEEE. – 16 p.
- Tanguy D.R., Zoeller W.A.** Applications Of Measurements While Drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 1981). – San Antonio, Texas, USA. – 1981. – Paper SPE-10324-MS, doi: 10.2118/10324-MS.
- Tilsley-Baker R., Antonov Y., Martakov S., Maurer H.-M., Mosin A., Sviridov M., Klein K.S., Iversen M., Barbosa J.E., Carneiro G.** Extra-deep resistivity experience in Brazil geosteering operations // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166309-MS, doi: 10.2118/166309-MS.
- Wisler M.M., Thompson L.W., Larscheid A., Signorelli J.A., Pope M., Wright S.M.** New 3 1/8 inch diameter propagation resistivity tool for MWD; small size but no accuracy compromise // SPWLA 39th Annual Logging Symposium (May 26–28, 1998). – Keystone, Colorado, USA. – 1998. – Paper SPWLA-1998-T. – 13 p.
- Wu H.-H., Golla C., Parker T., Clegg N., Monteilhet L.** A new ultra-deep azimuthal electromagnetic LWD sensor for reservoir insight // SPWLA 59th Annual Logging Symposium (June 2–6, 2018). – London, UK. – 2018. – Paper SPWLA-2018-X. – 14 p.
- Zhang Z., Gonguet C., Rajani V., Roeterdink R.** Directional LWD resistivity tools and their business impacts // SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). – Austin, Texas, USA. – 2008. – Paper SPWLA-2008-FFFF. – 16 p.

REFERENCES

- Abhurimen T., Homburg H., Foekema N., Ibrahim C., Ogwumike J., Olare J.** 3D extended reach drilling in soft sediments with precise wellbore // Nigeria Annual International Conference and Exhibition (August 6–8, 2012). – Lagos, Nigeria. – 2012. – Paper SPE-162942-MS, doi: 10.2118/162942-MS.
- Akselrod S.M.** Logging while drilling (synopsis of published evidence from the USA) // *Karotazhnik*. – 2001. – Vol. 85. – P. 103–121.
- Alyae S., Shahriari M., Pardo D., Omella Á.J., Larsen D.S., Jahani N., Suter E.** Modeling extra-deep electromagnetic logs using a deep neural network // *Geophysics*. – 2021. – Vol. 86 (3). – P. 269–281, doi: 10.1190/geo2020-0389.1.
- Beer R., Dias L.C.T., Cunha A.M.V., Coutinho M.R., Schmitt G. H., Seydoux J., Morriss C., Legendre E., Yang J., Li Q., Silva A.C., Ferraris P., Barbosa E., Guedes A.B.F.** Geosteering and/or reservoir characterization the prowess of new-generation LWD tools // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-93320. – 14 p.
- Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R., Helgesen T., Meyer H., Peveto C., Poppitt A., Randall R., Signorelli J., Wang T.** Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 24–27, 2006). – San Antonio, Texas, USA. – 2006. – Paper SPE-102637-MS, doi: 10.2118/102637-MS.

- Bittar M.S., Rodney P.F., Mack S.G., Bartel R.P.** A multiple depth of investigation electromagnetic wave resistivity sensor: theory, experiment and prototype field test results // SPE Formation Evaluation. – 1993. – Vol. 8 (3). – P. 171–176, doi: 10.2118/22705-PA.
- Bittar M.S., Klein J.D., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J.L., Golla C., Althoff G.D., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.D.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 2009). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2009. – Paper SPE-109971-PA, doi: 10.2118/109971-PA.
- Bonner S.D., Tabanou J.R., Wu P.T., Seydoux J.P., Moriarty K.A., Seal B.K., Kwok E.Y., Kuchenbecker M.W.** New 2-MHz multiarray borehole-compensated resistivity tool developed for MWD in slim holes // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 22–25, 1995). – Dallas, Texas, USA. – 1995. – Paper SPE-30547-MS, doi: 10.2118/30547-MS.
- Calleja B., Market J., Pitcher J., Bilby C.** Multi-Sensor Geosteering // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-82670. – 16 p.
- Chen J., Wang J., Yu Y.** An improved complex image theory for fast resistivity modeling and its application to geosteering // SPE Journal. – 2016. – Vol. 21 (04). – P. 1450–1457.
- Clark B., Lüling M. G., Jundt J., Ross M., Best D.** A dual depth resistivity measurement for formation evaluation while drilling // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio (June 5–8, 1988). – San Antonio, Texas, USA. – 1988. – Paper SPWLA-1988-A. – 25 p.
- Clegg N., Parker T., Djefel B., Monteilhet L., Marchant D.** The final piece of the puzzle: 3-D Inversion of Ultra-Deep Azimuthal Resistivity LWD data // SPWLA 60th Annual Logging Symposium (June 15–19, 2019). – The Woodlands, Texas, USA. – 2019. – Paper SPWLA-2019-HHH. – 10 p.
- Dupuis C., Denichou J.-M.** Automatic inversion of deep-directional-resistivity measurements for well placement and reservoir description // The Leading Edge. – 2015. – Vol. 34 (5). – P. 504–512, doi: 10.1190/tle34050504.1.
- Dupuis C., Omeragic D., Chen Y.-H., Habashy T.** Workflow to image unconformities with deep electromagnetic LWD measurements enables well placement in complex scenarios // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166117-MS, doi: 10.2118/166117-MS.
- Epov M.I., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N., Eremin V.N.** Forward modeling and inversion of LWD induction data // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – Vol. 56 (8). – P. 1194–1200, doi: 10.1016/j.rgg.2015.07.009.
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V.** Numerical simulation and analysis of electromagnetic log responses while drilling // Karotazhnik. – 2014. – Vol. 11 (245). – P. 29–42.
- Fredericks P.D., Hearn F.P., Wisler M.M.** Formation evaluation while drilling with a dual propagation resistivity tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 8–11, 1989). – San Antonio, Texas, USA. – 1989. – Paper SPE-19622-MS, doi: 10.2118/SPE-19622-MS.
- Gianzero S., Merchant G.A., Haugland M., Strickland R.W.** New developments in 2 MHz electromagnetic wave resistivity measurements // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-MM. – 25 p.
- Gravley W.** Review of downhole measurement-while-drilling systems // Journal of Petroleum Technology. – 1983. – Vol. 35 (8). – P. 1439–1445, doi: 10.2118/10036-PA.
- Hartmann A., Vianna A., Maurer H.M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A.; Constable M.V.** Verification testing of a new extra-deep azimuthal resistivity measurement // SPWLA 55th

Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-MM. – 12 p.

Helgesen T.B., Fulda C., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Iversen M., Rønning K.J. Reservoir navigation with an extra deep resistivity LWD service // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005a. – Paper SPWLA-2005-I. – 13 p.

Helgesen T.B., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Fulda C., Ronning K.J., Iversen M. Accurate wellbore placement using a novel extra deep resistivity service // SPE Europec/EAGE Annual Conference (June 13–16, 2005). – Madrid, Spain. – 2005b. – Paper SPE-94378-MS, doi: 10.2118/94378-MS.

Iversen M., Fejerskov M., Skjerdingsstad A.-L., Clark A.J., Denichou J.M., Ortenzi L., Seydoux J., Tabanou J.R. Geosteering using ultradeep resistivity on the Grane field, Norwegian North Sea // SPWLA 44th Annual Logging Symposium (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, USA. – 2003. – Paper SPWLA-2004-v45n3a1. – 13 p.

Jan Y.-M., Campbell, Jr. R.L. Borehole correction of MWD gamma ray and resistivity logs // SPWLA 25th Annual Logging Symposium (June 10–13, 1984). – New Orleans, Louisiana, USA. – 1984. – Paper SPWLA-1984-PP. – 20 p.

Leontiev D.S. “Look” ahead of the bit // *Neftegaz. RU.* – 2020. – No. 3,5 (99.5). – P. 71–73.

Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K., Smits J., Yang J., Lau T., Liu C., Dworak R., Dreuillault V., Ye H. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005. – Paper SPWLA-2005-UU. – 16 p.

Meyer W.H., Thompson L.W., Wisler M.M., Wu J.-Q. A New slimhole multiple propagation resistivity tool // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-NN. – 22 p.

Meyer W.H., Hart E., Jensen K. Geosteering with a combination of extra deep and azimuthal resistivity tools // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). – Denver, Colorado, USA. – 2008. – Paper SPE-115675-MS, doi: 10.2118/115675-MS.

Oberkircher J., Steinberger G., Robbins B. Applications for a multiple depth of investigation MWD resistivity measurement device // SPWLA 34th Annual Logging Symposium (June 13–16, 1993). – Calgary, Alberta, Canada. – 1993. – Paper SPWLA-1993-OO. – 18 p.

Patton B.J., Gravley W., Godbey J.K., Sexton J.H., Hawk D.E., Slover V.R., Harrell J.W. Development and successful testing of a continuous-wave, logging-while-drilling telemetry system // *Journal of Petroleum Technology.* – 1977. – Vol. 29 (10). – P. 1215–1221, doi: 10.2118/6157-PA.

Podbereznyy M., Polushkin S., Makarov A. Novel approach for evaluation of petrophysical parameters from time-lapse induction logging-while-drilling measurements in deviated and horizontal wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 16–18, 2017). – Moscow, Russia. – 2017. – Paper SPE-187911-MS, doi: 10.2118/187911-MS.

Rodney P.F., Wisler M.M. Electromagnetic wave resistivity MWD tool // *SPE Drilling Engineering.* –1986. – Vol. 1 (5). – P. 337–346, doi: 10.2118/12167-PA.

Seydoux J., Legendre E., Mirto E., Dupuis C., Denichou J.M., Bennett N., Kutiev G., Kuchenbecker M., Morriss C., Yang L. Full 3D deep directional resistivity measurements optimize well placement and provide reservoir-scale imaging while drilling // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-LLLL. – 14 p.

Shanjun L., Jiefu C., Binford T.L. Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-EEEE. – 16 p.

Tanguy D.R., Zoeller W.A. Applications Of Measurements While Drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 1981). – San Antonio, Texas, USA. – 1981. – Paper SPE-10324-MS, doi: 10.2118/10324-MS.

Tilsley-Baker R., Antonov Y., Martakov S., Maurer H.-M., Mosin A., Sviridov M., Klein K.S., Iversen M., Barbosa J.E., Carneiro G. Extra-deep resistivity experience in Brazil geosteering operations // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166309-MS, doi: 10.2118/166309-MS.

Wisler M.M., Thompson L.W., Larscheid A., Signorelli J.A., Pope M., Wright S.M. New 3 1/8 inch diameter propagation resistivity tool for MWD; small size but no accuracy compromise // SPWLA 39th Annual Logging Symposium (May 26–28, 1998). – Keystone, Colorado, USA. – 1998. – Paper SPWLA-1998-T. – 13 p.

Wu H.-H., Golla C., Parker T., Clegg N., Monteilhet L. A new ultra-deep azimuthal electromagnetic LWD sensor for reservoir insight // SPWLA 59th Annual Logging Symposium (June 2–6, 2018). – London, UK. – 2018. – Paper SPWLA-2018-X. – 14 p.

Zhang Z., Gonguet C., Rajani V., Roeterdink R. Directional LWD resistivity tools and their business impacts // SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). – Austin, Texas, USA. – 2008. – Paper SPWLA-2008-FFFF. – 16 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДАНИЛОВСКИЙ Кирилл Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геофизические методы исследований в скважинах, каротаж в процессе бурения, обработка и интерпретация данных ГИС, моделирование и инверсия данных электрокаротажа, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

МОСКАЕВ Илья Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: численное моделирование сигналов электромагнитного и электрического каротажа.



ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОГЕННЫХ Тел (СКЛАДИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ). ОБЗОР

В.В. Оленченко¹, С.Б. Бортникова¹, А.Ю. Девятова^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru*

Рассмотрен мировой опыт использования методов электроразведки при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности), в частности, определение зональности хвостохранилищ, путей миграции дренажных потоков, уровня подземных вод, устойчивости дамб. Проводимые исследования демонстрируют высокую эффективность комплексирования методов геофизики, геохимии, гидрологии. На примере отвалов горнорудного производства, расположенных на территории Кемеровской области и Республики Тыва, показаны достижения междисциплинарного коллектива ИНГГ СО РАН. Применение электротомографии и магниторазведки в сочетании с геохимическим картированием и газовой съемкой позволило выявить внутреннее строение хвостохранилищ и отвалов, оконтурить обводненные горизонты, определить транспорт высокоминерализованных растворов в подземные воды. Полученные результаты стали основой для создания методологии комплексного исследования хвостохранилищ и отвалов, оценки опасности техногенных тел, разработки методов минимизации их влияния на окружающую среду и население поселков.

Малоглубинная электроразведка, отходы горнорудной промышленности, пути миграции, зональность, устойчивость сооружений

APPLICATION OF ELECTRICAL PROSPECTING METHODS FOR TECHNOGENIC BODIES (STORED WASTES OF THE MINING INDUSTRY) STUDIES: REVIEW

V.V. Olenchenko¹, S.B. Bortnikova¹, A.Yu. Devyatova^{1,2}

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: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru*

The world experience of using electrical exploration methods in the study of technogenic bodies is considered, in particular: determining the zoning of tailings, groundwater migration routes and the stability of dams. The ongoing research demonstrates the high efficiency of combining the methods of geophysics, geochemistry, and hydrology. On the example of mining dumps located on the territory of the Kemerovo region and the Republic of Tyva, the achievements of the interdisciplinary team of the IPGG SB RAS are shown. The use of electrical resistivity tomography and magnetic prospecting in combination with geochemical mapping and gas survey made it possible to reveal the internal structure of tailings and dumps, outline watered horizons, and determine the transport of highly mineralized solutions to groundwater. Obtained results became the basis for creating a methodology for a comprehensive study of tailings and dumps, assessing the danger of technogenic bodies, and developing methods for minimizing their impact on the environment and the population of settlements.

Electrical resistivity tomography, mining waste, migration routes, zoning, stability of structures

ВВЕДЕНИЕ

Отходы горнорудных производств складываются в виде отвалов, хвостохранилищ, прудов-отстойников, как правило, недалеко от добывающих и обогащательных предприятий, в черте населенных пунктов. Происходящие со временем процессы трансформации вещества отходов, особенно, сульфидных минералов, приводят к появлению потоков кислого дренажа, инфильтрации жидкой фазы в подстилающие горизонты, нарушению ограждающих дамб и других опасных явлений. Металлы, металлоиды, сульфаты, переходящие в растворы при окислении вещества, могут мигрировать на прилегающие и удаленные территории, что вызывает серьезный риск загрязнения окружающей среды. Задачу выявления путей миграции химических элементов в различных компонентах среды решают с помощью геохимических и гидрогеохимических методов, а применение электроразведки существенно повышает эффективность исследований.

Возможность изучения геологической среды методами электроразведки основана на зависимости электромагнитных свойств геологической среды от влажности, температуры, литологического и минерального состава, минерализации поровой влаги [Манштейн, 2018].

Для оценки изменений окружающей среды во времени при изучении техногенных объектов лучше всего подходят методы малоглубинной электроразведки, такие как электротомография, георадиолокация, частотное электромагнитное зондирование. В последние годы развивается метод спектральной вызванной поляризации (СВП), который на основе анализа временных или частотных характеристик ВП даёт дополнительную информацию о свойствах геологической среды [Placencia-Gómez et al., 2015].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Методы сопротивлений часто используются для определения объемов старых/заброшенных хвостохранилищ [Martín-Crespo et al., 2018, 2020; Martin et al., 2020], а также для представления их внутренней структуры и неоднородности [Martinez-Pagan et al., 2021; Mollehuara-Canales et al., 2021]. Крупнообломочные пустые породы обладают более высоким сопротивлением, чем уплотненные слои мелких фракций частиц [Poisson et al., 2009; Anterrieu et al., 2010], что дает возможность лучшего понимания гидрогеохимической зональности отвалов [Raymond et al., 2021]. При этом содержимое хвостохранилища обычно обладает большей электрической проводимостью, чем окружающая среда, что позволяет правильно отобразить границу раздела коренных пород и дамб, используемых для хранения отходов [Booterbaugh et al., 2015; Gabarrón et al., 2020]. Gabarrón с коллегами использовали электроразведку для разграничения грубых и мелкодисперсных хвостов по контрасту их удельного сопротивления. Ряд авторов занимались составлением карт потенциально реакционноспособных отходов [Martínez et al., 2012, 2016; Dimech et al., 2017; Power et al., 2018] и даже количественным прогнозом содержания растворенных твердых веществ [Rucker et al., 2009].

Испанские ученые [Rey et al., 2021] для исследования хвостохранилищ успешно сочетают методы электротомографии и метода вызванной поляризации. Таким образом были выявлены высокосульфатные и карбонатные растворы в нижней части хвостохранилища Адаро, Южная Испания, что подтвердил химический анализ вод, отобранных в зоне насыщения.

Сообщалось о применении метода электротомографии (ЭТ) для оценки остаточной минерализации для вторичного извлечения полезных компонентов [Günther, Martin, 2016]. Авторы использовали ЭТ и спектральную вызванную поляризацию для картирования обводненных

высокоминерализованных линз в теле отвала для оценки возможности повторной переработки отходов в будущем [Günther, Martin 2016]. Методы электроразведки применяются для реконструкции пространственного распределения отходов горнодобывающей промышленности в больших масштабах и оценки остаточной минерализации растворов в отвалах [Qi et al., 2018; Martin et al., 2020] и хвостохранилищах [Saladich et al., 2016; Martínez-Segura et al., 2020]. В большинстве случаев определяется порог удельного электрического сопротивления (УЭС) для картирования зон, содержащих минерализованные растворы в складированных отходах, которые, как правило, обладают большей проводимостью [Saladich et al., 2016; Martin et al., 2020]. Эффективно применялся метод ВЭЗ в комплексе с аэрофотограмметрией или лидарной топографией поверхности для восстановления объема отходов [Markovaara-Koivisto et al., 2018; Martín-Crespo et al., 2018]. Эти результаты представляют большой интерес для развития экономики замкнутого цикла, поскольку знания о пространственном распределении водонасыщенных горизонтов и уровня минерализации поровых растворов необходимы при оценке ограничений при разработке техногенных тел в качестве вторичного сырья [Kinnunen, Kaksonen, 2019].

ВЫЯВЛЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПУТЕЙ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Особую опасность представляют кислые дренажные растворы (в англоязычной литературе широко используемый термин – acid mine drainage, AMD), которые образуются за счет перехода химических элементов при окислении и растворении сульфидной составляющей. Для выявления путей миграции дренажных растворов и мониторинга их распространения в окружающей среде электроразведку используют с 1990-х годов [Ebraheem et al., 1990; King, McNeill, 1994; Benson, Addams, 1998; Buselli, Lu, 2001]. AMD генетически связан с поровыми растворами хранилищ, содержащими высокие концентрации ионов металлов [Blowes et al., 2014; Cravotta III, 2008], что увеличивает электропроводность поровых вод на несколько порядков [Monterroso, Macías, 1998]. Пути транспорта AMD отчетливо визуализируется на геоэлектрических разрезах и картах, и электротомография является надежным инструментом при мониторинге распространения потоков [Buselli, Lu, 2001; Johnston et al., 2017], позволяя обнаруживать и разграничивать области генерации высокоминерализованного дренажа в пределах техногенных тел [Tycholiz et al., 2016; Shokri et al., 2023]. Результаты электроразведки на хвостохранилищах используются для составления схем геохимического опробования и картирования [Martínez-Pagán et al., 2009; Pierwoła et al., 2020] разработки рекультивационных мероприятий (например, при консервации техногенных тел) для минимизации воздействия отходов на окружающую среду [Martínez-Pagán et al., 2009; Hudson et al., 2018]. Метод ЭТ успешно использовался для отслеживания миграции AMD в отвалах [Shokri et al., 2016; Hudson et al., 2018; Casagrande et al., 2020], для выявления механизмов транспорта загрязняющих веществ из хранилищ в окружающую среду [Bethune et al., 2015; Casagrande et al., 2016; do Nascimento et al., 2022], обнаружения ослабленных трещиноватых зон в коренных подстилающих породах [Benyassine et al., 2017], оценки масштабов эолового переноса вещества [Lachhab et al., 2020], определения утечек [Cortada et al., 2017; Rey et al., 2021].

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБ

О применении метода ЭТ для оценки геотехнической устойчивости плотин и дамб сообщалось с 2005 года в раннем исследовании Sjö Dahl et al. [2005]. С тех пор ЭТ использовалась при обнаружения аномальной фильтрации и внутренней эрозии в пределах дамб [Sjö Dahl et al., 2005; Li et al., 2015; Mainali

et al., 2015; Coulibaly et al., 2017; Paria et al., 2020], для определения уровня грунтовых вод при угрозе риска перелива воды и разработке мероприятий для его снижения [Booterbaugh et al., 2015; Mainali et al., 2015]. Такие приложения имеют большой потенциал для мониторинга геотехнической устойчивости полигонов твердых бытовых отходов (ТБО), поскольку просачивание, эрозия плотин и затопление были причиной почти 60 % закрытий полигонов ТБО во всем мире с 1910 года [Lyu et al., 2019]. В ряде исследований объединены электротомография и геотехническое моделирование для изучения стабильности хвостохранилищ [Li et al., 2015; Coulibaly et al., 2017; Paria et al., 2020], как это уже было сделано для мониторинга оползней [Lehmann et al., 2013; Zieher et al., 2017] или мониторинга дамб [Weller et al., 2014; Dezert et al., 2019]. Разномасштабный мониторинг состояния дамбы хвостохранилища Enemossen (Швеция) позволил уверенно оконтурить места протечек через дамбу и существенно уменьшить неоднозначность в интерпретации данных ЭТ [Sjödahl et al., 2005]. В соответствии с недавними разработками метода таймлапс (time-lapse) в электроразведке, мониторинг оползней возможно проводить в режиме реального времени, что важно для разработки систем раннего предупреждения опасности [Kłosowski et al., 2018; Whiteley et al., 2019]. Как обсуждалось Tresoldi et al. [2020], ожидается, что применение таймлапс в электроразведке будет становиться все более востребованным, учитывая новые знания об активных процессах в техногенных телах, возникающих экологических рисках и разработок методов их предупреждения.

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНГГ СО РАН

В ИНГГ СО РАН на протяжении более 10 лет широко проводятся комплексные исследования техногенных тел с применением геохимических и геофизических методов. Исследованы хвостохранилища и отвалы в Западной Сибири, Забайкалье и Республике Тыва. Комплексирование методов геохимического картирования, электро- и магниторазведки позволило получить информацию о внутреннем строении техногенных тел, структуре подповерхностного пространства дренажных систем, найти взаимосвязи состава твердого вещества и межпоровых флюидов, а также описать процессы трансформации техногенных тел.

Определение внутреннего строения отвалов и хвостохранилищ

На территории бывшего Беловского цинкового завода (г. Белово, Кемеровская обл.) было проведено определение геоэлектрической зональности болота-отстойника, выявившего проникание высокоминерализованных растворов на глубину более 10 м, в горизонт грунтовых и подземных вод [Bortnikova et al., 2011]. При этом показано, что высокие концентрации металлов в воде отстойника приводят к мутационным изменениям зоопланктона. На отвале клинкеров, поставляющем растворы в болото-отстойник, обнаружены очаги горения во внутренних его частях, определен элементный состав газовых потоков и в лабораторных экспериментах показано, что наиболее высокие концентрации элементов в газах при нагревании отделяются от образцов клинкера с обильными вторичными сульфатами [Bortnikova et al., 2017].

На хвостохранилище Талмовские Пески, расположенном в русле р. Малая Талмовая (г. Салаир, Кемеровская обл.), проведено изучение распределения металлов (их общих содержаний, водорастворимых форм, растворенных в поровых водах) по вертикали [Bortnikova et al., 2015]. На основе геоэлектрической зональности разреза и протяженности высокопроводящих зон на глубину сделан вывод о распространении загрязнения подземных вод до гл. 10 м и прогноз изменения геохимических

характеристик вещества до гл. 7 м. Более поздними работами на этом хвостохранилище установлены гидрохимические и газовые аномалии, а также показано корреляция геофизических и геохимических параметров вещества путем построения профилей микроэлектротомографии по линиям шурфов [Бортникова и др., 2021].

На Комсомольском хвостохранилище (пос. Комсомольск, Кемеровская обл.) проведен сбор проб и их анализ: твердого вещества, воды гидроотвала, водоемов на перемещенных Бериккульских кеках, дренажных ручьев, питьевой воды. Одновременно проводилось исследование внутренней структуры техногенного тела, геометризация обводненных участков, определение путей миграции подземных вод [Bortnikova et al., 2017; Yurkevich et al., 2017]. Выявлено, что несмотря на устойчивость ограждающей дамбы, под ней по природному разлому идет транспорт кислых высокоминерализованных растворов в горизонты подземных питьевых вод. Превышение концентраций мышьяка было обнаружено в питьевой воде из колонки в пос. Комсомольский, расположенной невдалеке от разлома.

На Урском отвале отходов цианирования зоны окисления Ново-Урского месторождения (сформирован в 30–40-е годы прошлого века, пос. Урск, Кемеровская обл.) определен состав дренажных потоков с чрезвычайно высокими концентрациями многих токсичных элементов, формы их нахождения и миграции. Путем построения геоэлектрических разрезов вкост дренажной системы показано, что вертикальное распространение дренажных растворов идет по двум направлениям: поверхностный сток по уклону долины и проникание дренажа по ослабленным зонам тектонического нарушения на глубину более 20 м [Оленченко и др., 2016]. На отвале и прилегающей территории были обнаружены и окарстованы аномалии газов: диметилсульфида C_2H_6S , диметилсульфоксида C_2H_6SO , сероуглерода CS_2 , диоксида серы SO_2 , свидетельствующие о том, что техногенные тела являются постоянным источником серосодержащих газов в приземном слое атмосферы. При этом была обнаружена связь между внутренней зональностью техногенного тела и интенсивностью газообразования: в высокопроводящих зонах оно заметно возрастало по сравнению с соседними участками с низкой проводимостью [Yurkevich et al., 2019]. На 3D модели было показано и обосновано формирование трех основных зон: окисления, выщелачивания и разбавления/осаждения, обусловленных наличием геохимических барьеров и идентифицированных с помощью электро- и магниторазведочных методов [Yurkevich et al., 2022]. На примере вещества Урского отвала лабораторными экспериментами была оценена скорость фронта жидкости (дренажного раствора), составляющая 140 мм/сут. Показано, что капиллярные силы вносят основной вклад в распространение растворов [Кучер и др., 2019].

На Хову-Аксинских картах, вмещающих отходы гидрометаллургического обогащения $Cu-Co-Ni$ арсенидных руд оценены общие концентрации металлов и металлоидов, их подвижных форм (водорастворимых и летучих), определены закономерности изменения их концентраций за 20-летний период хранения [Bortnikova et al., 2021]. Минералогическим изучением тяжелой фракции отходов показано, что вторичные каймы на остаточных арсенидах существенно снижают подвижность металлов, но концентрации водорастворимых формы As и Sb остаются по-прежнему высокими. На профилях электротомографии обнаружено распространение высокопроводящих зон за границы защитного слоя хранилища, что означает миграцию поровых растворов в подземные горизонты.

Динамика внутренней зональности техногенных тел

Особого внимания заслуживают исследования изменения электрических свойств вещества отвалов и интенсивности газовых эманацій в зависимости от внешних метеорологических условий (time-

lapse study). На участке Белоключевского отвала на профиле микроэлектротомографии были проведены ежечасные измерения УЭС в течение суток с одновременным замером температуры грунта и последующим лабораторным моделированием зависимости вариаций УЭС от гранулометрии вещества [Olenchenko et al., 2020]. Определено, что наибольшие колебания УЭС в течение суток происходят на участках профиля, сложенных окисленным веществом отходов полидисперсного состава. На хвостохранилище Салагаевский лог установлено, что изменение температуры воздуха через 2–3 часа ведет к изменению температуры грунта и, соответственно, УЭС верхних горизонтов. Наибольшая разница УЭС расположена в зонах с низкой электропроводностью и высокой влажностью. Внешние проявления динамики параметров вещества заключаются в меняющейся газогенерации (CO , SO_2 , $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$, H_2S) в течение суток, прямо зависящей от температуры грунта и имеющей прямую корреляцию со значениями УЭС [Yurkevich et al., 2021].

Генезис жидкости, выносимой из газовых скважин

При исследовании жидкостей, выносимых из газовых скважин, установлено, что гидрохимический состав отражает доленое соотношение пластовых, техногенных и конденсационных вод. При этом диэлектрические и радиоизлучательные параметры жидкости изменяются в зависимости от долевого соотношения разных типов вод [Эпов и др., 2017]. Предложены способы диагностики типов воды по их диэлектрическим параметрам в лабораторных условиях. В продолжение этих исследований был выполнен гидрохимический анализ и ЯМР-релаксометрия проб жидкостей из скважин на Юбилейном, Ямсовейском и Медвежьем месторождениях ЯНАО [Шумскайте и др., 2017]. Экспериментально подтверждено, что время релаксации существенно зависит от концентрации парамагнитных ионов металлов, что составляет основу для оперативной типизации по ЯМР-данным жидкости и позволяет однозначно выделять техногенную воду.

ВЫВОДЫ

Применение методов электроразведки и современных технических и программных средств является эффективным и оперативным инструментом для анализа состояния складированных отходов и техногенных сооружений. Предложенный и опробованный в ИНГГ СО РАН подход к изучению отвалов хвостов обогащения основан на мировом опыте применения методов малоглубинной электроразведки, а в некоторых аспектах методы ЭТ на техногенных телах позволили получить новые, необсуждавшиеся ранее результаты.

В результате применения такого подхода на ряде объектов Кемеровской области было выявлено внутреннее строение отвалов и хвостохранилищ, обнаружена миграция минерализованного дренажа в подземные воды и горизонты питьевого водоснабжения, количественно описано изменение геоэлектрических параметров техногенных тел в зависимости от внешних условий.

Перспективами дальнейшего развития данного направления в России является внедрение технологии спектральной вызванной поляризации для изучения вещества отвалов. Частотные или временные зависимости параметров вызванной поляризации позволят вывести геофизические исследования в этой области на новый уровень.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовых проектов ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0028 и FWZZ-2022-0024.

ЛИТЕРАТУРА

- Бортникова С.Б., Юркевич Н.В., Еделев А.В., Саева О.П., Грахова С.П., Карин Ю.Г.** Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – № 332 (2). – С. 26–35, doi: 10.18799/24131830/2021/2/3040.
- Кучер Д.О., Корнеева Т.В., Бортникова С.Б.** Лабораторное моделирование фильтрации поровых флюидов в образцах техногенного вещества хвостохранилищ // Физико-технические проблемы переработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 26–32, doi: 10.15372/FTPRPI20190504.
- Манштейн А.К.** Электроразведка: Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под редакцией проф. И.Н. Модина и доц. А.Г. Яковлева. Том I. – Тверь: ПолиПРЕСС, 2018. – 276 с.
- Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П.** Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика. – 2016. – № 57 (4). – С. 782–795, doi: 10.15372/GiG20160410.
- Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Бортникова С.Б., Харитонов А.Н., Пермьяков В.С.** Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – № 328 (2). – С. 59–66.
- Эпов М.И., Меньшиков С.Н., Харитонов А.Н., Романов А.Н., Пермьяков В.С., Бортникова С.Б., Юркевич Н.В.** Диэлектрические и радиоизлучательные характеристики пластовых и конденсационных вод газоносных скважин // Геология и геофизика. – 2017. – № 58 (7). – С. 1047–1056, doi: 10.15372/GiG20170707.
- Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M.** Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2010. – Vol. 69 (4). – P. 533–548, doi: 10.1007/s10064-010-0264-4.
- Benson A.K., Addams C.L.** Detecting the presence of acid mine drainage using hydrogeological, geochemical, and geophysical data; applications to contrasting conditions at mine sites in Little Cottonwood and American Fork canyons, Utah // Environmental Geosciences. – 1998. – Vol. 5 (1). – P. 17–27.
- Benyassine E.M., Lachhab A., Dekayir A., Parisot J.C., Rouai M.** An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – Vol. 22 (4). – P. 315–324, doi: 10.2113/JEEG22.4.315.
- Bethune J., Randell J., Runkel R.L., Singha K.** Non-invasive flow path characterization in a mining-impacted wetland // Journal of Contaminant Hydrology. – 2015. – Vol. 183. – P. 29–39, doi: 10.1016/j.jconhyd.2015.10.002.
- Blowes D., Ptacek C., Jambor J., Weisener C.G., Pectunc D., Gould W.D., Johnson D.B.** The geochemistry of acid mine drainage // Treatise on Geochemistry. – 2014. – Vol. 11. – P. 131–190, doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.
- Booterbaugh A.P., Bentley L.R., Mendoza C.A.** Geophysical characterization of an undrained dyke containing an oil sands tailings pond, Alberta, Canada // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2015. – Vol. 20 (4). – P. 303–317, doi: 10.2113/JEEG20.4.303.

- Bortnikova S., Manstein Yu., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A.** Acid mine drainage migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): Multidisciplinary study // *Water Security in the Mediterranean Region. An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches* / Eds. A. Scozzari, B. Mansouri. – Springer, Netherlands, 2011. – P. 191 – 208, doi: 10.1007/978-94-007-1623-0_14.
- Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O.** The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas // *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control. Handbook of Environmental Chemistry*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – Vol. 40. – P. 239–256.
- Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Gaskova O.L., Chernii K.I., Devyatova A.Yu., Kucher D.O.** Evidence of trace element emission during the combustion of sulfide-bearing metallurgical slags // *Applied Geochemistry*. – 2017. – Vol. 78. – P. 105–115, doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.016.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.Sh., Gora M.P., Khvachchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V.** Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586 (30). – 120623, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120623.
- Buselli G., Lu K.** Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 48 (1). – P. 11–23, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00055-6.
- Casagrande M.F.S., Moreira C.A., Targa D.A.** Study of generation and underground flow of acid mine drainage in waste rock pile in an uranium mine using electrical resistivity tomography // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (2). – P. 703–721, doi: 10.1007/s00024-019-02351-9.
- Cortada U., Martínez J., Rey J., Hidalgo M.C., Sandoval S.** Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydrochemical techniques // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 223. – P. 59–70, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.04.024.
- Coulibaly Y., Belem T., Cheng L.** Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27 (4). – P. 701–710, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.05.012.
- Cravotta C.A. III** Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: Geochemical controls on constituent concentrations // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23 (2). – P. 203–226, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.10.003.
- Dezert T., Fargier Y., Lopes S.P., Côte P.** Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 260. – 105206, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105206.
- Dimech A., Chouteau M., Chou E.T.-K., Aubertin M., Martin V., Bussière B., Plante B.** Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection // *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. – Denver, Colorado, USA, 2017. – P. 195–203, doi: 10.4133/SAGEEP.30-009.
- do Nascimento M.M.P.F., Moreira C.A., Duz B.G., Silveira A.J.** Geophysical diagnosis of diversion channel infiltration in a uranium waste rock pile // *Mine Water and the Environment*. – 2022. – Vol. 41 (2). – P. 704–720, doi: 10.1007/s10230-022-00878-3.
- Ebraheem A., Hamburger M., Bayless E., Krothe N.C.** A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements // *Groundwater*. – 1990. – Vol. 28 (3). – P. 361–368, doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02265.x.

- Gabarrón M., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M.A., Buesco M.C., Martínez-Martínez S., Faz Á., Acosta J.A.** Electrical resistivity tomography as a support tool for physicochemical properties assessment of near-surface waste materials in a mining tailing pond (EL Gorguel, SE Spain) // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10 (6). – 559, doi: 10.3390/min10060559.
- Günther T., Martin T.** Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap // *Journal of Applied Geophysics*. – Vol. 135. – P. 436–448, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.008.
- Hudson E., Kulesa B., Edwards P., Williams T., Walsh R.** Integrated hydrological and geophysical characterisation of surface and subsurface water contamination at abandoned metal mines // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2018. – Vol. 229. – 256, doi: 10.1007/s11270-018-3880-4.
- Johnston A., Runkel R.L., Navarre-Sitchler A., Singha K.** Exploration of diffuse and discrete sources of acid mine drainage to a headwater mountain stream in Colorado, USA // *Mine Water and the Environment*. – Vol. 36 (4). – P. 463–478, doi: 10.1007/s10230-017-0452-6.
- King A., McNeill J.** Applications of Geophysical Methods for Monitoring Acid Mine Drainage. – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/461.pdf>.
- Kinnunen P.H.M., Kaksonen A.H.** Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P. 153–160, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.
- Kłosowski G., Rymarczyk T., Gola A.** Increasing the reliability of flood embankments with neural imaging method // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8 (9). – 1457, doi: 10.3390/app8091457.
- Lachhab A., Benyassine E.M., Rouai M., Dekayir A., Parisot J.C., Boujamaoui M.** Integration of multi-geophysical approaches to identify potential pathways of heavy metals contamination-a case study in Zeida, Morocco // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (3) – P. 415–423, doi: 10.32389/JEEG9-067.
- Lehmann P., Gambazzi F., Suski B., Baron L., Askarinejad A., Springman S.M., Holliger K., Or D.** Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure // *Water Resource Research*. – 2013. – Vol. 49 (12). – P. 7992–8004, doi: 10.1002/2013WR014560.
- Li Q.-M., Yuan H.-N., Zhong M.-H.** Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds // *Journal of Central South University*. – 2015. – Vol. 22 (7). – P. 2707–2718, doi: 10.1007/s11771-015-2801-6.
- Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J.** A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // *Advances in Civil Engineering*. – Vol. 2019. – 4159306, doi: 10.1155/2019/4159306.
- Mainali G., Nordlund E., Knutsson S., Thunehed H.** Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – P. 5859–5875.
- Markovaara-Koivisto M., Valjus T., Tarvainen T., Huotari T., Lerssi J., Eklund M.** Preliminary volume and concentration estimation of the Aijala tailings pond – Evaluation of geophysical methods // *Resources Policy*. – 2018. – Vol. 59. – P. 7–16, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.08.016.
- Martin T., Kuhn K., Günther T., Kniess R.** Geophysical exploration of a historical stamp mill dump for the volume estimation of valuable residues // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (2). – P. 275–286, doi: 10.2113/JEEG19-080.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martínez-Pagan P., De Ignacio C., Lillo J., Faz Á.** Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical

methods (Cartagena-La Union district, Spain) // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 232. – P. 135–146, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.

Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., De Ignacio-San José C., Lillo J., Faz Á. Abandoned mine tailings affecting riverbed sediments in the Cartagena-La Union district, Mediterranean coastal area (Spain) // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12 (12). – 2042, doi: 10.3390/rs12122042.

Martínez J., Rey J., Hidalgo M., Benavente J. Characterizing abandoned mining dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: the Linares-La Carolina district (southern Spain) // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2012. – Vol. 223 (6). – P. 2955–2968, doi: 10.1007/s11270-012-1079-7.

Martínez J., Hidalgo M., Rey J., Garrido J., Kohfahl C., Benavente J., Rojas D. A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 162. – P. 62–71, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.

Martínez-Pagán P., Faz Cano Á., Aracil E., Arocena J.M. Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2009. – Vol. 14 (2). – P. 63–76, doi: 10.2113/JEEG14.2.63.

Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Martín-Velázquez S., Martínez-Segura P. Electrical resistivity imaging applied to tailings ponds: an overview // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40. – P. 285–297, doi: 10.1007/s10230-020-00741-3.

Martínez-Segura M.A., Váscónez-Maza M.D., García-Nieto M.C. Volumetric characterisation of waste deposits generated during the production of fertiliser derived from phosphoric rock by using LiDAR and electrical resistivity tomography // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 716. – 137076, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137076.

Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J., Moisio K., Pedretti D. Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 192. – 104402, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104402.

Monterroso C., Macías F. Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils // *International Journal of Surface Mining, Reclamation Environment*. – 1998. – Vol. 12 (1). – P. 5–9, doi: 10.1080/09208119808944015.

Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Edelev A.V., Gora M.P. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – Vol. 57 (4). – P. 617–628, doi: 10.1016/j.rgg.2015.05.014.

Olenchenko V.V., Osipova P.S., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B. Electrical resistivity dynamics beneath the weathered mine tailings in response to ambient temperature // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (1). – P. 55–63, doi: 10.2113/JEEG18-096.

Paria C.J.B., Gamarra J.P.B., Pereira E.L. Geophysical-geotechnical investigation of an old tailings dam from a mine in the Peruvian highland // *Brazilian Journal of Geophysics*. – 2020. – Vol. 38 (1). – P. 20–31, doi: 10.22564/rbgf.v38i1.2035.

Pierwoła J., Szuszkiewicz M., Cabala J., Jochymczyk K., Żogała B., Magiera T. Integrated geophysical and geochemical methods applied for recognition of acid waste drainage (AWD) from Zn–Pb post-flotation tailing pile (Olkusz, Southern Poland) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27 (14). – P. 16731–16744, doi: 10.1007/s11356-020-08195-4.

- Placencia-Gómez E., Parviainen A., Slater L., Leveinen J.** Spectral induced polarization (SIP) response of mine tailings // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 173. – P. 8–24, doi: 10.1016/j.jconhyd.2014.12.002.
- Poisson J., Chouteau M., Aubertin M., Campos D.** Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 67 (2). – P. 179–192, doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.10.011.
- Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M.** Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – Vol. 150. – P. 40–51, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.01.009.
- Qi Y., Soueid Ahmed A., Revil A., Ghorbani A., Abdulsamad F., Florsch N., Bonnenant J.** Induced polarization response of porous media with metallic particles – Part 7: Detection and quantification of buried slag heaps // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 83 (5). – P. E277–E291, doi: 10.1190/geo2017-0760.1.
- Raymond K.E., Seigneur N., Su D., Mayer K.U.** Investigating the influence of structure and heterogeneity in waste rock piles on mass loading rates – A reactive transport modeling study // *Frontiers Water*. – 2021. – Vol. 3. – 39, doi: 10.3389/frwa.2021.618418.
- Rey J., Martínez J., Hidalgo M.C., Mendoza R., Sandoval S.** Assessment of tailings ponds by a combination of electrical (ERT and IP) and hydrochemical techniques (Linares, Southern Spain) // *Mine Water and Environment*. – 2020. – Vol. 40. – P. 298–307, doi: 10.1007/s10230-020-00709-3.
- Rucker D.F., Glaser D.R., Osborne T., Maehl W.C.** Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways // *Mine Water and Environment*. – 2009. – Vol. 28 (2). – P. 146–157, doi: 10.1007/s10230-009-0072-x.
- Saladich J., Rivero L., Queralt I., Lovera R., Font X., Himi M., Casas A., Sendros A.** Geophysical evaluation of the volume of a mine tailing dump (Osor, Girona, NE Spain) using ERT // *Near Surface Geoscience 2016 – 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – EAGE, 2016. – cp-495-00153, doi: 10.3997/2214-4609.201602054.
- Shokri B.J., Ardejani F.D., Moradzadeh A.** Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, geo-electrical and IP techniques – A case study, NE Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75 (1). – 62, doi: 10.1007/s12665-015-4776-x.
- Shokri B.J., Shafaei F., Ardejani F.D., Mirzaghorbanali A., Entezam S.** Use of time-lapse 2D and 3D geoelectrical inverse models for monitoring acid mine drainage-a case study // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. – 2023. – Vol. 32 (4). – P. 376–399, doi: 10.1080/15320383.2022.2090895.
- Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S.** Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // *Environmental Geology*. – 2005. – Vol. 49 (2). – P. 267–273, doi: 10.1007/s00254-005-0084-1.
- Tresoldi G., Hojat A., Cordova L., Zanzi L.** Permanent geoelectrical monitoring of tailings dams using the autonomous G.RE.T.A system // *Proceeding of the Conference “Tailings and Mining Wastes”*. – Keystone, Colorado, USA, 2020. – P. 729–739.
- Tycholiz C., Ferguson I.J., Sherriff B., Cordeiro M., Sri Ranjan R., Pérez-Flores M.A.** Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 131. – P. 29–40, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.05.006.

- Weller A., Lewis R., Canh T., Möller M., Scholz B.** Geotechnical and geophysical long-term monitoring at a levee of Red River in Vietnam // *Journal of Environmental Engineering Geophysics*. – 2014. – Vol. 19 (3). – P. 183–192, doi: 10.2113/JEEG19.3.183.
- Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M.** Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57 (1). – P. 106–145, doi: 10.1029/2018RG000603.
- Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P.** Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2017. – Vol. 99 (9–10). – P. 1328–1345, doi: 10.1080/02772248.2017.1371308.
- Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A.** Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2019. – Vol. 230. – 307, doi: 10.1007/s11270-019-4363-y.
- Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Fedorova T.A., Karin Y.G., Edelev A.V., Osipova P.S., Saeva O.P.** Time-lapse electrical resistivity tomography and soil-gas measurements on abandoned mine tailings under a highly continental climate, Western Siberia, Russia // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2021. – Vol. 26 (3). – P. 227–237, doi: 10.32389/JEEG21-004.
- Yurkevich N., Osipova P., Tsibizov L., Tsibizova E., Fadeeva I., Volynkin S., Tulisova K., Kuleshova T.** Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (20). – 10610, doi: 10.3390/app122010610.
- Zieher T., Markart G., Ottowitz D., Römer A., Rutzinger M., Meißl G., Geitner C.** Water content dynamics at plot scale-comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 544. – P. 195–209, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.019.

REFERENCES

- Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M.** Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2010. – Vol. 69 (4). – P. 533–548, doi: 10.1007/s10064-010-0264-4.
- Benson A.K., Addams C.L.** Detecting the presence of acid mine drainage using hydrogeological, geochemical, and geophysical data; applications to contrasting conditions at mine sites in Little Cottonwood and American Fork canyons, Utah // *Environmental Geosciences*. – 1998. – Vol. 5 (1). – P. 17–27.
- Benyassine E.M., Lachhab A., Dekayir A., Parisot J.C., Rouai M.** An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2017. – Vol. 22 (4). – P. 315–324, doi: 10.2113/JEEG22.4.315.
- Bethune J., Randell J., Runkel R.L., Singha K.** Non-invasive flow path characterization in a mining-impacted wetland // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 183. – P. 29–39, doi: 10.1016/j.jconhyd.2015.10.002.
- Blowes D., Ptacek C., Jambor J., Weisener C.G., Pactunc D., Gould W.D., Johnson D.B.** The geochemistry of acid mine drainage // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – Vol. 11. – P. 131–190, doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.

- Booterbaugh A.P., Bentley L.R., Mendoza C.A.** Geophysical characterization of an undrained dyke containing an oil sands tailings pond, Alberta, Canada // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2015. – Vol. 20 (4). – P. 303–317, doi: 10.2113/JEEG20.4.303.
- Bortnikova S., Manstein Yu., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A.** Acid mine drainage migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): Multidisciplinary study // *Water Security in the Mediterranean Region. An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches* / Eds. A. Scozzari, B. Mansouri. – Springer, Netherlands, 2011. – P. 191 – 208, doi: 10.1007/978-94-007-1623-0_14.
- Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O.** The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas // *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control. Handbook of Environmental Chemistry*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – Vol. 40. – P. 239–256.
- Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Gaskova O.L., Chernii K.I., Devyatova A.Yu., Kucher D.O.** Evidence of trace element emission during the combustion of sulfide-bearing metallurgical slags // *Applied Geochemistry*. – 2017. – Vol. 78. – P. 105–115, doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.016.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Edelev A.V., Saeva O.P., Grakhova S.P., Karin Yu.G.** Hydrochemical and gaseous anomalies on sulfide tailings (Salair, Kemerovo region) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2021. – Vol. 332 (2). – P. 26–35, doi: 10.18799/24131830/2021/2/3040.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.Sh., Gora M.P., Khvachchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V.** Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586 (30). – 120623, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120623.
- Buselli G., Lu K.** Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 48 (1). – P. 11–23, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00055-6.
- Casagrande M.F.S., Moreira C.A., Targa D.A.** Study of generation and underground flow of acid mine drainage in waste rock pile in an uranium mine using electrical resistivity tomography // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (2). – P. 703–721, doi: 10.1007/s00024-019-02351-9.
- Cortada U., Martínez J., Rey J., Hidalgo M.C., Sandoval S.** Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydrochemical techniques // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 223. – P. 59–70, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.04.024.
- Coulibaly Y., Belem T., Cheng L.** Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27 (4). – P. 701–710, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.05.012.
- Cravotta C.A.** III Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: Geochemical controls on constituent concentrations // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23 (2). – P. 203–226, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.10.003.
- Dezert T., Fargier Y., Lopes S.P., Côte P.** Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 260. – 105206, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105206.
- Dimech A., Chouteau M., Chou E.T.-K., Aubertin M., Martin V., Bussière B., Plante B.** Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection //

Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – Denver, Colorado, USA, 2017. – P. 195–203, doi: 10.4133/SAGEEP.30-009.

do Nascimento M.M.P.F., Moreira C.A., Duz B.G., Silveira A.J. Geophysical diagnosis of diversion channel infiltration in a uranium waste rock pile // *Mine Water and the Environment*. – 2022. – Vol. 41 (2). – P. 704–720, doi: 10.1007/s10230-022-00878-3.

Ebraheem A., Hamburger M., Bayless E., Krothe N.C. A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements // *Groundwater*. – 1990. – Vol. 28 (3). – P. 361–368, doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02265.x.

Epov M.I., Men'shikov S.N., Kharitonov A.N., Romanov A.N., Permyakov V.S., Bortnikova S.B., Yurkevich N.V. Dielectric and radio-frequency emission parameters of formation and condensate waters from gas wells // *Russian Geology and Geophysics*. – 2017. – Vol. 58 (7). – P. 836–843, doi: 10.1016/j.rgg.2017.06.006.

Gabarrón M., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M.A., Buesco M.C., Martínez-Martínez S., Faz Á., Acosta J.A. Electrical resistivity tomography as a support tool for physicochemical properties assessment of near-surface waste materials in a mining tailing pond (EL Gorguel, SE Spain) // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10 (6). – 559, doi: 10.3390/min10060559.

Günther T., Martin T. Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap // *Journal of Applied Geophysics*. – Vol. 135. – P. 436–448, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.008.

Hudson E., Kulessa B., Edwards P., Williams T., Walsh R. Integrated hydrological and geophysical characterisation of surface and subsurface water contamination at abandoned metal mines // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2018. – Vol. 229. – 256, doi: 10.1007/s11270-018-3880-4.

Johnston A., Runkel R.L., Navarre-Sitchler A., Singha K. Exploration of diffuse and discrete sources of acid mine drainage to a headwater mountain stream in Colorado, USA // *Mine Water and the Environment*. – Vol. 36 (4). – P. 463–478, doi: 10.1007/s10230-017-0452-6.

King A., McNeill J. Applications of Geophysical Methods for Monitoring Acid Mine Drainage. – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/461.pdf>.

Kinnunen P.H.M., Kaksonen A.H. Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P. 153–160, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.

Kłosowski G., Rymarczyk T., Gola A. Increasing the reliability of flood embankments with neural imaging method // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8 (9). – 1457, doi: 10.3390/app8091457.

Kucher D.O., Korneeva T.V., Bortnikova S.B. Lab-scale modeling of pore fluid flow in samples of manmade substance from tailings ponds // *Journal of Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 55 (5). – P. 715–721, doi: 10.1134/S1062739119056087.

Lachhab A., Benyassine E.M., Rouai M., Dekayir A., Parisot J.C., Boujamaoui M. Integration of multi-geophysical approaches to identify potential pathways of heavy metals contamination-a case study in Zeida, Morocco // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (3) – P. 415–423, doi: 10.32389/JEEG9-067.

Lehmann P., Gambazzi F., Suski B., Baron L., Askarinejad A., Springman S.M., Holliger K., Or D. Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure // *Water Resource Research*. – 2013. – Vol. 49 (12). – P. 7992–8004, doi: 10.1002/2013WR014560.

Li Q.-M., Yuan H.-N., Zhong M.-H. Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds // *Journal of Central South University*. – 2015. – Vol. 22 (7). – P. 2707–2718, doi: 10.1007/s11771-015-2801-6.

- Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J.** A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // *Advances in Civil Engineering*. – Vol. 2019. – 4159306, doi: 10.1155/2019/4159306.
- Mainali G., Nordlund E., Knutsson S., Thunehed H.** Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – P. 5859–5875.
- Manshtein A.K.** Electrical Exploration: A Manual on Electrical Exploration Practice for Students of Geophysical Specialties. Vol. I / Eds. I.N. Modina, A.G. Yakovleva. – PolyPRESS, Tver, 2018. – 276 p.
- Markovaara-Koivisto M., Valjus T., Tarvainen T., Huotari T., Lerssi J., Eklund M.** Preliminary volume and concentration estimation of the Aijala tailings pond – Evaluation of geophysical methods // *Resources Policy*. – 2018. – Vol. 59. – P. 7–16, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.08.016.
- Martin T., Kuhn K., Günther T., Kniess R.** Geophysical exploration of a historical stamp mill dump for the volume estimation of valuable residues // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (2). – P. 275–286, doi: 10.2113/JEEG19-080.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martínez-Pagan P., De Ignacio C., Lillo J., Faz Á.** Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain) // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 232. – P. 135–146, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., De Ignacio-San José C., Lillo J., Faz Á.** Abandoned mine tailings affecting riverbed sediments in the Cartagena-La Union district, Mediterranean coastal area (Spain) // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12 (12). – 2042, doi: 10.3390/rs12122042.
- Martínez J., Rey J., Hidalgo M., Benavente J.** Characterizing abandoned mining dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: the Linares-La Carolina district (southern Spain) // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2012. – Vol. 223 (6). – P. 2955–2968, doi: 10.1007/s11270-012-1079-7.
- Martínez J., Hidalgo M., Rey J., Garrido J., Kohfahl C., Benavente J., Rojas D.** A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 162. – P. 62–71, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.
- Martínez-Pagán P., Faz Cano Á., Aracil E., Arocena J.M.** Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2009. – Vol. 14 (2). – P. 63–76, doi: 10.2113/JEEG14.2.63.
- Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Martín-Velázquez S., Martínez-Segura P.** Electrical resistivity imaging applied to tailings ponds: an overview // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40. – P. 285–297, doi: 10.1007/s10230-020-00741-3.
- Martínez-Segura M.A., Váscónez-Maza M.D., García-Nieto M.C.** Volumetric characterisation of waste deposits generated during the production of fertiliser derived from phosphoric rock by using LiDAR and electrical resistivity tomography // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 716. – 137076, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137076.
- Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J., Moisio K., Pedretti D.** Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 192. – 104402, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104402.
- Monterroso C., Macías F.** Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils // *International Journal of Surface Mining, Reclamation Environment*. – 1998. – Vol. 12 (1). – P. 5–9, doi: 10.1080/09208119808944015.

- Olenchenko V.V., Osipova P.S., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B.** Electrical resistivity dynamics beneath the weathered mine tailings in response to ambient temperature // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (1). – P. 55–63, doi: 10.2113/JEEG18-096.
- Paria C.J.B., Gamarra J.P.B., Pereira E.L.** Geophysical-geotechnical investigation of an old tailings dam from a mine in the Peruvian highland // *Brazilian Journal of Geophysics*. – 2020. – Vol. 38 (1). – P. 20–31, doi: 10.22564/rbgf.v38i1.2035.
- Pierwoła J., Szuszkiewicz M., Cabala J., Jochymczyk K., Żogała B., Magiera T.** Integrated geophysical and geochemical methods applied for recognition of acid waste drainage (AWD) from Zn–Pb post-flotation tailing pile (Olkusz, Southern Poland) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27 (14). – P. 16731–16744, doi: 10.1007/s11356-020-08195-4.
- Placencia-Gómez E., Parviainen A., Slater L., Leveinen J.** Spectral induced polarization (SIP) response of mine tailings // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 173. – P. 8–24, doi: 10.1016/j.jconhyd.2014.12.002.
- Poisson J., Chouteau M., Aubertin M., Campos D.** Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 67 (2). – P. 179–192, doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.10.011.
- Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M.** Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – Vol. 150. – P. 40–51, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.01.009.
- Qi Y., Soueid Ahmed A., Revil A., Ghorbani A., Abdulsamad F., Florsch N., Bonnenant J.** Induced polarization response of porous media with metallic particles – Part 7: Detection and quantification of buried slag heaps // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 83 (5). – P. E277–E291, doi: 10.1190/geo2017-0760.1.
- Raymond K.E., Seigneur N., Su D., Mayer K.U.** Investigating the influence of structure and heterogeneity in waste rock piles on mass loading rates – A reactive transport modeling study // *Frontiers Water*. – 2021. – Vol. 3. – 39, doi: 10.3389/frwa.2021.618418.
- Rey J., Martínez J., Hidalgo M.C., Mendoza R., Sandoval S.** Assessment of tailings ponds by a combination of electrical (ERT and IP) and hydrochemical techniques (Linares, Southern Spain) // *Mine Water and Environment*. – 2020. – Vol. 40. – P. 298–307, doi: 10.1007/s10230-020-00709-3.
- Rucker D.F., Glaser D.R., Osborne T., Maehl W.C.** Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways // *Mine Water and Environment*. – 2009. – Vol. 28 (2). – P. 146–157, doi: 10.1007/s10230-009-0072-x.
- Saladich J., Rivero L., Queralt I., Lovera R., Font X., Himi M., Casas A., Sendros A.** Geophysical evaluation of the volume of a mine tailing dump (Osor, Girona, NE Spain) using ERT // *Near Surface Geoscience 2016 – 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – EAGE, 2016. – cp-495-00153, doi: 10.3997/2214-4609.201602054.
- Shokri B.J., Ardejani F.D., Moradzadeh A.** Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, geo-electrical and IP techniques – A case study, NE Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75 (1). – 62, doi: 10.1007/s12665-015-4776-x.
- Shokri B.J., Shafaei F., Ardejani F.D., Mirzaghorbanali A., Entezam S.** Use of time-lapse 2D and 3D geoelectrical inverse models for monitoring acid mine drainage—a case study // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. – 2023. – Vol. 32 (4). – P. 376–399, doi: 10.1080/15320383.2022.2090895.

- Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N., Bortnikova S.B., Kharitonov A.N., Permyakov V.S.** NMR-relaxometry laboratory study of fluids taken from boreholes // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2017. – Vol. 328 (2). – P. 59–66.
- Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S.** Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // Environmental Geology. – 2005. – Vol. 49 (2). – P. 267–273, doi: 10.1007/s00254-005-0084-1.
- Tresoldi G., Hojat A., Cordova L., Zanzi L.** Permanent geoelectrical monitoring of tailings dams using the autonomous G.RE.T.A system // Proceeding of the Conference “Tailings and Mining Wastes”. – Keystone, Colorado, USA, 2020. – P. 729–739.
- Tycholiz C., Ferguson I.J., Sherriff B., Cordeiro M., Sri Ranjan R., Pérez-Flores M.A.** Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 131. – P. 29–40, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.05.006.
- Weller A., Lewis R., Canh T., Möller M., Scholz B.** Geotechnical and geophysical long-term monitoring at a levee of Red River in Vietnam // Journal of Environmental Engineering Geophysics. – 2014. – Vol. 19 (3). – P. 183–192, doi: 10.2113/JEEG19.3.183.
- Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M.** Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review // Reviews of Geophysics. – 2019. – Vol. 57 (1). – P. 106–145, doi: 10.1029/2018RG000603.
- 2017. – Vol. 99 (9–10). – P. 1328–1345, doi: 10.1080/02772248.2017.1371308.
- Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A.** Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia // Water, Air, and Soil Pollution. – 2019. – Vol. 230. – 307, doi: 10.1007/s11270-019-4363-y.
- Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Fedorova T.A., Karin Y.G., Edelev A.V., Osipova P.S., Saeva O.P.** Time-lapse electrical resistivity tomography and soil-gas measurements on abandoned mine tailings under a highly continental climate, Western Siberia, Russia // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2021. – Vol. 26 (3). – P. 227–237, doi: 10.32389/JEEG21-004.
- Yurkevich N., Osipova P., Tsibizov L., Tsibizova E., Fadeeva I., Volynkin S., Tulisova K., Kuleshova T.** Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (20). – 10610, doi: 10.3390/app122010610.
- Zieher T., Markart G., Ottowitz D., Römer A., Rutzinger M., Meißl G., Geitner C.** Water content dynamics at plot scale-comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling // Journal of Hydrology. – 2017. – Vol. 544. – P. 195–209, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.019.

КОПОТКО ОБ АВТОРАХ

ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение электроразведочных методов геофизики при решении инженерно-геологических, рудопоисковых, геокриологических, геотехнических задач, поисках месторождений углеводородов и интерпретация электроразведочных данных.

БОРТНИКОВА Светлана Борисовна – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прогнозная оценка опасности складированных отходов для окружающей среды, геохимия техногенеза и особенности формирования природно-техногенных ландшафтов в регионах с развитой горнодобывающей промышленностью.

ДЕВЯТОВА Анна Юрьевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент НГУ, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: механизмы трансформации техногенных систем и формирования водных и воздушных аномалий, перенос химических элементов от техногенных источников в парогазовой фазе, методы математического моделирования.



НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ КОМБИНИРОВАННОГО ИЗОТОПНОГО СОСТАВА МЕТАНА С ЦЕЛЬЮ ЕГО ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

А.Л. Макась, А.С. Кудрявцев, М.Л. Трошков

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

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

e-mail: MakasAL@ipgg.sbras.ru

Предложен и обоснован новый подход к измерению комбинированного изотопного состава метильной группы метана $^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$, основанный на плазмохимической конверсии в воздухе метана в метанол, и его последующем анализе на масс-спектрометре с положительной химической ионизацией при атмосферном давлении. Предложенный подход упрощает технологию генетической характеристики метана по сравнению с традиционной и позволяет в перспективе создать аппаратуру для выполнения внелабораторных анализов.

Изотопный состав метана, масс-спектрометрия с ионизацией при атмосферном давлении, генетические типы метана

THE NEW APPROACH TO DETERMINATION OF THE COMBINED ISOTOPIC COMPOSITION OF METHANE FOR ITS GENETIC CHARACTERIZATION

A.L. Makas, A.S. Kudryavtsev, M.L. Troshkov

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

e-mail: MakasAL@ipgg.sbras.ru

A new approach to mass-spectrometric determination of the combined isotopic composition of methane has been put forward. The approach is based on the preliminary on-line conversion of methane to methanol in corona discharge and selective chemical ionization. The approach provides means to lower requirements for equipment, consumables, and operation conditions and offers a challenge to develop a new field method.

Isotopic composition of methane, atmospheric pressure mass-spectrometry, genetic types of methane

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что изотопные отношения углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и водорода D/H в метане зависят от источника его происхождения [Schoell, 1988], поскольку в разных каналах метаногенеза преобладают разные механизмы изотопного фракционирования. В результате многочисленных исследований эмпирически установлены границы вариаций изотопных отношений, с помощью которых можно различать термогенный и бактериальный метан [Whiticar, 1999]. Например, термогенный метан, как правило, обогащен изотопом ^{13}C по сравнению с бактериальным и имеет значение $\delta^{13}\text{C}$ в диапазоне $-50\text{‰} \div 20\text{‰}$. Вариации $\delta^{13}\text{C}$ бактериального метана находятся в диапазоне $-80\text{‰} \div 50\text{‰}$. Показано, что возможна и более детальная классификация по изотопному составу внутри перечисленных типов метана, например, различаются бактериальный метан, образующийся в результате восстановления CO_2 , и бактериальный

метан ферментативного брожения. Тип источника происхождения (генетическая характеристика) метана в газовых проявлениях на земной поверхности, в почвенных газах и в бурильном растворе является важным геохимическим критерием нефтегазоносности при поиске залежей углеводородов. В то же время оперативность получения и объем таких данных значительно ограничены отсутствием соответствующей аппаратуры и методов для внелабораторных измерений: в настоящее время для измерения природных вариаций изотопного состава используется исключительно лабораторное масс-спектрометрическое оборудование.

Наиболее распространенный метод измерения изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ в метане основан на предварительном его сжигании в токе кислорода или воздуха и последующем масс-спектрометрическом изотопном анализе образовавшегося CO_2 с ионизацией электронами. При этом измеряется отношение интенсивностей ионов с m/z 45 и 44 и рассчитывается распространенность ^{13}C . Основы этого метода разработаны в 50-е годы прошлого века, он широко освоен и дает в лабораторных условиях результаты необходимого качества. Однако ряд технических особенностей данного метода не позволяет реализовать его в полевых условиях.

Одним из недостатков является наличие в фоновом масс-спектре пиков ионов с m/z 44 и 45, которые снижают точность измерений. Данные пики обусловлены остаточным газом в вакуумной системе масс-спектрометра. Влияют на результаты измерений также изобарные ионы, например, N_2O^+ , C_3H_8^+ , C_2OH_5^+ , образующиеся в результате фрагментации других компонентов пробы при ионизации электронами. При анализе в лабораторных условиях минимизация влияния фоновых линий достигается путем снижения количества остаточного газа за счет применения высокопроизводительных, особо чистых вакуумных систем стационарных изотопных масс-спектрометров (рабочее давление не выше 10^{-6} Па), созданием стабильных климатических условий, применением особо чистого газа-носителя и реагентов. Влияние изобарных ионов, образующихся из других компонентов пробы, устраняется применением предварительного газохроматографического разделения.

Усложняется технология также и тем, что при изотопном анализе метана с концентрацией менее 0.1 % требуется концентрирование его или продукта-аналита CO_2 , которое возможно реализовать только с помощью вымораживания, известного как криофокусировка, при температуре жидкого азота. Еще одним недостатком данного способа является высокая распространенность в окружающей среде двуокиси углерода, которая может загрязнять пробу и искажать результаты анализа. Все вышесказанное указывает на то, что технические решения традиционного метода, обеспечивающие необходимую точность и чувствительность изотопного анализа в лабораторных условиях, как правило, не применимы для реализации в портативных устройствах для внелабораторных измерений.

Авторами предложен новый подход [Макась и др., 2012], который лишен отмеченных выше недостатков, позволяет существенно упростить аппаратуру для изотопной характеристики метана и реализовать ее в полевом исполнении для выполнения внелабораторных анализов.

В предложенном способе продуктом-аналитом является метанол, образованный в результате плазмо-химической конверсии метана в воздухе. Изотопный анализ метанола осуществляется на масс-спектрометре с положительной химической ионизацией при атмосферном давлении (ХИАД) путем измерения отношения интенсивностей токов ионов с m/z 34 ($^{13}\text{CH}_5^{16}\text{O}^+$, $^{12}\text{CDH}_4^{16}\text{O}^+$, $^{12}\text{CH}_5^{17}\text{O}^+$) и m/z 33 ($^{12}\text{CH}_5^{16}\text{O}^+$). На основании изотопного анализа аналита рассчитывают комбинированный изотопный состав метильной группы молекулы метана, то есть относительную распространенность суммы основных изотопомеров метильной группы молекулы метана $^{13}\text{CH}_3$ и $^{12}\text{CDH}_2$.

Метод ХИАД в отличие от ионизации электронами является мягким, селективным методом и характеризуется «чистым» фоновым спектром с массовыми линиями m/z $19 + n \times 18$ (19, 37, 55 и т. д.), соответствующим протонированным водным кластерам.

Метанол, как продукт-аналит, обладает следующими положительными свойствами:

- 1) выход метанола при плазмо-химической конверсии метана при оптимальных условиях может достигать 17 % [Nozaki et al., 2004];
- 2) относительно высокое сродство метанола к протону – 181 ккал/моль (метан – 135 ккал/моль, вода – 166 ккал/моль) и, следовательно, высокая эффективность ионизации в положительной моде ХИАД в коронном разряде [Kearle, 2000];
- 3) при химической ионизации метанола образуется протонированная молекула $[(CH_4O)H]^+$ с m/z 33. В окружающей среде не существует других распространенных веществ, которые бы образовывали при ХИАД ионы с m/z 33 и 34, что снимает проблему с фоновыми и изобарными ионами, которые бы снижали точность измерений;
- 4) метанол можно концентрировать с помощью распространенных сорбентов при нормальной температуре, не прибегая к вымораживанию [Qin et al., 1997];
- 5) концентрация метанола в объектах окружающей среды значительно ниже, чем углекислого газа.

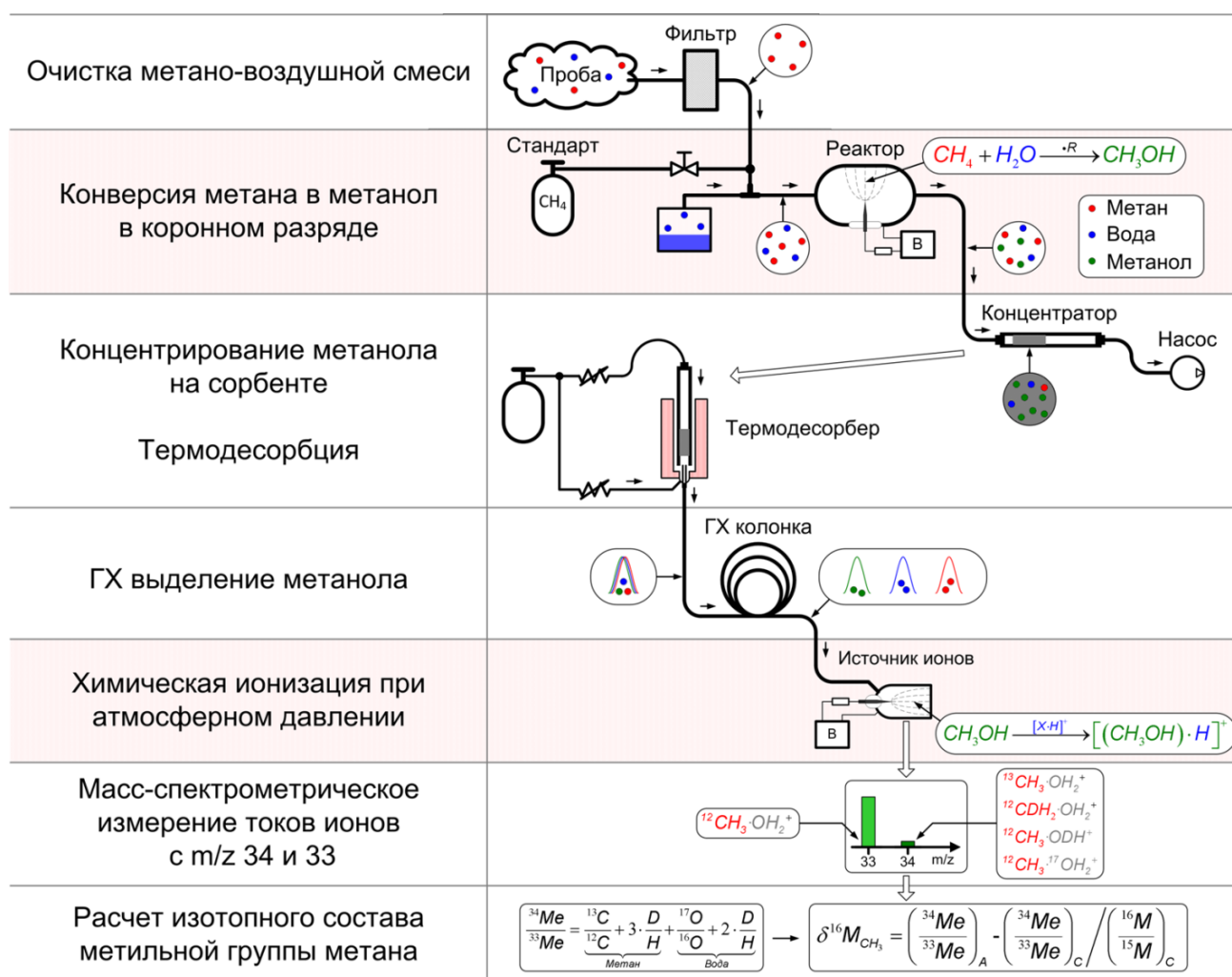


Рис. 1. Функциональная схема нового метода определения комбинированного изотопного состава метана

В общем виде предлагаемая схема химического анализа и определения комбинированного изотопного состава метана приведена на рис. 1. При низких концентрациях метана вначале метанол, образованный в результате конверсии, концентрируют на сорбенте, затем осуществляют термодесорбцию и подачу его на изотопный анализ. Наиболее простой вариант предложенного метода реализуется при анализе проб с высокой концентрацией метана, когда не требуется его обогащение, и конверсия с ионизацией могут быть объединены в одном устройстве – источнике ионов с ХИАД с коронным разрядом. При этом в области разряда вблизи острия происходит конверсия метана в метанол и образование ионов-реактантов $[(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}]^+$, и далее в результате ион-молекулярных реакций образуется протонированная молекула метанола.

Целью данной работы является экспериментальная проверка наиболее значимых стадий предлагаемого метода:

- 1) конверсия/ионизация метана в метанол в коронном разряде;
- 2) концентрирование метанола на твердом сорбенте при нормальных условиях и оценка коэффициента обогащения при использовании термодесорбционного устройства ввода пробы;
- 3) хроматографическое выделение метанола.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования выполнялись на малогабаритном масс-спектрометре с ХИАД, ранее разработанном в лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий ИНГГ СО РАН [Makas et al., 2004]. Масс-спектрометр содержит источник ионов с коронным разрядом и миниатюрный масс-анализатор монопольного типа. Для выполнения исследований по концентрированию паров метанола в воздухе и его хроматографического выделения использовалась система быстрого концентрирования/разделения, сочлененная с этим масс-спектрометром, описанная ранее авторами [Kudryavtsev et al., 2014]. В данной работе для разделения использовалась хроматографическая колонка PoraplotQ (2 м × 0.32 мм).

Для создания заданной концентрации метанола в воздухе в экспериментах использовался источник микропотока метанола ИМ36-М-А2 (ООО «Мониторинг», г. Санкт-Петербург). Порог обнаружения метанола в воздухе был определен на уровне 3.4×10^{-5} мг/л.

Влажность воздуха контролировалась измерителем ИВГ-1-КП с преобразователем ИПВТ-08 (ЗАО «Эксис»).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности конверсии/ионизация метана в коронном разряде

В данной работе исследовали вариант реализации метода, когда конверсия и ионизация метана в метанол объединены в одном устройстве: источнике ионов с ХИАД с коронным разрядом. На вход источника ионов подавался очищенный воздух, содержащий метан и пары воды. Концентрация метана в экспериментах изменялась путем динамического разбавления.

Ранее конверсия метана в коронном разряде исследовалась в работе [Hoeben et al., 2014]. В ней установлены основные продукты конверсии: этан, этилен, ацетилен и метанол. Ионизация углеводородов в коронном разряде характеризуется крайне низкой эффективностью, однако при высокой концентрации

они проявляются в масс-спектре. Ионизация метанола в положительной моде коронного разряда при атмосферном давлении характеризуется образованием аддукт-иона (протонированной молекулы) $[M+H]^+$.

При подаче метано-воздушной смеси в прибор результирующие масс-спектры характеризовались наиболее интенсивным пиком иона с m/z 33, который соответствует протонированной молекуле метанола $[(CH_4O)H]^+$. При высокой концентрации метана регистрировался так же ион с m/z 30 $[(C_2H_5)H]^+$.

В широком диапазоне концентраций метана зависимость интенсивности иона $[(CH_4O)H]^+$ была близка к линейной, в отличие, например, от иона $[(C_2H_5)H]^+$, для которого концентрационная зависимость имеет степенной характер (рис. 2).

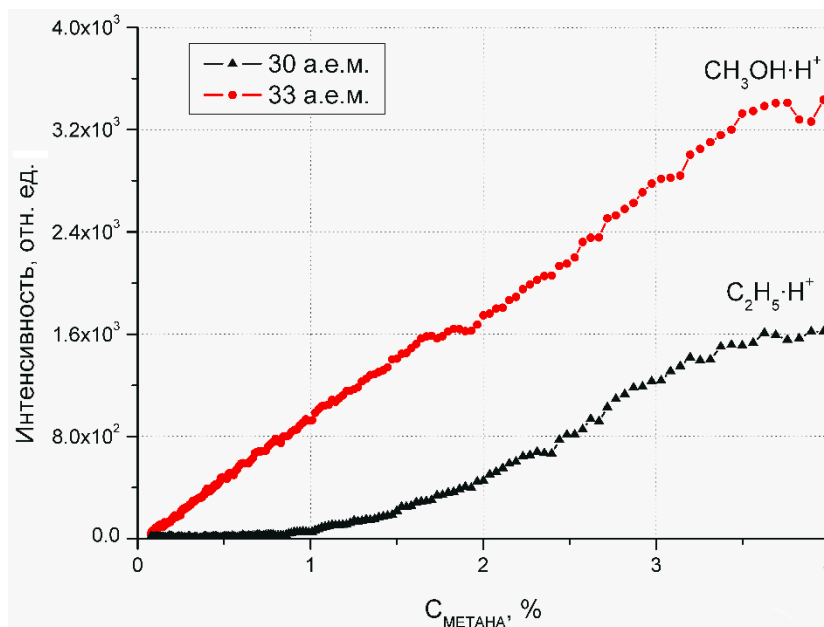


Рис. 2. Концентрационная зависимость интенсивности ионов продуктов конверсии/ионизации метана $[(CH_4O)H]^+$ и $[(C_2H_5)H]^+$

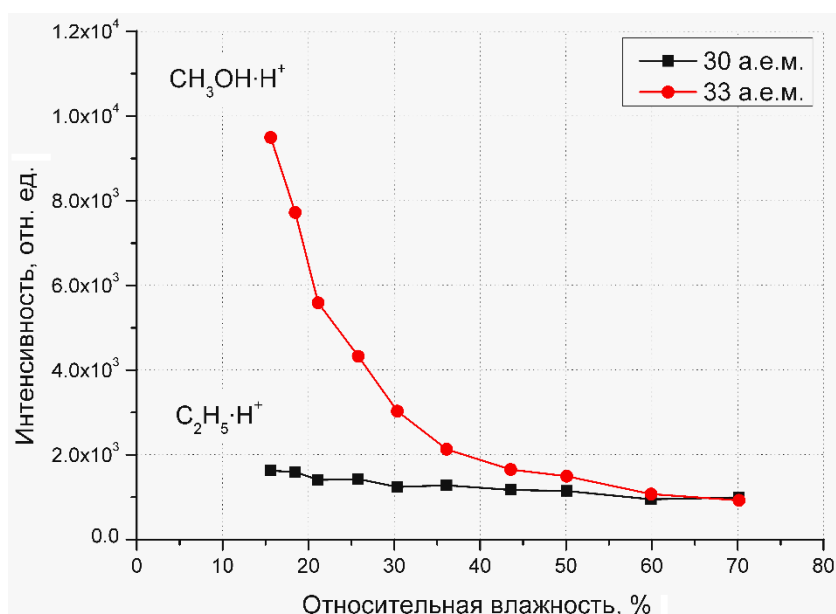


Рис. 3. Зависимость интенсивности ионов продуктов конверсии/ионизации метана $[(CH_4O)H]^+$ и $[(C_2H_5)H]^+$ от относительной влажности

В ходе экспериментов установлена сильная зависимость эффективности конверсии/ионизации этанола от концентрации воды (рис. 3). Этот эффект указывает на необходимость предварительного хроматографического разделения воды и метанола перед подачей в источник ионов.

Для установления канала образования метанола анализируемая метано-воздушная смесь осушалась, и в нее добавлялись пары «тяжелой воды» D₂O. Это привело к тому, что массовое число *m/z* основного иона в масс-спектре изменился с 33 на 35, то есть увеличился на два (рис. 4). Из этого следует, что молекула метанола содержит метильную группу, образованную из исходной молекулы метана, а присоединенные атом водорода и протон образованы из воды, присутствующей в метано-воздушной смеси:

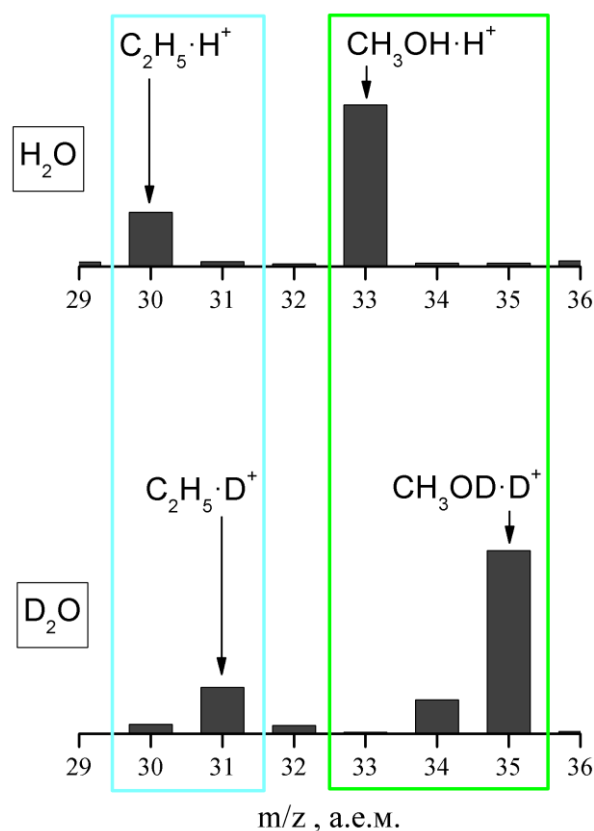
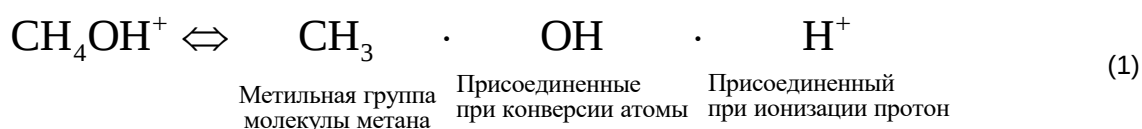


Рис. 4. Масс-спектры продуктов конверсии-ионизации метано-воздушной смеси с парами H₂O (сверху) и D₂O (снизу)

Концентрирование метанола

Одним из преимуществ развиваемого подхода к определению изотопного состава метана является то, что используемый аналит – метанол, в отличие от метана и углекислого газа, можно концентрировать с помощью распространенных сорбентов при температуре окружающей среды.

При оценке объема проскока метанола через концентраторы с различными сорбентами оптимальные характеристики улавливания получены на силикагеле. При количестве сорбента 10 мг

(длина слоя 10 мм; диаметр 2 мм) происходит полное улавливание до объема прокачанной пробы 500 см³. Сорбент полностью насыщается при объеме прокачанной пробы около 5 л.

Схема экспериментальной установки для измерения коэффициента обогащения приведена на рис. 5.

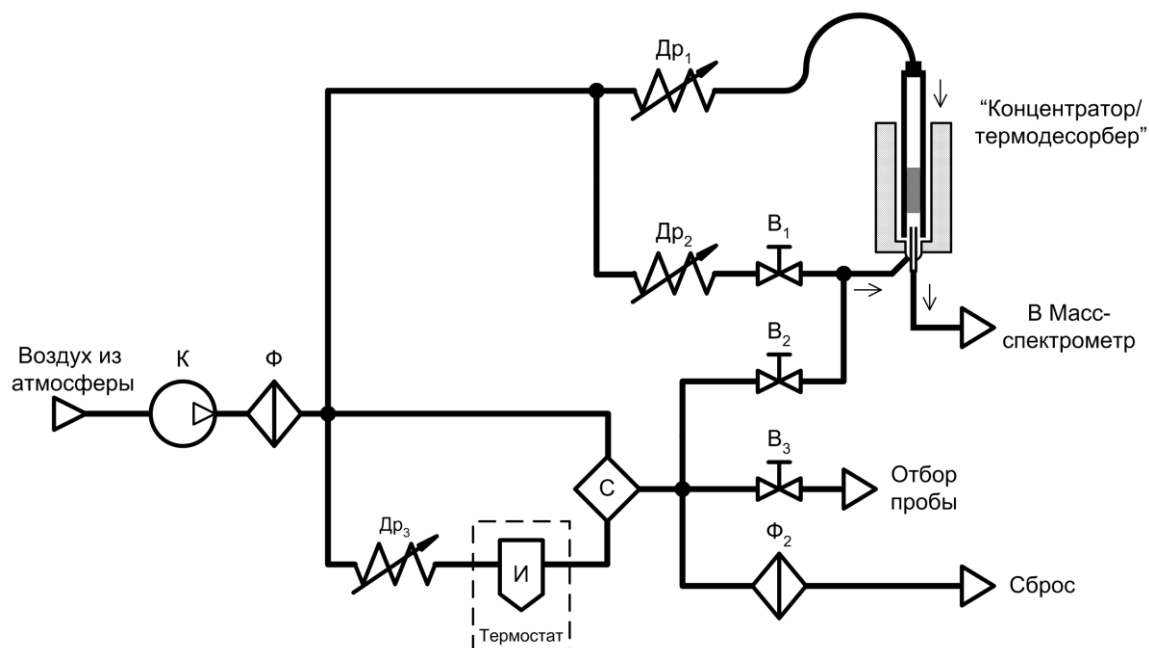


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по измерению коэффициента обогащения метанола

Атмосферный воздух, используемый для работы газовой схемы, с помощью побудителя расхода К направлялся через фильтр Ф и очищался от паров воды и органических примесей. Для создания стандартной концентрации метанола в воздухе использовался эталонный источник микропотока метанола И, установленный в термостате при заданной температуре. В экспериментах создавалась концентрация метанола в воздухе около 1.4×10^{-4} мг/л. Проба воздуха, содержащая пары метанола, либо подавалась в масс-спектрометр напрямую, либо отбиралась на концентратор и вводилась через систему обогащения. Измерение отклика масс-спектрометра производилось на массе 33 а.е.м., соответствующей протонированной молекуле метанола.

Коэффициент обогащения K рассчитывался как отношение интенсивностей соответствующих масс-спектрометрических пиков:

$$K = \frac{I_{o\hat{o}}}{I_0}, \quad (2)$$

где $I_{об}$ – интенсивность пика при подаче пробы через систему обогащения, I_0 – интенсивность пика при подаче пробы напрямую. Результаты измерений коэффициента обогащения метанола при различных объемах пробы приведены на рис. 6. Отклонение от линейной зависимости, наблюдаемое при объеме пробы более 500 см³, соответствует полученным данным о проскоке метанола.

Теоретически коэффициент обогащения K для данного устройства ввода выражается формулой:

$$K \approx \frac{V_{np}}{Q_{ex} \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

где V_{np} – объем пробы, Q_{ex} – входной поток в прибор, Δt – ширина импульса пробы после термодесорбции. В экспериментах использовалась величина потока $Q_{ex}=15 \text{ см}^3/\text{мин}$; ширина импульса Δt составляла величину около 4 с. Нетрудно убедиться, что теоретическая оценка K хорошо соответствует экспериментальным данным, представленным на рис. 6.

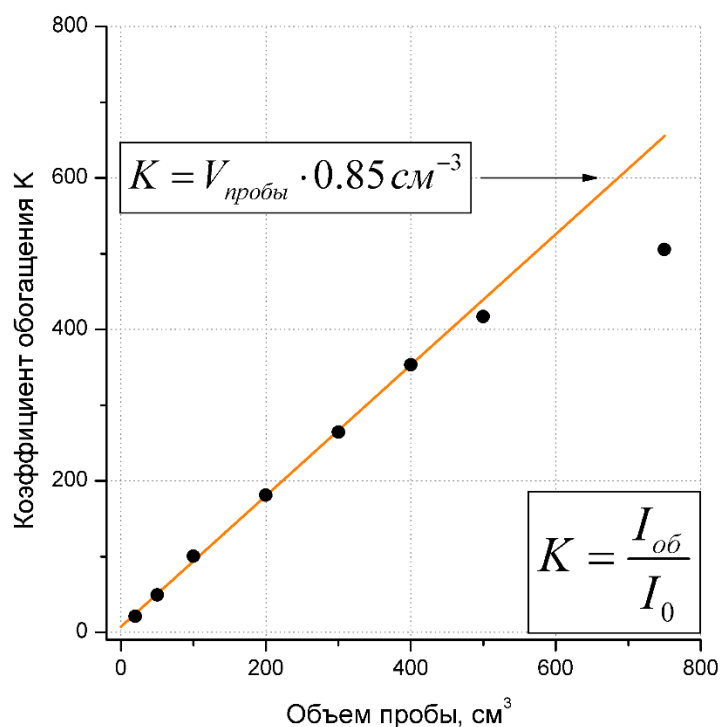


Рис. 6. Зависимость коэффициента обогащения метанола от объема пробы

Газохроматографическое выделение метанола

В экспериментах по исследованию системы обогащения использовался заранее осушенный воздух, однако при реализации метода в целом метано-воздушная смесь должна содержать пары воды, необходимые для плазмохимической конверсии метана в метанол. В то же время экспериментально установлено, что эффективность химической ионизации метанола снижается с ростом концентрации воды в пробе. Для устранения влияния воды в пробе и стандартизации условий ионизации необходимо предварительное хроматографическое разделение воды и метанола. Эффект влияния воды на эффективность ионизации метанола продемонстрирован на рис. 7А). Масс-спектрометр настраивался на регистрацию протонированного кластера воды $[(\text{H}_2\text{O})_2\text{H}]^+$ с массой 37 а.е.м. и протонированной молекулы метанола $[(\text{MeOH})\text{H}]^+$ с массой 33 а.е.м. В источник ионов дополнительно подавалась постоянная концентрация метанола. На концентратор отбиралась проба воздуха с относительной влажностью 2.2 % объемом 150 см^3 . После прямого масс-спектрометрического анализа пробы с концентратора в момент выхода пика воды интенсивность сигнала от метанола на массе 33 а.е.м. существенно снижалась. Применение хроматографического разделения воды и метанола дает возможность исключить снижение сигнала от метанола, что иллюстрируется на рис. 7Б, где приведена хроматограмма, демонстрирующая разделение воды и метанола после ввода пробы воздуха с влажностью 2.2 % объемом 150 см^3 , содержащей метанол.

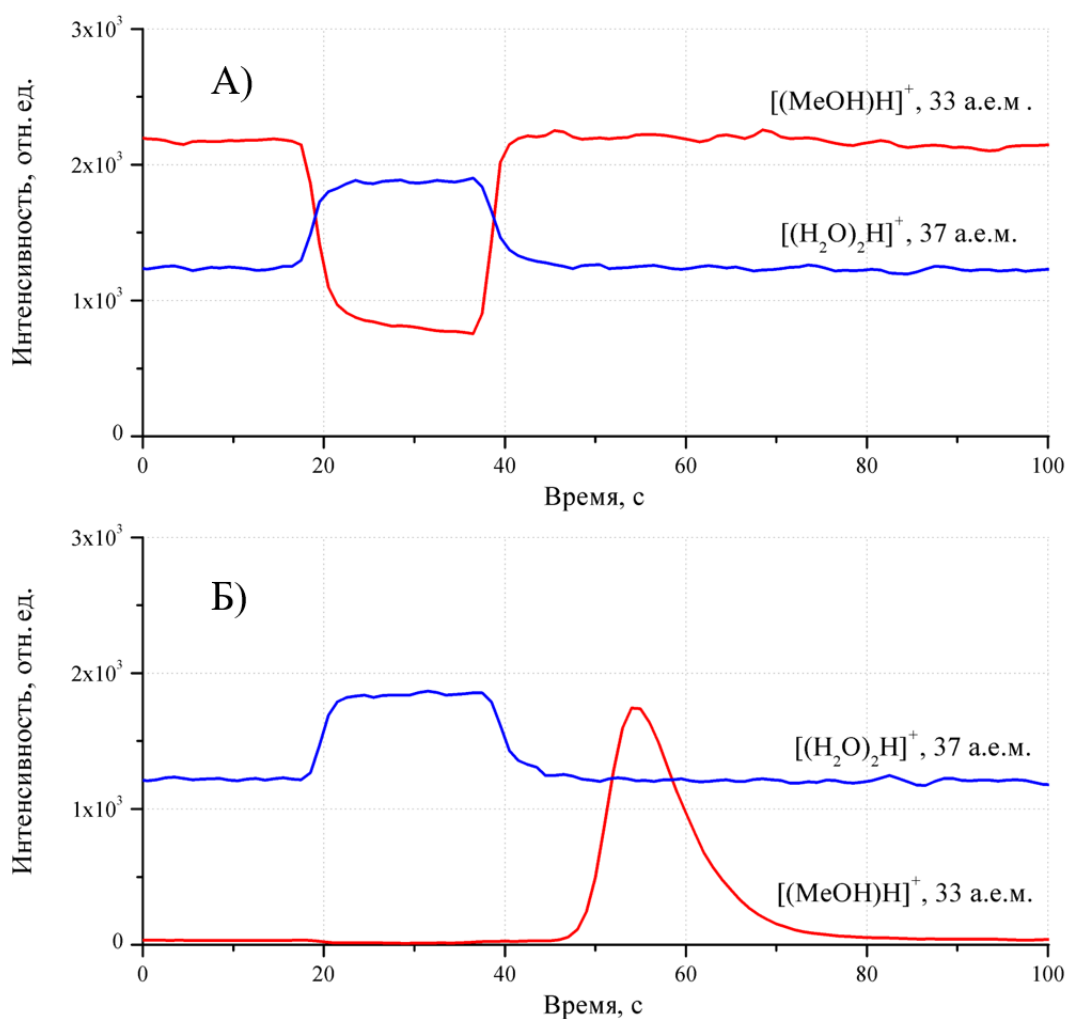


Рис. 7. А – влияние пика воды на эффективность ионизации метанола; Б – хроматограмма, демонстрирующая разделение метанола и воды

Расчет комбинированного изотопного состава

При проведении количественных расчетов изотопных характеристик углерода и водорода метильной группы и метана исходим из двух условий: 1) изотопные характеристики метильной группы в метаноле с точностью до изотопных эффектов отражают изотопные характеристики метана; 2) изотопные характеристики кислорода и водорода реагентов, участвующих в образовании метанола из метана, являются одинаковыми как в случае анализируемого метана, так и метана, используемого в качестве лабораторного стандарта, т. е. реакция проходит с постоянным изотопным эффектом для углерода и кислорода в анализируемом образце метана и стандартном образце.

Измеряя комбинированный изотопный состав протонированной молекулы метанола, т. е. отношение $^{34}\text{M}/^{33}\text{M}$, и, учитывая влияние присоединенных в ходе конверсии атомов, можно рассчитать комбинированный изотопный состав метильной группы исходного метана $^{16}\text{M}/^{15}\text{M}$. Комбинированный изотопный состав протонированного иона метанола $^{34}\text{M}/^{33}\text{M}$ связан с изотопным составом атомов, входящих в состав иона, следующим соотношением:

$$\frac{^{34}\text{M}}{^{33}\text{M}} = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} + 3 \cdot \frac{\text{D}}{\text{H}} + \frac{^{17}\text{O}}{^{16}\text{O}} + \frac{\text{D}}{\text{H}} + \frac{\text{D}}{\text{H}}, \quad (4)$$

что можно представить в виде суммы:

$$\frac{{}^{34}\text{M}}{{}^{33}\text{M}} = \frac{{}^{16}\text{M}}{{}^{15}\text{M}} + X, \quad (5)$$

где ${}^{16}\text{M}/{}^{15}\text{M}$ – комбинированный изотопный состав метильной группы молекулы метана; X – изотопный состав присоединенных атомов.

Для учета изотопного состава присоединенных атомов производят периодическую процедуру калибровки, включающую измерение калибровочного образца метана с известным комбинированным изотопным составом метильной группы молекулы метана ${}^{16}\text{M}$:

$$X = \left(\frac{{}^{34}\text{M}}{{}^{33}\text{M}} \right)_C - \left(\frac{{}^{16}\text{M}}{{}^{15}\text{M}} \right)_C, \quad (6)$$

где C – индекс величины, относящийся к калибровочному образцу.

Комбинированный изотопный состав метильной группы молекулы метана ${}^{16}\text{M}$ и его вариацию относительно стандартного образца $\delta^{16}\text{M}$ рассчитывают по следующим формулам:

$$\left(\frac{{}^{16}\text{M}}{{}^{15}\text{M}} \right)_A = \left(\frac{{}^{34}\text{M}}{{}^{33}\text{M}} \right)_A - X, \quad (7)$$

$$\delta^{16}\text{M}_A = \left(\frac{\left(\frac{{}^{16}\text{M}}{{}^{15}\text{M}} \right)_A}{\left(\frac{{}^{16}\text{M}}{{}^{15}\text{M}} \right)_R} - 1 \right) \times 1000 \text{‰}, \quad (8)$$

где A – индекс величины, относящийся к анализируемому образцу; R – индекс величины, относящийся к стандартному образцу.

При использовании в качестве эталонов изотопного отношения углерода и водорода, соответственно, PDB (Pee Dee Belemite): ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} = 1.1237 \cdot 10^{-2}$ и SMOW (Standard Mean Ocean Water): $\text{D}/\text{H} = 1.5576 \cdot 10^{-4}$ комбинированный изотопный состав $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$ связан с изотопным составом углерода и водорода $\delta^{13}\text{C}$ и δD следующей формулой:

$$\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3} = 0.960 \cdot \delta^{13}\text{C} + 0.0399 \cdot \delta\text{D} \quad (7)$$

На рисунке 8А приведена шкала $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$, нанесенная на диаграмму, характеризующую генетический тип метана по изотопному составу углерода и водорода $\delta^{13}\text{C}$ и δD , предложенную М. Витикаром [Whiticar, 1999]. На рисунках 8Б и 8В приведены диаграммы характеристики генетического типа по шкалам $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$, полученные как соответствующие проекции из рис. 8А. Из приведенных рисунков следует, что шкала $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$ может быть использована для характеристики источников метана так же, как традиционно используемая шкала $\delta^{13}\text{C}$. В то же время, для классификации, предложенной М. Витикаром, шкала $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$ лучше подходит для дифференциации термогенного метана (тип 3 на рис. 8) и бактериального метана, полученного в результате ферментативного брожения (тип 2 на рис. 8). По шкале $\delta^{13}\text{C}$ данные типы метана имеют область перекрытия вблизи значений -50‰ , в то же время по шкале $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$ они полностью разделяются значением -60‰ , ввиду того, что бактериальный метан данного типа характеризуется меньшим содержанием дейтерия.

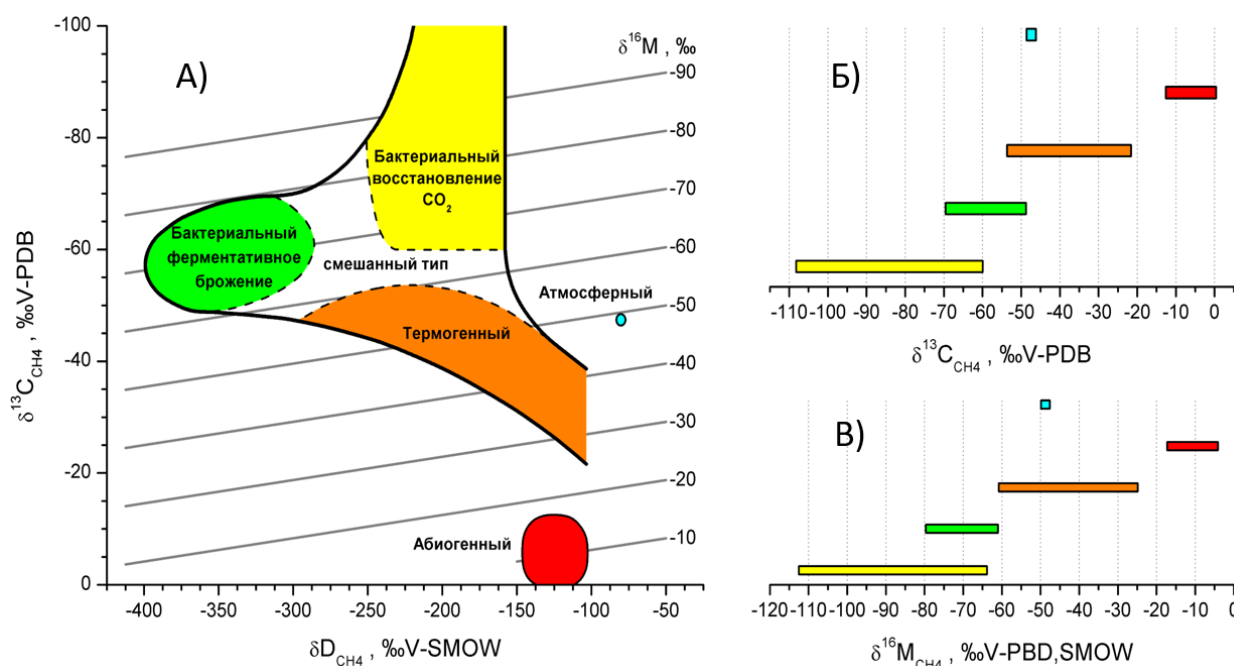


Рис. 8. А – диаграмма, характеризующая генетический тип метана по изотопному составу углерода и водорода $\delta^{13}\text{C}$ и δD (Whiticar, 1999), с нанесенной шкалой комбинированного изотопного состава $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$; Б – характеристика генетического типа метана по шкале $\delta^{13}\text{C}$; В – характеристика генетического типа метана по шкале $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что для изотопной характеристики метана с целью установления его генетического типа можно использовать в качестве продукта-аналита метанол, полученный в результате плазмохимической конверсии метана, а для измерения изотопных соотношений использовать масс-спектрометр с положительной ХИАД в коронном разряде. При этом используемая шкала комбинированного изотопного состава $\delta^{16}\text{M}_{\text{CH}_3}$ позволяет точнее дифференцировать термогенный и бактериальный метан по сравнению со шкалой $\delta^{13}\text{C}$. Предложенный подход к изотопному анализу метана существенно упрощает технологию генетической характеристики метана по сравнению с традиционной и позволяет в перспективе создать аппаратуру для выполнения внелабораторных измерений.

Экспериментально подтверждена техническая реализуемость основных стадий предлагаемого метода в малогабаритном устройстве: конверсию метана в метанол в коронном разряде; концентрирование метанола на сорбенте при нормальной температуре, не требующей вымораживания, хроматографическое разделение метанола и воды, ионизацию метанола и регистрацию характерных ионов для последующего расчета и изотопной характеристики метана.

Работа выполнена в рамках проекта Программы фундаментальных научных исследований РФ FWZZ-2022-0027 "Новые технологии внелабораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов".

ЛИТЕРАТУРА

Макась А.Л., Трошков М.Л., Кудрявцев А.С. Способ определения изотопного состава метана. Патент на изобретение 2461909, опубл. 20.09.2012.

- Hoeben W.F.L.M., Boekhoven W., Beckers F.J.C.M., van Heesch E.J.M., Pemen A.J.M.** Partial oxidation of methane by pulsed corona discharges // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – Vol. 47 (35). – 355202, doi: 10.1088/0022-3727/47/35/355202.
- Kebarle P.** Gas phase ion thermochemistry based on ion-equilibria from the ionosphere to the reactive centers of enzymes // *International Journal of Mass Spectrometry*. – 2000. – Vol. 200 (1–3). – P. 313–330, doi: 10.1016/S1387-3806(00)00326-2.
- Kudryavtsev A.S., Makas A.L., Troshkov M.L., Grachev M.L., Pod'yachev S.P.** The method for on-site determination of trace concentrations of methyl mercaptan and dimethyl sulfide in air using a mobile mass spectrometer with atmospheric pressure chemical ionization, combined with a fast enrichment/separation system // *Talanta*. – 2014. – Vol. 123. – P. 140–145, doi: 10.1016/j.talanta.2014.02.024.
- Makas A.L., Troshkov M.L., Kudryavtsev A.S., Lunin V.M.** Miniaturized mass-selective detector with atmospheric pressure chemical ionization // *Journal of Chromatography B*. – 2004. – Vol. 800 (1–2). – P. 63–67, doi: 10.1016/j.jchromb.2003.08.053.
- Nozaki T., Hattori A., Okazaki K.** Partial oxidation of methane using a microscale non-equilibrium plasma reactor // *Catalysis Today*. – 2004. – Vol. 98 (4). – P. 607–616, doi: 10.1016/j.cattod.2004.09.053.
- Qin T., Xu X.B., Polák T., Pacáková V., Štulík K., Jech L.** A simple method for the trace determination of methanol, ethanol, acetone and pentane in human breath and in the ambient air by preconcentration on solid sorbents followed by gas chromatography // *Talanta*. – 1997. – Vol. 44 (9). – P. 1683–1690, doi: 10.1016/S0039-9140(97)00073-8.
- Schoell M.** Multiple origins of methane in the Earth // *Chemical Geology*. – 1988. – Vol. 71 (1–3). – P. 1–10, doi: 10.1016/0009-2541(88)90101-5.
- Whiticar M.J.** Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // *Chemical Geology*. – 1999. – Vol. 161 (1–3). – P. 291–314, doi: 10.1016/S0009-2541(99)00092-3.

REFERENCES

- Hoeben W.F.L.M., Boekhoven W., Beckers F.J.C.M., van Heesch E.J.M., Pemen A.J.M.** Partial oxidation of methane by pulsed corona discharges // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – Vol. 47 (35). – 355202, doi: 10.1088/0022-3727/47/35/355202.
- Kebarle P.** Gas phase ion thermochemistry based on ion-equilibria from the ionosphere to the reactive centers of enzymes // *International Journal of Mass Spectrometry*. – 2000. – Vol. 200 (1–3). – P. 313–330, doi: 10.1016/S1387-3806(00)00326-2.
- Kudryavtsev A.S., Makas A.L., Troshkov M.L., Grachev M.L., Pod'yachev S.P.** The method for on-site determination of trace concentrations of methyl mercaptan and dimethyl sulfide in air using a mobile mass spectrometer with atmospheric pressure chemical ionization, combined with a fast enrichment/separation system // *Talanta*. – 2014. – Vol. 123. – P. 140–145, doi: 10.1016/j.talanta.2014.02.024.
- Makas A.L., Troshkov M.L., Kudryavtsev A.S., Lunin V.M.** Miniaturized mass-selective detector with atmospheric pressure chemical ionization // *Journal of Chromatography B*. – 2004. – Vol. 800 (1–2). – P. 63–67, doi: 10.1016/j.jchromb.2003.08.053.
- Makas A.L., Troshkov M.L., Kudryavtsev A.S.** Method of determination of isotopic methane composition. Patent No. 2461909, publ. 20.09.2012.

Nozaki T., Hattori A., Okazaki K. Partial oxidation of methane using a microscale non-equilibrium plasma reactor // *Catalysis Today*. – 2004. – Vol. 98 (4). – P. 607–616, doi: 10.1016/j.cattod.2004.09.053.

Qin T., Xu X.B., Polák T., Pacáková V., Štulík K., Jech L. A simple method for the trace determination of methanol, ethanol, acetone and pentane in human breath and in the ambient air by preconcentration on solid sorbents followed by gas chromatography // *Talanta*. – 1997. – Vol. 44 (9). – P. 1683–1690, doi: 10.1016/S0039-9140(97)00073-8.

Schoell M. Multiple origins of methane in the Earth // *Chemical Geology*. – 1988. – Vol. 71 (1–3). – P. 1–10, doi: 10.1016/0009-2541(88)90101-5.

Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // *Chemical Geology*. – 1999. – Vol. 161 (1–3). – P. 291–314, doi: 10.1016/S0009-2541(99)00092-3.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАКАСЬ Алексей Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка малогабаритной масс-спектрометрической аппаратуры для внелабораторного анализа следов органических веществ в сложных матрицах при решении задач специального химического контроля и поисковой геохимии.

КУДРЯВЦЕВ Андрей Сергеевич – научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: физика процессов образования, транспортировки и разделения ионов применительно к задачам создания малогабаритной масс-спектрометрической аппаратуры.

ТРОШКОВ Михаил Львович – ведущий инженер лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка полевой хромато-масс-спектрометрической аппаратуры для внелабораторного анализа



ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ЗАТУХАНИЯ ПО РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Н.К. Василенко^{1,2}, Г.М. Митрофанов^{1,2,3}, Н.А. Горевачев^{1,2}, Р.С. Кушнарв^{1,2}

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

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

³*Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия
e-mail: Vasilenkonikita.1997@mail.ru*

В работе рассматривается оценивание параметра затухания с применением метода спектральных отношений. На модельных и реальных данных показано, что для получения устойчивых оценок необходимо иметь максимально полную информацию о структурно-скоростных характеристиках среды. Также важным аспектом предварительной обработки данных является учет изменений формы сигнала, связанных со средой прохождения.

Обработка сейсмических данных, параметр затухания и его оценивание

PARTICULARS OF THE ATTENUATION PARAMETER DETERMINING FROM REAL DATA

N.K. Vasilenko¹, G.M. Mitrofanov^{1,2,3}, N.A. Goreyavchev^{1,2}, R.S. Kushnarev^{1,2}

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: Vasilenkonikita.1997@mail.ru*

The paper considers the estimation of the attenuation parameter using the method of spectral ratios. Based on model and real data, it is shown that in order to obtain stable estimates, it is necessary to have the most complete information about the structure-velocity characteristics of the medium. Also, an important aspect of data preprocessing is to take into account changes in the waveform associated with the transmission medium.

Seismic data processing, attenuation parameter and its estimation

ВВЕДЕНИЕ

Сложность и многомасштабность реальной среды определяет сложность регистрируемых колебаний. Для упрощения их анализа и интерпретации применяются различные процедуры обработки. Они позволяют разделить колебания на отдельные составляющие, к которым относятся и сигналы, обладающие определенной природой. Выделяемые составляющие облегчают переход от колебаний, наблюдаемых в реальном сейсмическом эксперименте, к характеристикам среды. Еще одним моментом, облегчающим интерпретацию сейсмических данных и построение на их основе характеристик среды, является параметризация выделяемых составляющих и, в частности, сигналов. Параметрами могут быть: времена, энергии, частоты, амплитуды и пр. Времена и энергии являются двумя наиболее распространенными и устойчивыми среди используемых параметров. Но, к сожалению, они не позволяют

полностью определить многие из интересующих нас характеристик среды, в частности, свойства пород. Таким образом, возникает потребность в использовании дополнительных параметров.

Одним из дополнительных параметров, полезных при изучении свойств среды, является затухание сейсмического сигнала [Полак, 1957; Knopoff, MacDonald, 1958; McDonald et al., 1958; O'Doherty, Anstey, 1971; Johnston et al., 1979; Авербух, 1982; Аки, Ричардс, 1983; Barton, 2007; Li et al., 2016]. Он показывает, как изменяется энергия сигнала по мере его распространения в среде. Уровень или величина затухания в проводимых физических и натурных экспериментах зависит от степени неупругости и масштаба неоднородности пород, через которые проходит сигнал [Futterman, 1962; Николаевский и др., 1970; Уайт и др., 1975; Johnston et al., 1979; Winkler and Nur, 1979; Уайт, 1986; Best et al., 1994; Cooper, 2002; Carcione and Picotti, 2006; Barton, 2007; Raji, 2013]. Следовательно, затухание, определяемое по сейсмическим данным, чувствительно ко многим практически важным характеристикам пород: наличию флюидов, степени насыщения пород флюидами, пористости, наличию трещин и/или каверн, давлению, а также к минеральному составу пород.

При определении параметра сейсмического затухания, соотнесенного с реальной геологической средой, необходимо учитывать, что он дает интегральную (обобщенную) характеристику. Она может быть связана с вероятностным распределением большого количества параметров, определяющих изучаемую среду, и степень ее воздействия на распространяющиеся упругие колебания. К таким параметрам относятся: напряжение, имеющееся в горных породах, термодинамические условия, пластовые давления, наличие и тип трещиноватости, расположение и заполнение поровых пространств, тип присутствующего флюида и степень насыщения им пород, макрогеометрия геологической среды, а также длина локализации (глубина проникновения), групповые и фазовые скорости волн. Поэтому результаты практического определения параметра затухания показывают, что его оценка и интерпретация являются не столь простыми, как это представляется при модельных математических расчетах [O'Doherty, Anstey, 1971; Ляховицкий, Рапопорт, 1972; Schoenberger, Levin, 1974; White, 1992; Kang, McMechan, 1994; Best et al., 1994; Dvorkin et al., 1995; Li et al., 2006; Priest et al., 2006; Reine et al., 2012; Cheng, 2013]. При всей важности затухания и его связи с указанными выше характеристиками геологической среды данный параметр все еще является мало изученным. Поэтому в настоящее время в мировой геофизике проявляется значительный интерес к вопросам оценивания и описания поведения затухания для различных моделей реальных сред.

В выполненном нами исследовании рассмотрены несколько вопросов, связанных с оцениванием параметра затухания по модельным и реальным данным. Один из основных вопросов был сформулирован следующим образом: «Почему в рамках модельных экспериментов удается получать значения параметра затухания, а при обработке реальных данных значения этого параметра обладают малой достоверностью?» Идея этого исследования была предложена сотрудником компании «Газпромнефть НТЦ» Ю.В. Павловским

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЗАТУХАНИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Существует значительное число методов оценивания параметра поглощения. Среди этих методов можно выделить два больших класса реализуемых: (1) во временной области и (2) в частотной области. Методы первого класса зачастую оказываются весьма чувствительными к помехам, поэтому при расчете поглощения чаще используются методы второго класса. Среди последних наиболее широко распространенным и часто используемым в литературе является метод спектральных отношений. Также

этот метод хорошо проявил себя в исследованиях, где было проведено численное сравнение десяти методов расчета величины обратной добротности на синтетических сейсмограммах вертикального сейсмического профилирования при наличии и в отсутствии шума (Тонн, 1991).

Метод спектральных отношений предполагает линейную зависимость коэффициента поглощения α , характеризующего изменение амплитуды регистрируемого сигнала от частоты: $\alpha = \gamma f$, что подтверждается экспериментальными данными (Knopoff, 1964; Jackson, Anderson, 1970; Toksöz et al., 1979). В этом случае величина добротности среды Q и обратная к ней величина Q^{-1} характеризующая поглощение и рассеяние энергии на фиксированной частоте, оказываются частотно независимыми. Здесь коэффициент γ равен $\frac{\pi Q^{-1}}{V}$, где V – скорость волны.

Имея амплитуды сигнала проходящей волны в двух точках рассматриваемой среды x_1 и x_2 и взяв отношение их амплитудных спектров, получим

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{G_2}{G_1} e^{-(\gamma_2 - \gamma_1)f \cdot x}, \quad (1)$$

где G_1 и G_2 включают в себя геометрические факторы: расхождение фронта, отражение волны и т. п., а $x = x_2 - x_1$. Перейдя к логарифму

$$\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) = -(\gamma_2 - \gamma_1)f \cdot x + \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right), \quad (2)$$

получаем, что при линейной аппроксимации отношения амплитудных спектров

$$\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \approx k \cdot f + b, \quad (3)$$

угол наклона k этой аппроксимации будет определять значение обратной добротности, а геометрическое расхождение, влияние вышележащей толщи на искомое значение не влияют. Нас интересует поглощение сигнала A_2 относительно исходного сигнала A_1 , поэтому мы можем предположить, что сигнал, отраженный от верхней границы целевого слоя, не был подвергнут поглощению, что влечет за собой γ_1 равно нулю. Таким образом

$$k = -\gamma_2 x = -\frac{\pi Q^{-1}(x_2 - x_1)}{V} = -\pi Q^{-1}(t_2 - t_1), \quad (4)$$

где t_1 – двойное время пробега до кровли анализируемого слоя, t_2 – двойное время пробега до подошвы анализируемого слоя. В итоге величина обратной добротности анализируемого слоя рассчитывается как

$$Q^{-1} = -\frac{k}{\pi(t_2 - t_1)}. \quad (5)$$

ТЕСТИРОВАНИЕ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Реализованный алгоритм оценки поглощения протестирован на синтетической модели данных ВСП. На рисунке 1 представлена двухслойная модель среды с заданными характеристиками среды:

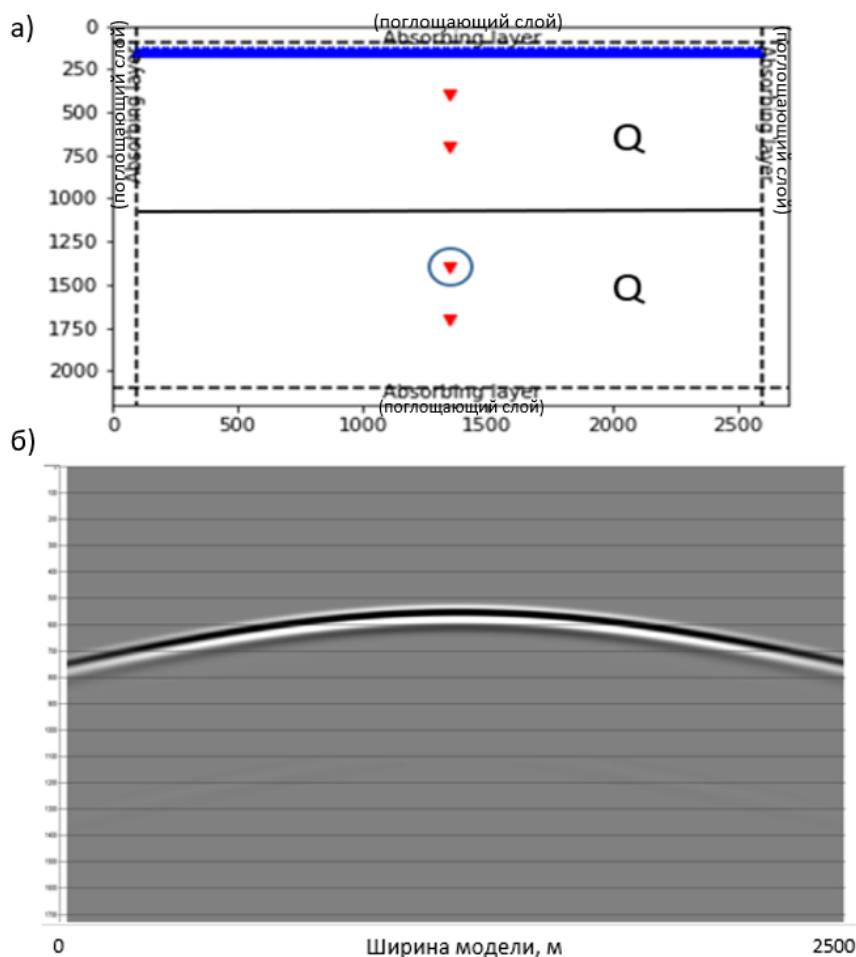
добротностью Q , скоростями продольных и поперечных волн V_p , V_s , плотностью ρ , приведенными в табл. 1. С целью получения исходного и поглощенного сигнала для метода спектральных поглощений модель использовалась дважды. При первом расчете получалась сейсмограмма без влияния поглощения среды. Второй расчет производился с учетом поглощения среды. Таким образом, при дальнейшем анализе было исключено любое влияние на сигнал, кроме поглощения среды.

Таблица 1

Характеристики модели среды

Глубина, м	ρ , г/см ³	V_p , м/с	V_s , м/с	Q
0–1000	2.06	2300	1000	1000
1000–2000	2.32	3700	1450	10

На рисунке 1, а синим обозначено положение приемников, красными треугольниками – источники. На рисунке 1, б представлена сейсмограмма, полученная для источника, обведенного синим кругом.

**Рис. 1.** Модель среды (а) и сейсмограмма (б)

Проведена оценка поглощения с учтенным пройденным расстоянием от источника до приемников на синтетических данных представленной модели (рис. 2). В результате ошибка метода на синтетических данных составила не более 5 %.

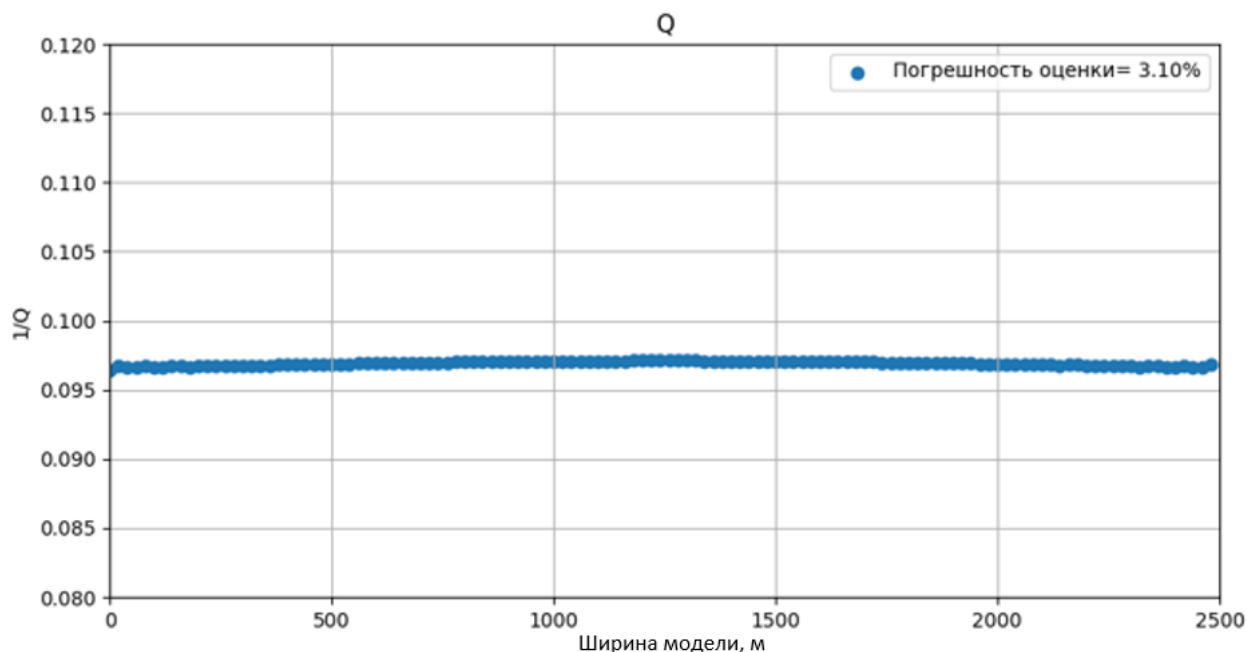


Рис. 2. Оценка поглощения в точках приема для синтетической модели среды

Таким образом, при известных параметрах модели и отсутствии помех, представленный способ оценки затухания можно считать достаточным для определения поглощения в целевом слое.

ТЕСТИРОВАНИЕ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для тестирования алгоритма на реальных данных были взяты данные морской сейсморазведки, прошедшие стандартную обработку и представленные результирующим временным разрезом (рис. 3). Выполненный нами анализ заголовков исходных трасс показал, что профиль собран из двух профилей, записанных в разные промежутки времени. Затем два профиля объединены в один, общий. Таким образом, половина данных, использованных для получения суммарного разреза, в большей или меньшей степени будут иметь разные начальные условия возбуждения сигналов, что не учитывалось при дальнейшей обработке. По нашему мнению, не учет этой особенности данных может негативно повлиять на точность определения динамических характеристик сигналов, к которым относится и параметр затухания. Такие факторы как измененная траектория луча, измененные источники и их положение могут оказать значительное влияние на разницу в оценке поглощения.

Нами был выполнен еще один элемент анализа данных, который состоял в следующем. Проведена операция спрямления сейсмограмм с использованием заданного скоростного закона. Процедура спрямления не до конца справилась с поставленной задачей и на больших удалениях имеются перегибы. Чтобы нивелировать неточность скоростного закона решено оценить поглощение при почти нормальном падении. В каждой сейсмограмме трассы с расстоянием источник–приемник до 200 м были просуммированы для получения одной устойчивой трассы. Таким образом, создан псевдоразрез, состоящий из осредненных на ближних удалениях трасс, не подвергавшийся никакой обработке, кроме спрямления сейсмограмм. На сейморазрезе выделено три предположительных горизонта на 300, 550 и 1100 секундах (см. рис. 3).

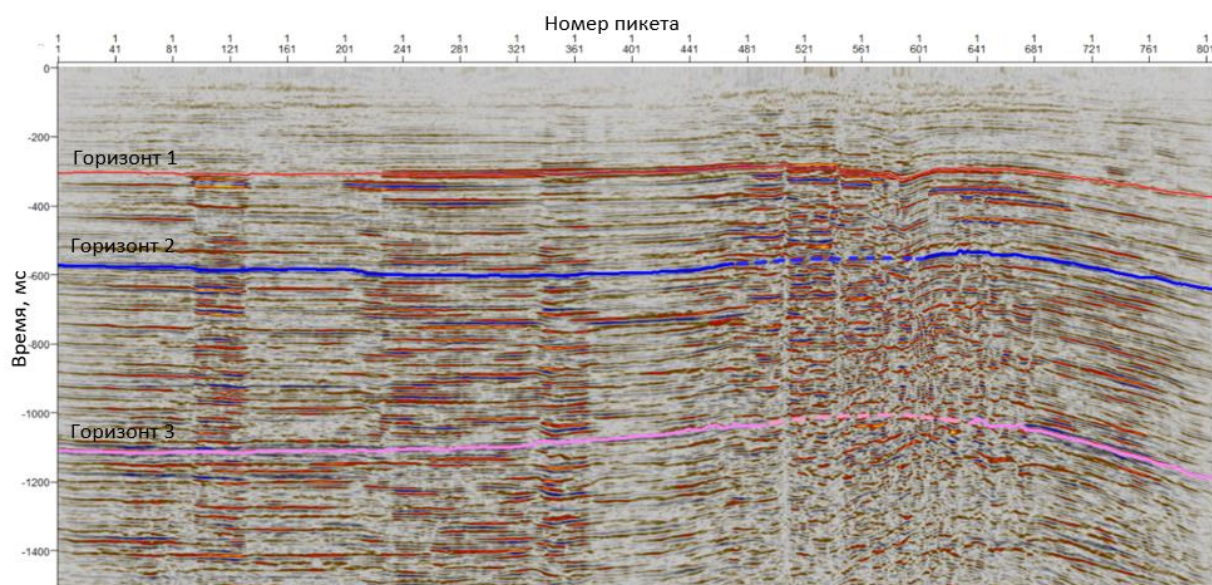


Рис. 3. Сейсморазрез с отслеженными горизонтами

В отличие от верхнего горизонта 1, горизонты 2 и 3 выделяются плохо, амплитудный спектр выглядит разрозненным (рис. 4), не наблюдается четкого сигнального купола. На пикетах 400–700 присутствует высокая волновая неустойчивость. Временные окна были выбраны таким образом, чтобы в анализ попали данные с максимальным количеством информации. Таким образом временные окна для трех горизонтов составили 54, 54 и 58 мс соответственно.

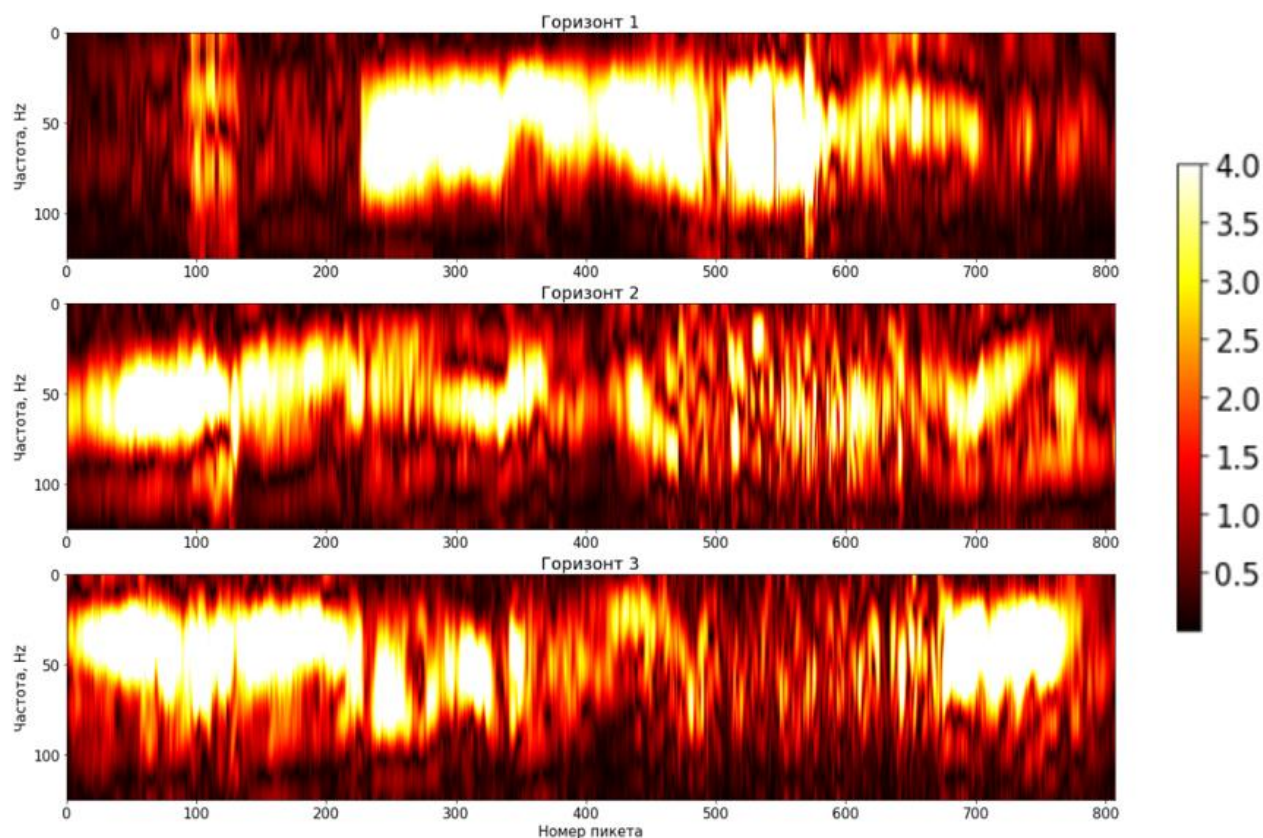


Рис. 4. Спектры сигналов отражения от прослеженных горизонтов

Как видно из иллюстраций спектров (см. рис. 4), на разных участках профиля присутствуют разные по частотному составу сигналы. Так, для горизонта 1 устойчивый сигнал проявляется на пикетах 220 и далее, тогда как для горизонта 2 устойчивый сигнал остается только до 360-го пикета. Спектры сигналов для горизонтов 2 и 3 на всем профиле хоть и имеют схожую структуру – устойчивую частотную составляющую в начале профиля и более размытую к середине – все же неоднородны и, следовательно, не подходят для такого чувствительного к помехам подхода. На пикетах 680–800 горизонт 1 не имеет явно прослеживаемого сигнала, хотя на горизонте 3 наблюдаются явные куполообразные спектры. Единственным участком, где представляется возможным проследить сигнал на всех трех горизонтах является пикетный диапазон 200–400. На рисунке 6 показаны графики, описывающие поглощение для трех пар горизонтов: 1–2, 2–3, 1–3. На рисунке убраны зоны неустойчивой корреляции сигнала (пикет 470–630). Присутствует отрицательное поглощение, потенциально вызванное зашумленностью спектров сигналов.

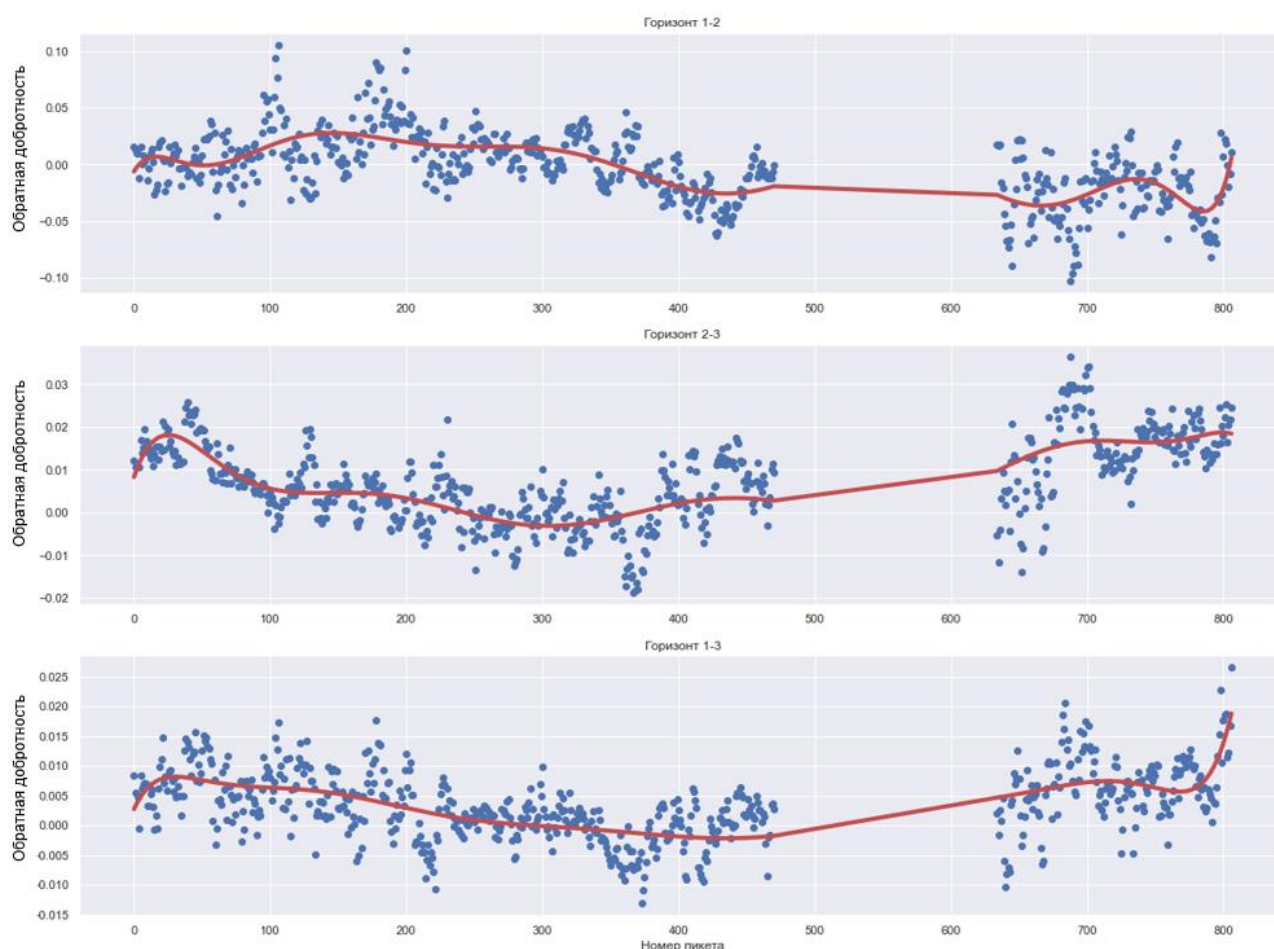


Рис. 5. Оценка поглощения сигналов для 3-х пар горизонтов

Виден разный характер поглощения на пикетах 100–350 для горизонтов 1 и 2. Аппроксимирующая кривая описывает выпуклую и вогнутую дугу, соответственно. Достоверно интерпретировать полученную аномалию невозможно ввиду неединственности обратной задачи и высокой неустойчивости получаемых оценок параметра затухания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельные данные, при наличии достоверной и полной информации о модели среды, позволяют оценивать параметр поглощения с высокой степенью надежности. Однако при работе с реальными данными, предложенными для тестирования разработанной процедуры, нами были получены результаты, которые нельзя назвать успешными.

Дополнительный анализ представленных данных показал, что отсутствовала углубленная динамическая обработка исходной сейсмической информации. В результате для достаточно сложной волновой картины не проводилась корректировка спектральных характеристик сигналов, с учетом особенностей верхней части разреза. Таким образом, не удалось избавиться от всех особенностей волнового поля, которые не позволяют с должной точностью оценить поглощение.

В то же время, несмотря на недостаточность обработки динамики, сложности применения метода к имеющимся материалам, о чем свидетельствует большая дисперсия конечных результатов, можно отметить, что по полученным результатам выявляются трендовые составляющие в значениях параметра поглощения. Более того, наблюдаемая высокая вариабельность в полученных оценках параметра затухания может свидетельствовать о сложной геологической картине исследуемого участка. Отмеченные особенности указывают на необходимость привлечения дополнительной априорной информации об объектах исследования, в частности, данных ГИС.

Выражаем благодарность рецензенту Ю.И. Колесникову, замечания и комментарии которого способствовали существенному улучшению статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту FWZZ-2022-0017 “Сейсмические методы для изучения разномасштабных геологических процессов” ИНГГ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Авербух А.Г.** Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. – М.: Недра, 1982. – 232 с.
- Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология. Теория и методы. – М.: Мир, 1983. – Т. 1, 520 с.
- Ляховицкий Ф.М., Рапопорт Л.И.** Применение теории Френкеля-Био для расчета скоростей и поглощения упругих волн в насыщенных пористых средах // Прикладная геофизика. – 1972. – № 66. – С. 52–64.
- Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.** Механика насыщенных пористых сред. – М.: Недра, 1970. – 339 с.
- Полак Л.С.** Ослабление и поглощение отраженных волн в осадочных породах // Прикладная геофизика. – 1957. – № 17. – С. 16–32.
- Уайт Д.Е., Михайлова Н.Г., Ляховицкий Ф.М.** Распространение сейсмических волн в слоистых средах, насыщенных жидкостью и газом // Известия академии наук СССР. Сер. Физика Земли. – 1975. – № 10. – С. 44–52.
- Уайт Дж.Э.** Возбуждение и распространение сейсмических волн. – М.: Недра, 1986. – 261 с.
- Barton N.** Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation, and Anisotropy. – Taylor & Francis, London, 2007. – 729 p.
- Best A.I., McCann C., Sothcott J.** The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks // Geophysical Prospecting. – 1994. – Vol. 42. – P. 151–178, doi: 10.1111/j.1365-2478.1994.tb00204.x.
- Carcione J.M., Picotti S.** P-wave seismic attenuation by slow wave diffusion: Effects of inhomogeneous rock properties // Geophysics. – 2006. – Vol. 71 (3). – P. O1–O8, doi: 10.1190/1.2194512.

- Cheng P.** Anelastic attenuation in seismic data: modeling, measurement, and correction. PhD Thesis. – University of Calgary, 2013, <https://prism.ucalgary.ca/items/8db0e3b9-7d61-4e64-a41a-af7c6395053c>.
- Cooper R.F.** Seismic wave attenuation: energy dissipation in viscoelastic crystalline solids // *Plastic Deformation in Minerals and Rocks: Review of Mineralogy and Geochemistry*. – Mineralogical Society of America, 2002. – Vol. 51. – P. 253–290, doi: 10.2138/gsrmg.51.1.253.
- Dvorkin J., Mavko G., Nur A.** Squirt flow in fully saturated rocks // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60. – P. 97–107, doi: 10.1190/1.1443767.
- Futterman W.I.** Dispersive body waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1962. – Vol. 67 (13). – P. 5279–5291, doi: 10.1029/JZ067i013p05279.
- Jackson D.D., Anderson D.L.** Physical mechanisms of seismic-wave attenuation // *Reviews of Geophysics*. – 1970. – Vol. 8 (1). – P. 1–63, doi: 10.1029/RG008i001p00001.
- Johnston D.H., Toksöz M.N., Timur A.** Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (4). – P. 691–711, doi: 10.1190/1.1440970.
- Kang I.B., McMechan G.A.** Separation of intrinsic and scattering Q based on frequency-dependent amplitude ratios of transmitted waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99. – P. 23875–23885, doi: 10.1029/94JB02472.
- Knopoff L.** Q // *Reviews of Geophysics*. – 1964. – Vol. 2. – P. 625–660, doi: 10.1029/RG002i004p00625.
- Knopoff L., MacDonald G.J.** Attenuation of small amplitude stress waves in solids // *Review of Modern Physics*. – 1958. – Vol. 30. – P. 1178–1192.
- Li F., Verma S., Zhao T., Marfurt K.J.** Seismic attenuation attributes with its applications on conventional and unconventional reservoirs // *Interpretation*. – 2016. – Vol. 4 (1). – P. SB63–SB77, doi: 10.1190/INT-2015-0105.1.
- Li H., Zhao W., Cao H., Yao F., Shao L.** Measures of scale based on the wavelet scalogram with applications to seismic attenuation // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71 (5). – P. V11–V118, doi: 10.1190/1.2211529.
- McDonal F.J., Angona F.A., Mills R.L., Sengbush R.L., van Nostrand R.G., White J.E.** Attenuation of shear and compressional waves in Pierre shale // *Geophysics*. – 1958. – Vol. 23 (3). – P. 421–439, doi: 10.1190/1.1438489.
- O'Doherty R.F., Anstey N.A.** Reflections on amplitudes // *Geophysical Prospecting*. – 1971. – Vol. 19 (3). – P. 430–458, doi: 10.1111/j.1365-2478.1971.tb00610.x.
- Priest J.A., Best A.I., Clayton C.R.I.** Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand // *Geophysical Journal International*. – 2006. – Vol. 164 (1). – P. 149–159, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02831.x.
- Raji W.O.** The use of seismic attenuation to indicate saturation in hydrocarbon reservoirs: Theoretical study and modelling approach // *Advances in Applied Science Research*. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 45–53.
- Reine C., Clark R., van der Baan M.** Robust prestack Q -determination using surface seismic data: Part 1 — Method and synthetic examples // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77 (1). – P. R45–R56, doi: 10.1190/geo2011-0073.1.
- Schoenberger M., Levin F.K.** Apparent attenuation to intrabed multiples // *Geophysics*. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 278–291, doi: 10.1190/1.1440427.
- Tonn R.** The determination of seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods // *Geophysical Prospecting*. – 1991. – Vol. 39 (1). – P. 1–27, doi: 10.1111/j.1365-2478.1991.tb00298.x.
- Toksöz M.N., Johnston D.H., Timur A.** Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (4). – P. 681–690, doi: 10.1190/1.1440969.

White R.E. The accuracy of estimating Q from seismic data // *Geophysics*. – 1992. – Vol. 57 (11). – P. 1508–1511, doi: 10.1190/1.1443218.

Winkler K.W., Nur A. Pore fluids and seismic attenuation in rocks // *Geophysical Research Letters*. – 1979. – Vol. 6 (1). – P. 1–4, doi: 10.1029/GL006i001p00001.

REFERENCES

Aki K., Richards P.G. *Quantitative Seismology*. – 2nd edition. – University Science Book, 2003. – 700 p.

Averbukh A.G. *Study of the Composition and Properties of Rocks during Seismic Exploration*. – Nedra, Moscow, 1982. – 232 p.

Barton N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation, and Anisotropy*. – Taylor & Francis, London, 2007. – 729 p.

Best A.I., McCann C., Sothcott J. The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks // *Geophysical Prospecting*. – 1994. – Vol. 42. – P. 151–178, doi: 10.1111/j.1365-2478.1994.tb00204.x.

Carcione J.M., Picotti S. P-wave seismic attenuation by slow wave diffusion: Effects of inhomogeneous rock properties // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71 (3). – P. O1–O8, doi: 10.1190/1.2194512.

Cheng P. *Anelastic attenuation in seismic data: modeling, measurement, and correction*. PhD Thesis. – University of Calgary, 2013, <https://prism.ucalgary.ca/items/8db0e3b9-7d61-4e64-a41a-af7c6395053c>.

Cooper R.F. *Seismic wave attenuation: energy dissipation in viscoelastic crystalline solids* // *Plastic Deformation in Minerals and Rocks: Review of Mineralogy and Geochemistry*. – Mineralogical Society of America, 2002. – Vol. 51. – P. 253–290, doi: 10.2138/gsrmg.51.1.253.

Dvorkin J., Mavko G., Nur A. Squirt flow in fully saturated rocks // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60. – P. 97–107, doi: 10.1190/1.1443767.

Futterman W.I. Dispersive body waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1962. – Vol. 67 (13). – P. 5279–5291, doi: 10.1029/JZ067i013p05279.

Jackson D.D., Anderson D.L. Physical mechanisms of seismic-wave attenuation // *Reviews of Geophysics*. – 1970. – Vol. 8 (1). – P. 1–63, doi: 10.1029/RG008i001p00001.

Johnston D.H., Toksöz M.N., Timur A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (4). – P. 691–711, doi: 10.1190/1.1440970.

Kang I.B., McMechan G.A. Separation of intrinsic and scattering Q based on frequency-dependent amplitude ratios of transmitted waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99. – P. 23875–23885, doi: 10.1029/94JB02472.

Knopoff L. Q // *Reviews of Geophysics*. – 1964. – Vol. 2. – P. 625–660, doi: 10.1029/RG002i004p00625.

Knopoff L., MacDonald G.J. Attenuation of small amplitude stress waves in solids // *Review of Modern Physics*. – 1958. – Vol. 30. – P. 1178–1192.

Li F., Verma S., Zhao T., Marfurt K.J. Seismic attenuation attributes with its applications on conventional and unconventional reservoirs // *Interpretation*. – 2016. – Vol. 4 (1). – P. SB63–SB77, doi: 10.1190/INT-2015-0105.1.

Li H., Zhao W., Cao H., Yao F., Shao L. Measures of scale based on the wavelet scalogram with applications to seismic attenuation // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71 (5). – P. V11–V118, doi: 10.1190/1.2211529.

Lyakhovitsky F.M., Rapoport L.I. Application of the Frenkel-Bio theory to calculate the velocities and absorption of elastic waves in saturated porous media // *Prikladnaya Geofizika*. – 1972. – Vol. 66. – P. 52–64.

- McDonal F.J., Angona F.A., Mills R.L., Sengbush R.L., van Nostrand R.G., White J.E.** Attenuation of shear and compressional waves in Pierre shale // *Geophysics*. – 1958. – Vol. 23 (3). – P. 421–439, doi: 10.1190/1.1438489.
- Nikolaevsky V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T., Zotov G.A.** *Mechanics of Saturated Porous Media*. – M.: Nedra, 1970. – 339 p.
- O'Doherty R.F., Anstey N.A.** Reflections on amplitudes // *Geophysical Prospecting*. – 1971. – Vol. 19 (3). – P. 430–458, doi: 10.1111/j.1365-2478.1971.tb00610.x.
- Polak L.S.** Attenuation and absorption of reflected waves in sedimentary rocks // *Prikladnaya Geofizika*. – 1957. – Vol. 17. – P. 16–32.
- Priest J.A., Best A.I., Clayton C.R.I.** Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand // *Geophysical Journal International*. – 2006. – Vol. 164 (1). – P. 149–159, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02831.x.
- Raji W.O.** The use of seismic attenuation to indicate saturation in hydrocarbon reservoirs: Theoretical study and modelling approach // *Advances in Applied Science Research*. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 45–53.
- Reine C., Clark R., van der Baan M.** Robust prestack Q-determination using surface seismic data: Part 1–Method and synthetic examples // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77 (1). – P. R45–R56, doi: 10.1190/geo2011-0073.1.
- Schoenberger M., Levin F.K.** Apparent attenuation to intrabed multiples // *Geophysics*. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 278–291, doi: 10.1190/1.1440427.
- Toksöz M.N., Johnston D.H., Timur A.** Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (4). – P. 681–690, doi: 10.1190/1.1440969.
- Tonn R.** The determination of seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods // *Geophysical Prospecting*. – 1991. – Vol. 39 (1). – P. 1–27, doi: 10.1111/j.1365-2478.1991.tb00298.x.
- White D.E., Mikhailova N.G., Lyakhovitsky F.M.** Propagation of seismic waves in layered media saturated with liquid and gas // *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Ser. Fizika Zemli*. – 1975. – Vol. 10. – P. 44–52.
- White J.E.** *Seismic Wave Propagation*. – SEG, 2000, doi: 10.1190/1.9781560802471. – 395 p.
- White R.E.** The accuracy of estimating Q from seismic data // *Geophysics*. – 1992. – Vol. 57 (11). – P. 1508–1511, doi: 10.1190/1.1443218.
- Winkler K.W., Nur A.** Pore fluids and seismic attenuation in rocks // *Geophysical Research Letters*. – 1979. – Vol. 6 (1). – P. 1–4, doi: 10.1029/GL006i001p00001.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЕНКО Никита Константинович – инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, аспирант Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки сейсмических данных.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, 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.

ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка технологий обработки сейсмических данных.

КУШНАРЕВ Роман Сергеевич – инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, магистрант Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: разработка программных средств обработки сейсмических данных.



ОПЫТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИБОРОВОГО МАССИВА ПРИ ОТКРЫТОЙ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.С. Полозов¹, А.И. Быкадоров², А.С. Харламов², А.В. Зайцев³

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

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

²ООО «Сибирский институт геотехнических исследований»,

653000, Кемеровская область, Прокопьевск, ул. Карла Либкнехта, 4, оф. 210, Россия,

³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, Россия,

e-mail: i386@ngs.ru

В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой сейсмологического оборудования и программного обеспечения, применительно к изучению сейсмической эмиссии, как предвестника деструктивных деформаций борта угольного карьера. Приводятся примеры записей типичных сейсмических воздействий. Показаны применяемые при обработке записей алгоритмы фильтрации и выделения событий.

Сейсмическая эмиссия, сейсмический регистратор, мониторинг борта карьера

EXPERIENCE OF EXPERIMENTAL RECORDING OF SEISMIC EMISSION OF THE SIDE ARRAY DURING OPEN MINING OF COAL DEPOSITS

S.S. Polozov¹, A.I. Bykadorov², A.S. Kharlamov², A.V. Zaitsev³

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

²Siberian Institute of Geotechnical Researches, Karla Libnekhta Str., 4, 210,

Prokopievsk, Kemerovo Region, 653000, Russia,

³Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya Str., 4/1,

Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: i386@ngs.ru

The article deals with issues related to the development of seismological equipment and software, in relation to the study of seismic emission as a harbinger of destructive deformations of the side of a coal quarry. Examples of recordings of typical seismic impacts are given. The filtering and event selection algorithms used in the processing of records are shown.

Seismic emission, seismic recorder, monitoring of the side of the quarry

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом является устойчивость бортов карьеров. С нею связаны безопасность работ, вопросы технологии, предельные углы наклона бортов, предельная глубина отработки месторождений.

Основой инженерных методов оценки устойчивости откосов бортов и требований к инженерно-геологической изученности месторождений явилось многолетнее изучение оползневых явлений, возникающих на карьерах. Определение характера деформаций откосов, их причин и условий возникновения – основное при разработке мероприятий по предотвращению деформаций, изучение которых осуществляется путем постановки инструментальных наблюдений (как правило, маркшейдерских) на бортах карьеров (разрезов) и изучения инженерно-геологических условий деформирующихся участков. Работами прошлых лет [Фисенко, 1965] установлено, что даже в скальных породах опасным деформациям предшествуют длительно развивающиеся микродеформации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Деформационные процессы связаны с перераспределением напряженного состояния массива горных пород в результате разработки месторождения, что порождает локальные техногенные изменения в его структуре. Эти изменения ведут к увеличению числа микросейсмических событий, которые возможно зарегистрировать соответствующим геофизическим оборудованием (сейсмостанцией). Можно дать обобщенное определение сейсмической эмиссии как составляющей сейсмического фона, имеющей эндогенное происхождение. Такое определение не исключает существование целого класса явлений, сопровождающихся слабым сейсмическим излучением, которое может иметь различные механизмы генерации [Володин и др., 2014]. Авторы статьи предполагают, что рост сейсмической эмиссии является предвестником деструктивных нарушений грунта, повышающих вероятность неблагоприятного развития событий, в т. ч. возникновения аварийных ситуаций при разработке пласта. Здесь можно провести аналогию с форшоками – слабыми землетрясениями, произошедшими до деформации грунтового массива, являющейся причиной основного землетрясения. Применяя соответствующую постобработку сейсмических записей, можно выделить эти локальные сейсмические события и определить частоту их проявления.

Точное определение координат сейсмических явлений является важнейшей необходимостью, поскольку вся следующая обработка сейсмологических данных в определенной степени зависит от местоположения явления, а также от расстояния до станций [Мулев и др., 2011]. На данном этапе работ, авторами не налажена сеть станций на угольном месторождении, поэтому координаты микросейсмических событий не определялись, речь идет лишь о возможности выделения событий без количественных оценок параметров микросейсм, таких как сейсмический момент и сейсмическая энергия, необходимых для определения деструктивных зон.

АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Запись сейсмических колебаний проводилась с помощью переносного регистратора Sibgeo-AM (рис. 1), разработанного на базе ООО «Сибирский институт геотехнических исследований». Регистратор сертифицирован, налажено мелкосерийное производство.

Регистратор построен на основе 24-х разрядных АЦП (3 канала записи), имеет в своем составе навигационный приемник для определения текущего местоположения и времени, а также Wi-Fi и 3G/4G модули. Запись отсчетов АЦП производится на microSD карту. Примененные в конструкции АЦП являются по своей сути front end схемами, то есть совмещают в одном корпусе аналоговую (PGA) и цифровую (АЦП) части, что позволяет задавать различные коэффициенты усиления и различные частоты дискретизации.

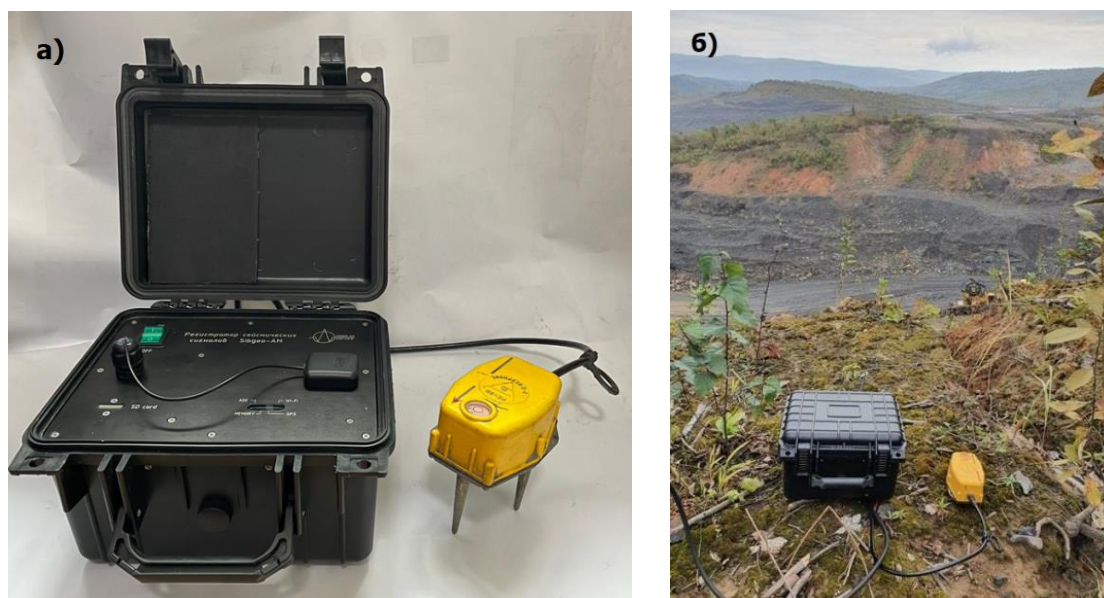


Рис. 1. а – Общий вид регистратора Sibgeo-AM с трехкомпонентным сейсмоприемником, изготовленным на основе геофонов SM-6 (производитель SENSOR Nederland bv); б – сейсмический регистратор Sibgeo-AM, установленный на борту угольного карьера

Примененные геофоны SM-6 (производитель SENSOR Nederland bv) имеют частоту собственных колебаний 4.5 Гц, коэффициент электромеханической связи 28.8 В/м/с и коэффициент демпфирования 0.6. Наличие 3G/4G и Wi-Fi модулей позволяет удаленно получать записи регистратора, если станция находится в пределах зоны покрытия сети соответствующего типа связи.

Сейсмостанция Sibgeo-AM, по сравнению с аналогичной аппаратурой, является относительно недорогим в сборке устройством. Также есть возможность объединять такие регистраторы в единую сеть. Это позволяет организовывать локальные сети сейсмических наблюдений на месторождениях, не выходя за рамки имеющегося бюджета.

Для просмотра и требуемой математической обработки была написана специализированная программа на языке Java Script. Сбор сейсмических данных осуществляется на сервер с помощью написанной на языке Python программы-сервера. Микроконтроллер STM32F405, использованный в разработке, имеет в своем составе уникальный идентификационный номер, который также передается станцией, что позволяет различать регистраторы в сети между собой.

Необходимость написания проприетарного ПО обусловлена в первую очередь наличием собственного формата станции, ее техническими характеристиками, а также требованиями к приему данных и их хранению. Известное авторам имеющееся в свободном доступе ПО, предназначенное для визуализации и обработки сейсмических записей, не подходит по этим параметрам.

Запись данных на сейсмостанции ведется покадрово, кадры имеют сквозную нумерацию и следуют один за другим. Каждый кадр – это определенная структура, содержащая в себе заголовок и оцифрованные данные сейсмометра. Объем этих сейсмических данных достаточно велик, поэтому для ускорения навигации по записи, а также для лучшего понимания сейсмической картины в целом, предусмотрен просмотр сейсмики с предварительной обработкой. В первую очередь эта предварительная обработка состоит в том, что из каждого кадра записи (1813 отсчетов) выбирается максимальное значение модуля записи и в базу данных записывается только оно и оно же отображается на навигационном

графике. Такой подход позволяет кардинально повысить скорость просмотра данных, а также повышает удобство навигации по записи – здесь мы сразу видим участки записи с повышенным уровнем сейсмических колебаний, которые и представляют основной интерес в плане решения геотехнологических задач. Для просмотра детальной записи геофонов данные берутся непосредственно из исходных двоичных файлов записи.

Следует различать причины, ведущие к росту сейсмического сигнала. В основном их можно разделить на две группы: ударные воздействия (взрывы, обрушения, землетрясения) и движение транспорта.

На рисунке 2 отображено типичное ударное воздействие с близкорасположенным источником колебаний. Оно имеет резкое первое вступление и в то же время можно заметить, что сейсмические волны не успели разделиться по типам, что свидетельствует о малом расстоянии источник–приемник. График на рис. 2, а – это выборка по максимуму модулей (одна точка на графике – один кадровый максимум), а рис. 2, б – это детальное отображение кадра записи (одна точка – один отсчет АЦП). Учтены калибровочные коэффициенты регистратора и сейсмоприемников, что позволяет просматривать запись в единицах, имеющих реальную физическую размерность (мкм/с).



Рис. 2. Ударное воздействие с близкорасположенным источником колебаний: а – навигационный интерактивный график с отображениями кадровых максимумов; б – детальное отображение сейсмической записи

При колебаниях, вызванных движением транспорта (рис. 3), наблюдается плавное возрастание сейсмического сигнала, несвойственное ударным воздействиям, что позволяет уверенно отличить их от колебаний, вызванных источниками импульсного характера.

Источником, порождающим самые низкочастотные и продолжительные по времени колебания, являются взрывы и землетрясения. На рисунке 4 отображена запись начала землетрясения с близкорасположенным от местоположения станции эпицентром. Землетрясение произошло 2 ноября 2022 года в 6:29 в районе Междуреченска. Информация о времени и расположении эпицентра этого землетрясения была взята из оперативного сообщения о сейсмических событиях АСФ ФИЦ ЕГС РАН.

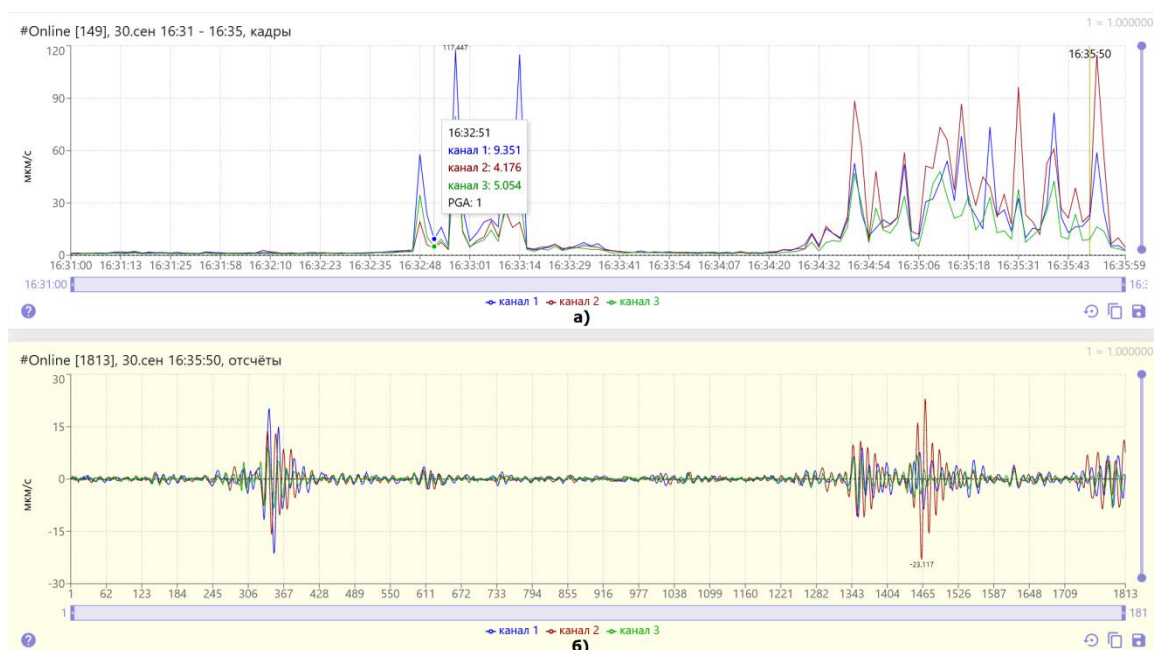


Рис. 3. Колебания, вызванные движением транспорта: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б – детальное отображение сейсмической записи

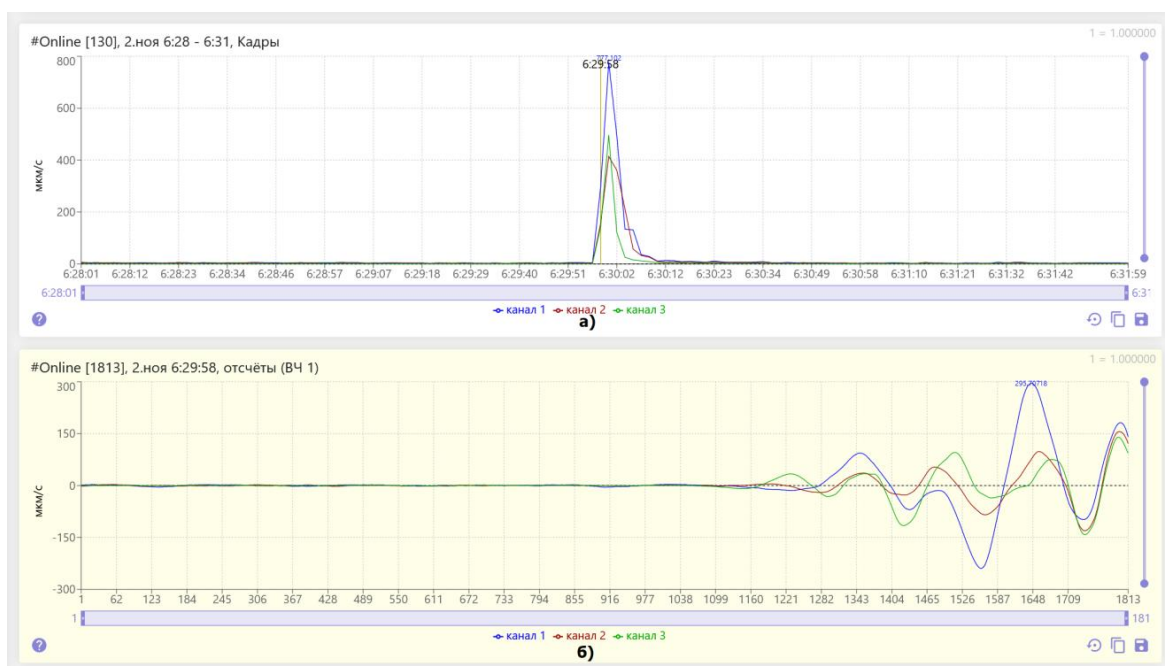


Рис. 4. Сейсмическая запись начала землетрясения: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б – детальное отображение сейсмической записи

Деформации, порождающие сейсмическую эмиссию, вызванную разрушением горного массива при добыче угля, носят, в основном, локальный характер. Как показывает опыт авторов статьи – это некий «треск», импульсные, сравнительно высокочастотные в масштабах сейсмологии колебания. Поэтому для их выделения логично в первую очередь воспользоваться ВЧ фильтром. Был использован ВЧ фильтр Баттерворта четвертого порядка с частотой среза 150 Гц, реализованный в виде БИХ фильтра (фильтра с бесконечной импульсной характеристикой). Конечно-разностные уравнения, описывающие поведение такого фильтра, имеют следующий вид:

$$A = 2e^{-2d_1\omega_0\Delta t} \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2}) + 2e^{-2d_2\omega_0\Delta t} \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}),$$

$$B = e^{-2d_1\omega_0\Delta t} + e^{-2d_2\omega_0\Delta t} + 4e^{-\omega_0\Delta t(d_1+d_2)} \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2}) \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}),$$

$$C = 2e^{-\omega_0\Delta t(2d_1+d_2)} \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}) + 2e^{-\omega_0\Delta t(2d_2+d_1)} \cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2}),$$

$$D = e^{-2\omega_0\Delta t(d_1+d_2)},$$

$$x_n = Ax_{n-1} - Bx_{n-2} + Cx_{n-3} - Dx_{n-4} + (1 - A + B - C + D) \left(\frac{f_d}{2\pi f_0} \right)^4 (f_n - 4f_{n-1} + 6f_{n-2} - 4f_{n-3} + f_{n-4}),$$

где A, B, C, D – постоянные фильтра, ω_0, f_0 – частота среза фильтра, $\Delta t, f_d$ – интервал и частота дискретизации, d_1, d_2 – коэффициенты демпфирования фильтра, x_n – выходные значения фильтра, f_n – входные значения фильтра.

Разностные уравнения получены с использованием частного случая способа инвариантности импульсной реакции – методом подбора корней [Смит, 1980].

В полученном рекуррентном соотношении последующие выходные значения зависят от предыдущих, следовательно, их внутреннее представление и арифметические операции с ними должны иметь достаточно большую разрядность, дабы избежать накопления систематической ошибки при вычислениях. Реализация языка программирования JavaScript, использованная авторами статьи, такую точность обеспечивает.

Рассмотрение и учет при расчете сейсмической эмиссии более низкочастотных колебаний нецелесообразны, так как благодаря самой физической модели распространения упругих волн высокие частоты колебаний, вызванные удаленными от расположения сейсмостанции источниками, быстро затухают. Следовательно, после фильтрации в записи останутся только высокочастотные компоненты локальных событий, которые и представляют интерес в рамках части решаемой задачи. Однако для выделения взрывов и землетрясений, следует воспользоваться НЧ фильтром.

Для выделения отдельных импульсных событий из общего микросейсмического фона авторы воспользовались известным в сейсмологии алгоритмом STA/LTA (Short Time Average/Long Time Average), который представляет собой вычисление параметра SNR (Signal to Noise Ratio):

$$STA_k = \frac{1}{N_{STA}} \sum_{i=1}^{N_{STA}} |f_{k+i}|,$$

$$LTA_k = \frac{1}{N_{LTA}} \sum_{i=1}^{N_{LTA}} |f_{k-i}|,$$

$$SNR_k = \frac{STA_k}{LTA_k}.$$

В случае превышения порогового значения STA/LTA событие считается обнаруженным [Allen, 1982]. При обнаружении отдельных импульсных событий, связанных с сейсмической эмиссией, становится

возможным их подсчет и последующее вычисление частоты их проявления. На рисунке 5 отображены кадровые максимумы за промежуток времени, при котором сейсмическая эмиссия имела повышенный уровень, данные показаны без фильтрации.

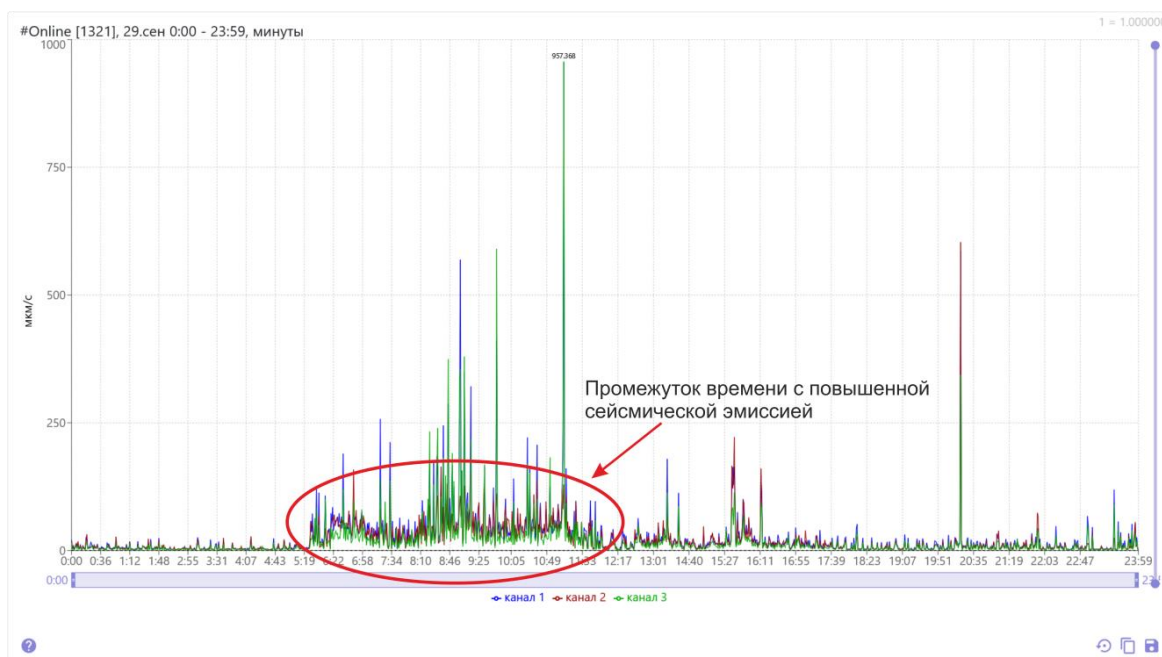


Рис. 5. Повышение сейсмической эмиссии относительно фоновых значений, кадровые максимумы

После применения ВЧ фильтра с частотой среза 150 Гц и обработки результата фильтрации по алгоритму STA/LTA можно выделить отдельные микросейсмические события (рис. 6).

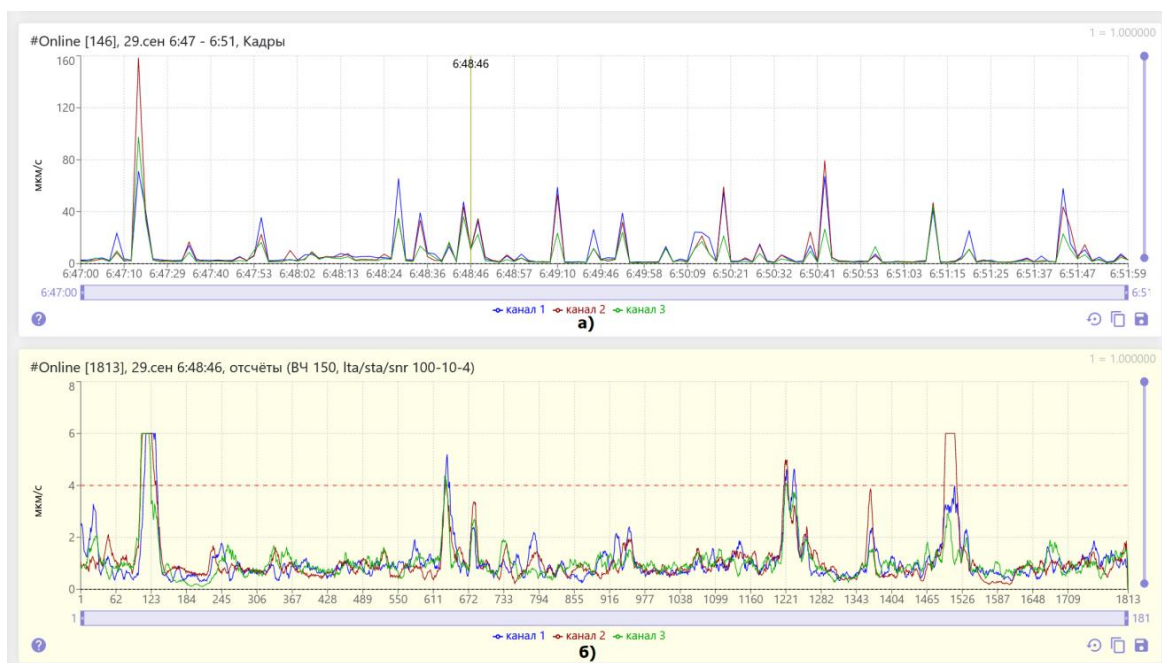


Рис. 6. Результат обработки записи ВЧ фильтром с частотой среза 150 Гц и алгоритмом STA/LTA с пороговым значением 4 и шириной окон 10 и 100 отсчетов: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б – отображение параметра SNR, горизонтальной пунктирной линией обозначен пороговый уровень

После выделения отдельных микросейсмических событий становится возможным расчет частоты их проявления. На рисунке 7 представлен график, отображающий частоту проявления событий за тот же временной интервал, что и на рис. 5 – сутки 29.09.22. События на графике подсчитываются по временным интервалам один час. Всего алгоритмом STA/SLA было зафиксировано 4512 событий за сутки. Сплошными линиями обозначены максимумы ВЧ составляющих виброскорости, зарегистрированные за один час, количественное их обозначение находится на вертикальной оси слева. Пунктирная линия отражает количество высокочастотных микросейсмических событий за один последующий точке графика час, в сумме по трем каналам, их количественное обозначение находится на вертикальной оси справа. Таким образом, по информации из одного графика можно оценить максимальную амплитуду событий за час и частоту их регистрации. Можно заметить, что амплитуда зарегистрированных микросейсм коррелирует с частотой их проявления.

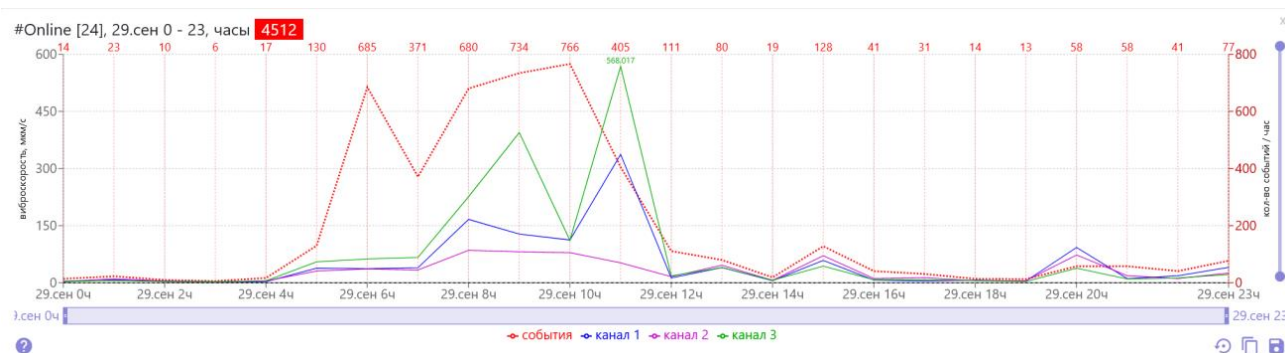


Рис. 7. Частота проявления высокочастотных микросейсмических событий за одночасовые периоды времени 29 сентября 2022 (пунктирная линия) и максимальные значения виброскорости за одночасовые интервалы времени (сплошные линии)

Более подробно можно рассмотреть те же самые данные, изменив масштаб горизонтальной оси с часового на минутный, результат представлен на рис. 8.

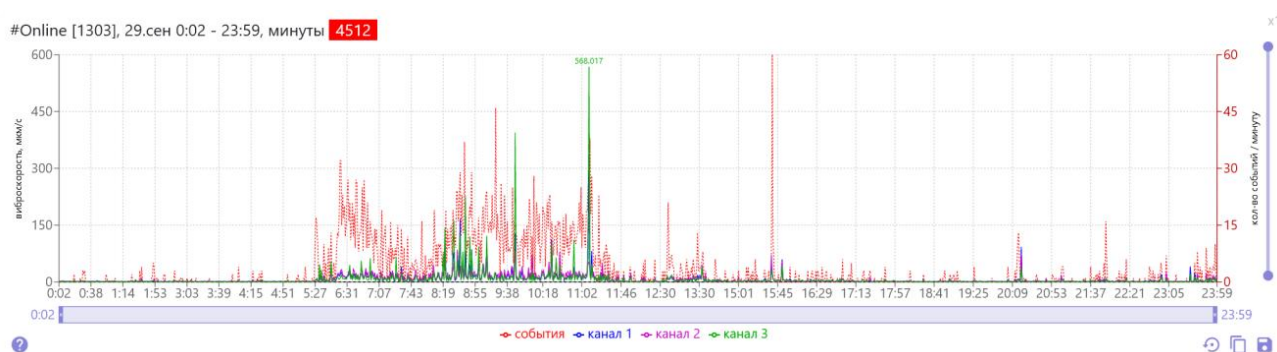


Рис. 8. Частота проявления высокочастотных микросейсмических событий за одноминутные периоды времени 29 сентября 2022 (пунктирная линия) и максимальные значения виброскорости за одноминутные интервалы времени (сплошные линии)

ВЫВОДЫ

Сейсмическая эмиссия, сопровождающая переупаковку блоков в горном массиве и высвобождение энергии накопленного напряженного состояния, может быть зарегистрирована сейсмостанцией. Оперативный контроль деформаций или маркшейдерская съемка не всегда возможны,

поэтому такая регистрация может быть одним из важных факторов заблаговременного выделения потенциальных деструктивных изменений структуры откоса борта карьера.

Точное определение координат сейсмических явлений является необходимым условием для определения параметров микросейсм, позволяющих оконтурить потенциально деструктивные зоны. Основные параметры, которые определяют опасность ситуации в объеме горных пород, сейсмический момент и энергия сейсмического события, могут быть рассчитаны только при локализации микросейсмических событий, что требует развертывания сети сейсмических наблюдений на месторождении.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

- Володин И.А., Казанкова Э.Р., Чеботарева И.Я.** Механизмы генерации и способы регистрации сейсмического, акустического и электромагнитного излучения из продуктивных пластов нефтяных и газовых месторождений при применении стимулирующих методов повышения нефтегазоотдачи // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2014. – № 1 (9). – С. 17.
- Мулев С.Н., Гурин А.Н., Назима В.В., Гурин Д.А.** Методика организации сейсмических наблюдений на территории Уральского региона. – Санкт-Петербург, 2011. – 77 с.
- Смит Д.М.** Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.
- Фисенко Г.Л.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
- Allen R.** Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – Vol. 72 (6). – P. S225–S242.

REFERENCES

- Allen R.** Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – Vol. 72 (6). – P. S225–S242.
- Fisenko G.L.** Stability of the sides of quarries and quarry dumps [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1965. – 378 p.
- Mulev S.N., Gurin A.N., Nazima V.V., Gurin D.A.** Methods of organizing seismic observations on the territory of the Ural region [in Russian]. – St. Petersburg, 2011. – 77 p.
- Smith J.M.** Mathematical modeling and digital simulation for engineers and scientists. – Wiley-Interscience, 1977. – 448 p.
- Volodin I.A., Kazankova E.R., Chebotareva I.Ya.** Mechanisms of generation and methods of registration of seismic, acoustic and electromagnetic radiation from productive layers of oil and gas fields when using stimulating methods to increase oil and gas recovery // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics – 2014. – Vol. 1 (9). – P. 17.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПОЛОЗОВ Станислав Сергеевич – ведущий электроник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка геофизического оборудования, инженерная геофизика.

БЫКАДОРОВ Алексей Иванович – генеральный директор ООО "Сибирский институт геотехнических исследований". Основные научные интересы: геотехнология открытая, подземная, строительная, сейсмический мониторинг.

ХАРЛАМОВ Алексей Сергеевич – руководитель отдела геофизических методов исследования ООО "Сибирский институт геотехнических исследований". Основные научные интересы: сейсмология, инженерная сейсморазведка, электротомография.

ЗАЙЦЕВ Александр Васильевич – старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование процессов физики сплошной среды.



МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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

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

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

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

В работе рассматриваются вопросы выбора материалов для создания физических моделей в сейсморазведке. Основное внимание уделяется соответствию акустических параметров материалов модели свойствам пород реальной геологической среды. Также предлагается методика измерения коэффициента поглощения упругих волн в лабораторных условиях.

Физическое моделирование, акустические параметры материала, исходный импульс, коэффициент поглощения

METHODOLOGY OF PHYSICAL MODELS PARAMETERS DETERMINING FOR SEISMIC EXPERIMENTS

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

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

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

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

The issues of choosing materials for creating physical models into seismic exploration are considered. The main attention is paid to the correspondence of the acoustic parameters of the materials used in the preparation of the model to the properties of the rocks of the real medium. A technique is proposed for measuring the attenuation coefficient in materials that serve as the main elements of the formed physical model.

Physical modeling, acoustics parameters of materials, an initial impulse, an attenuation coefficient

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду истощения и хорошей изученности крупных месторождений нефти и газа все больший интерес в сейсморазведке начинают приобретать мелкие месторождения, характеризующиеся сложной геологической структурой. Для эффективного анализа и оценки запасов таких месторождений требуются знания о распространении упругих волн в сложнопостроенных средах, при этом регистрируемые в процессе полевых работ эффекты могут выходить за пределы актуальных теоретических представлений. Для получения новых знаний требуется выполнение дополнительных исследований – регистрация и детальный анализ реальных данных, прежде всего. Альтернативным подходом к их получению (по

отношению к полевым работам на хорошо изученных полигонах) являются исследования, выполняемые на физических моделях. Это направление имеет богатую историю [Ивакин, 1969; Hilterman, 1970; Аверко, Максимов, 1984; Ebrom, McDonald, 1994] и органично дополняет другие методы и подходы. С использованием физических моделей с детально известными физическими свойствами изучаются вопросы, связанные с особенностями распространения сейсмических волн в средах со сложной структурой.

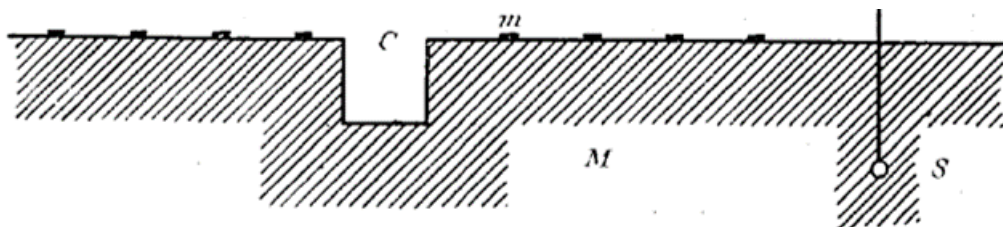


Рис. 1. Система для изучения поверхностных волн Релея [Terada, Tsuboi, 1927]. Обозначения: C – канал, M – среда, m – зеркала, S – источник вибрации

Опыты по сейсмическому моделированию начали проводиться в начале 20-х годов прошлого столетия в Японии. На их основе исследовалось влияние рвов на распространение волн Рэлея [Terada, Tsuboi, 1927] (рис. 1). В качестве источника волн ученые использовали латунный шар, в котором с помощью ударов возбуждались колебания. Приемником служила система, состоящая из расставленных на поверхности модели вогнутых зеркал, которые отражали на экран направленный на них свет и таким образом служили индикатором распространения волны Рэлея. С развитием технологий аппаратура для физического моделирования прошла путь от регистраторов-самописцев в первой половине века до полуавтоматизированных и автоматизированных установок, которые использовались, например, в работах Фреда Гильтермана [Hilterman, 1970] и Била Френча [French, 1974]. В первой работе возбуждение волны происходило с помощью искрового разряда, а во второй в качестве источников волн применялись ультразвуковые пьезокерамические излучатели. На рисунке 2 показана физическая модель, использовавшаяся во второй работе.

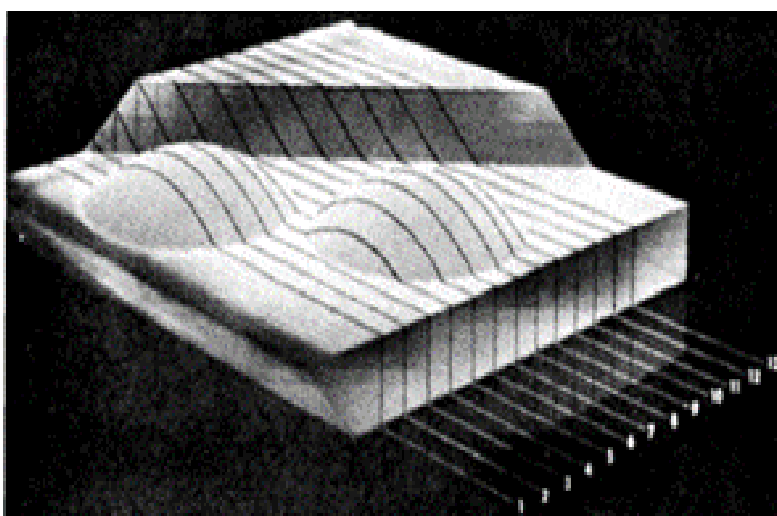


Рис. 2. Фотография модели, содержащая два поднятия и разлом [French, 1974]

В настоящее время исследования методом физического моделирования требуют еще большей автоматизации и крайне высокого уровня знаний о строении моделей – при их создании и исследовании используются такие технологии, как лазерное сканирование, 3D печать, прецизионные измерения акустических свойств и т. д.

Отметим еще один важный аспект: несмотря на развитие современных вычислительных технологий, существуют области, где численное моделирование не может предоставить корректное и полное решение [Evans et al., 2007]. В частности, наиболее характерными являются следующие геологические ситуации:

- приповерхностные аномалии неправильной формы;
- структурно сложнопостроенные среды – соляные диапиры и надвиговые зоны;
- трещиноватые и флюидонасыщенные среды, в т. ч. их поведение в динамике при проведении гидроразрыва пласта.

В целом, результаты, получаемые в ходе физического моделирования, побудили различные компании финансировать создание лабораторий и проведение исследований в этой области. Подобные эксперименты проводятся в Китае [Wang et al., 2018], Канаде [Chang et al., 1994; Wong et al., 2009; Dulaijin et al., 2015], Австралии [Sherlock et al., 2000], России [Попов и др., 2016].

Помимо вопросов, связанных с разработкой аппаратуры и методологии работ, важнейшими являются задачи создания физических моделей, в том числе правильного подбора материалов, используемых при их изготовлении. Представленная работа посвящена решению именно этих задач. При этом наибольшее внимание уделяется рассмотрению определения физических свойств материалов, которые могут являться базовыми при построении моделей.

ПОДГОТОВКА К СОЗДАНИЮ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Принцип физического моделирования заключается в создании упрощенных моделей геологических объектов из материалов, параметры которых близки или подобны свойствам реальных сред. Основными такими параметрами являются скорости продольных и поперечных волн, плотность, геометрические размеры, частоты исследуемых сигналов. При условии равенства скоростей и плотностей в соответствующих частях реальной среды и модели, константа геометрического подобия (коэффициент масштаба) C_l обратно пропорциональна константе подобия по частоте C_ω [Ивакин, 1969; Brown et al., 1991; Chang, Gardner, 1997]. В нашем случае коэффициент масштаба составляет 10 000.



Рис. 3. Образцы материалов

Для того чтобы подобрать материалы, которые удовлетворяют вышеописанному условию подобия плотностей и скоростей, перед созданием модели необходимо сначала провести измерения этих параметров в широком спектре доступных материалов. При этом, исходя из задач моделирования, могут использоваться самые разные материалы – от металлов до композитов и смесей на основе бетона.

Нами было подготовлено 27 образцов, состоящих как из нескольких компонентов (песок, цемент, добавки), так и из одного (пластик, металл). На рисунке 1 представлена часть изготовленных образцов для измерения. В таблицах 2–5 перечислены образцы, параметры которых были измерены.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ

Подготовка к проведению измерений

Для проведения измерений скоростей распространения волн в среде использовались пьезокерамические преобразователи продольных и поперечных волн с центральной частотой 300 кГц. Датчики устанавливались на противоположных гранях исследуемого образца. Для лучшего контакта поверхности преобразователей смазывались вазелином. Один из датчиков, подключенный к генератору сигналов, возбуждал в образце звуковую волну, а второй ее регистрировал. Регистрация осуществлялась с помощью 14-ти битного осциллографа с частотой дискретизации 100 МГц.

Проведение измерений

Время пробега волны измерялось по времени первого вступления. При ином способе снятия времен – по любой из регистрируемых фаз или по переходу записи через ноль, ошибочно будут определяться не только абсолютные значения скоростей, но и относительные, так как с увеличением длины пробега волны изменяется форма регистрируемого импульса.

Для проверки данного утверждения был проведен эксперимент с образцом из изотропного стекла марки К8, имеющего форму параллелепипеда. Линейные размеры образца 79.5 × 49.6 × 49.6 мм. На рисунке 4 показаны зарегистрированные сейсмограммы, полученные прямым просвечиванием по трем ортогональным направлениям. Цветными метками на рисунке показаны положения первых вступлений (красным) и первых минимумов (синий). В таблице 1 приведены времена пробега (после масштабирования) при том и другом методе получения времен, линейные размеры образца и рассчитанные по этим показаниям скорости продольной волны. Номера трасс на рис. 4 совпадают с номерами направлений в табл. 1. При регистрации времен первых вступлений волны, как и ожидается, определяемые скорости во всех трех направлениях примерно равны. Если же рассматривать первую отрицательную фазу волны, то скорости распространения в разных направлениях разные и зависят от длины пробега.

Таблица 1

Линейные размеры, времена пробега и вычисленные скорости распространения звуковых волн в образце стекла марки К8

Направление	Линейный размер, мм	Время первого вступления, мс	Скорость по первому вступлению, м/с	Время первого минимума, мс	Скорость по первому минимуму, м/с
I	79.5	141	5638.30	148	5371.62
II	49.6	88	5636.36	96	5166.67
III	49.6	88	5636.36	96	5166.67

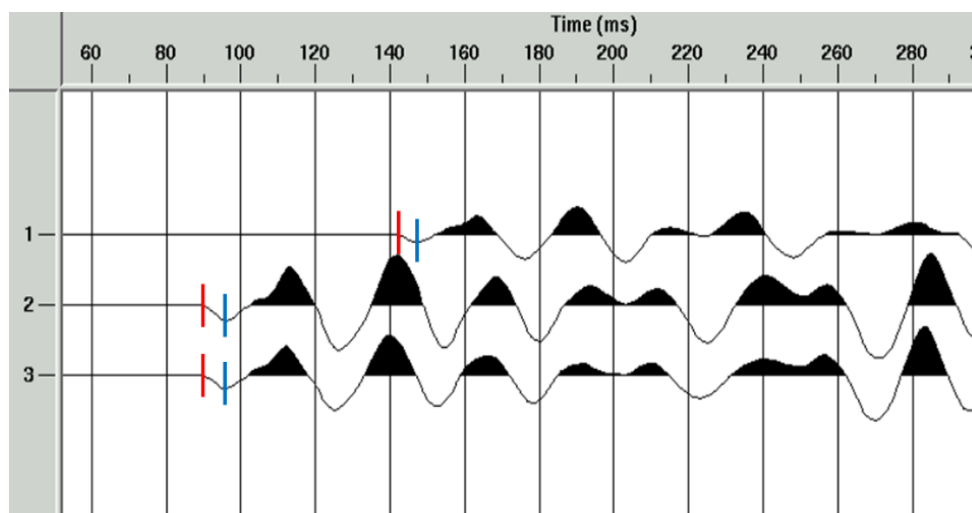


Рис. 4. Сейсмотрассы, полученные при просвечивании стекла марки К8 в трех ортогональных направлениях. Красным показана пикировка первых вступлений волны, синим – первый минимум

Далее во всех экспериментах время пробега волны определялось по времени первого вступления.

При определении времени первого вступления необходимо учитывать тот факт, что в пористых материалах, фронт импульса затягивается и имеет плавную форму, что вносит погрешность в измерение первого вступления. В нашем случае аппаратная погрешность для *P*-волн составляет 0.1 мкс, а для *S*-волн – 0.2 мкс (до масштабирования).

После проведения измерений времен пробега волны в образце (рис. 5) определялись их линейные размеры. Для этого использовался штангенциркуль с ценой деления 0.1 мм. По результатам измерений вычислялась скорость в образцах. Относительная погрешность измерения скорости не превышает 1 %.

Результаты измерений

В таблице 2 приведены измеренные скорости и плотности образцов с различным содержанием песка (П), цемента (Ц), воды (В). При изготовлении образцов вода добавлялась в смесь в соответствии с рекомендациями производителя и составляла одну четвертую от объема. Стоит отметить, что скорость звука в некоторых образцах уже измерялась ранее (V_{po}). Однако ввиду того, что подобные материалы подвержены усадке, в течение которой изменяются их свойства, были проведены повторные измерения (V_{pn}).

Таблица 2

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей

№	Состав песок : цемент	Плотность, г/см ³	V_{po} , км/с	V_{pn} , км/с	V_s , км/с	Гамма	V_{p1}/V_{p2} , %
M3	1:0.1	1.76	1.7	1.84	0.98	0.53	19.5
M4	1:0.2	1.96	2.54	2.14	1.31	0.61	2.9
M5	1:0.3	2.03	2.97	2.78	1.64	0.59	0.4
M6	1:0.4	1.98	3.3	2.76	1.67	0.61	2
M7	1:0.5	1.94	3.16	2.71	1.72	0.63	1.1
M8	1:1	1.94	3.35	–	–	–	0.7

В некоторых образцах измерение продольных скоростей производилось в двух направлениях. В последнем столбце табл. 2 показан процент изменения скоростей при этих двух измерениях. Зависимости непостоянства скоростей от состава смеси не наблюдается. Приведенные измерения изменчивости скоростей производились на образцах после застывания и усадки. Во всех случаях, кроме образца М3, изменчивость скоростей не превышает трех процентов.

Результаты измерения показали, что при увеличении содержания песка в смеси с 0.1 весовой доли до 0.5, скорость продольных волн увеличивается с 1.7 до 3.16 км/с. Скорость поперечных волн изменяется от 0.98 до 1.72 км/с.

В таблице 3 приведены измерения образцов с различным содержанием песка, цемента, воды и добавок: пластификатора CemPlast и SuperTOP российского производства.

Таблица 3

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей с добавлением пластификатора CemPlast

№	Состав		Плотность, г/см ³	V _{po} , км/с	V _{pn} , км/с	V _s , км/с	Гамма
M20	Песок, г : Цемент, г : Вода, мл : CemPlast, мл	60:12:5.6:0	1.85	3.11	3.15	1.76	0.56
M21		60:60:25:0	2.06	3.17	—	1.73	—
M22		60:60:25:0.5	2.08	3.38	3.32	1.91	0.58
M23		60:60:30:0.5	1.93	3.06	—	—	—
M24	SuperTOP, г : Вода, мл : CemPlast, мл	120:17:00	2.18	3.63	3.69	2.04	0.55

Как видно из полученных измерений, изменяя состав смеси, можно получить широкий диапазон скоростных свойств материалов для моделирования.

Отметим, что в образцах М3 и М24 скорости продольных волн при повторном измерении оказались несколько выше, чем при первоначальном измерении. На рисунке 6 представлены графики изменения скорости продольных волн в некоторых образцах с течением времени. Ось времени построена в логарифмической шкале. Из представленных графиков видно, что менее всего подвержен усадке образец М24.



Рис. 5. Измерение скорости звука в образце

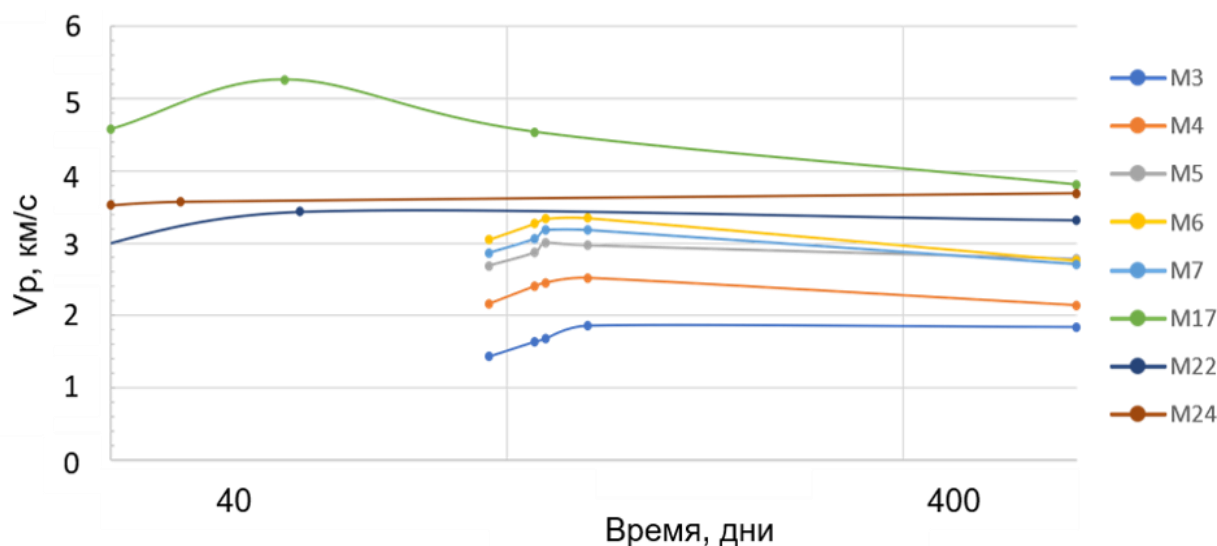


Рис. 6. Изменение скорости звука в образцах с течением времени

Были проведены измерения образцов из песка и цемента с добавлением армирующей фибры. Так были рассмотрены три образца с постоянным соотношением песка и бетона, но разным содержанием стекловолоконной фибры марки «Крепыш» (производитель Атекс) – от 0 до 3 гр. на 100 гр. песка и 35 гр. цемента. Результаты измерений отображены в табл. 4 (строки 1–3). В строках 4 и 5 той же таблицы показаны результаты измерений в образцах с постоянным количеством фибры, но разным количеством цемента. Такие же пропорции основных компонентов у образцов M4 и M1 в табл. 2. Добавление фибры в состав смеси снижает скоростные и плотностные характеристики материала.

Таблица 4

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей с добавлением фибры

	Тип фибры	Состав	Плотность, г/см ³	V _p , км/с	V _s , км/с	Гамма	V _{p1} /V _{p2} , %
1	Стекловолоконно «Крепыш»	100:35:00	1.88	3.44	1.87	0.54	1.8
2		100:35:0.6	1.9	3.21	1.85	0.58	2
3		100:35:3.0	1.52	1.89	1.27	0.67	6.1
4		100:20:1.5	1.68	2.28	1.16	0.51	1.1
5		100:10:1.5	1.58	1.51	0.92	0.61	4.2
6	Поли- пропиленовая	100:20:1.5	1.76	2.27	–	–	5.3
7		100:10:1.5	1.68	1.42	–	–	8.9

В строках 6 и 7 табл. 4 показаны характеристики образцов с соотношением песок : цемент таким же, как и в строках 4 и 5, но стекловолоконная фибра заменена на полипропиленовую (изготовитель «Цеммикс»). Измерение скорости поперечных волн в этих образцах не производились.

Результаты измерений показали, что замена материала фиброволокна незначительно повлияла на скоростные и плотностные характеристики.

Анализируя эти результаты, мы видим, что добавление фибры в пескобетонную смесь приводит к уменьшению плотности образца и скоростей распространения звуковых волн, с одновременным

повышением скоростей продольных и поперечных волн. Добавление фибры при изготовлении смеси позволяет избежать растрескивания модели при высыхании. Однако следует учитывать, что такую смесь трудно вымешивать до однородного состояния, она тяжело формируется и подвержена образованию воздушных пузырей.

Измерение скорости продольных волн в данных образцах производилось в двух поперечных направлениях. Линейные размеры образцов в этих направлениях были равны 30 и 50 мм. В последнем столбце табл. 4 показан процент изменения скоростей при этих двух измерениях. Почти во всех случаях скорость продольных волн оказалась больше при измерении большего линейного размера. Такой результат говорит о приобретенной во время застывания смеси скоростной анизотропии. В дальнейшем предполагается изучить указанный эффект, т. к. четкой корреляции величины анизотропии скоростей в полученных образцах с составом смеси не прослеживается.

Таблица 5 включает пластики и другие однородные материалы. Представленные в таблице пластики имеют различную твердость, определяемую по шкале Шора (40A, 90A, 95A, 70D). Указанная твердость заявлена производителем, и дополнительно авторами не измерялась. В мягких образцах пластика, с твердостью, измеренной по шкале А, поперечные волны не зафиксированы. Плотность пластиков изменяется незначительно и зависит скорее от производителя, чем от заявленной твердости. Как видно из табл. 5, скорость распространения продольных звуковых волн в образцах в общем случае растет с увеличением твердости. В случаях, когда удалось уверенно зафиксировать поперечные волны, параметр гамма определяется критично низким, равным 0.35 и 0.36. Этот результат важно учитывать при проведении экспериментов, направленных на решение динамических задач сейсмологии.

Таблица 5

Плотностные и скоростные характеристики некоторых пластиков и других однородных материалов

Образец	Твердость по Шору	Плотность, г/см ³	V _p , км/с	V _s , км/с	Гамма
Пластик (VitaFlex)	40A	1.07	1.46	—	—
Пластик (Силагерм)	90A	1.07	1.71	—	—
Пластик (Силагерм)	95A	1.07	1.68	—	—
Пластик(ЕракастTLC)	70D	1.11	1.84	0.64	0.35
Пластик (Polycast)	70D	1.04	1.85	0.66	0.36
Стекло	—	2.3	5.54	3.14	0.57
Акрил экструзионный мощность 21 мм	—	1.2	2.74	1.35	0.49
Акрил литьевой мощность 50 мм	—	1.18	2.64	—	—
Алюминий В-95	—	2.7	6.1	—	—

Скоростные и плотностные характеристики акрила (оргстекла) нельзя считать определенными, в табл. 5 приведены значения для двух образцов разной толщины, изготовленных по разной технологии. Плотность варьируется в пределах 1.5 %, скорость продольных волн изменяется в пределах 4 %. По своим

скоростным характеристикам акриловое стекло могло бы с успехом моделировать песчаники, однако плотность у этого материала довольно низкая и близка к углям.

Стекло и алюминий по своим скоростным и плотностным характеристикам могут использоваться для моделирования магматических пород.

Для сравнения с акустическими характеристиками реальных сред мы приводим табл. 6, в которой указаны примерные интервалы плотностей и скоростей звука для некоторых пород.

Таблица 6

Акустические свойства некоторых пород [Бродовой и др., 1988; Богословский и др., 2018]

Порода	Плотность, г/см ³	V _p , км/с	V _s , км/с	Гамма
Перидотиты	2.9–3.3	7.8–8.2	4.1–4.5	0.54
Габбро	2.94	6.40	3.65	0.57
Базальты	2.81	5.50	2.95	0.54
Диабазы	3.02	6.40	3.65	0.57
Диориты	2.80	6.20	3.55	0.57
Сиениты	2.66	6.15	3.25	0.53
Граниты	2.62	5.60	3.20	0.57
Гнейсы	2.62	5.80	3.05	0.53
Песчаники	1.8–2.9	1.8–4.0	0.7–2.1	0.48
Доломиты	1.8–3.0	2.5–6.0	1.2–3.5	0.55
Известняки				
Мергель	2.3–2.8	2.0–3.5	0.3–1.8	0.40
Нефть	0.8–1.0	1.3–1.4	–	–
Эклогит	3.27	7.45	–	–
Амфиболит	3.09	6.08	4.20	0.69

Измерение поглощения в оргстекле

Помимо акустической жесткости важным параметром, который нужно учитывать при создании модели, является также коэффициент поглощения в материале. В данной работе была проведен эксперимент по определению этого коэффициента в таком материале как оргстекло (акрил экструзионный), которое в дальнейшем использовалось для создания моделей.

Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование (рис. 7):

- цифровой осциллограф TDS-1012 (частота дискретизации 100 МГц);
- усилитель сигнала ультразвуковой эхоскоп GS 200;
- ультразвуковые датчики 2 МГц с диаметром элемента 36 мм;
- емкость с водой.

В качестве исследуемых объектов выступали пластины оргстекла с толщинами 10, 20.4 и 4.7 мм.

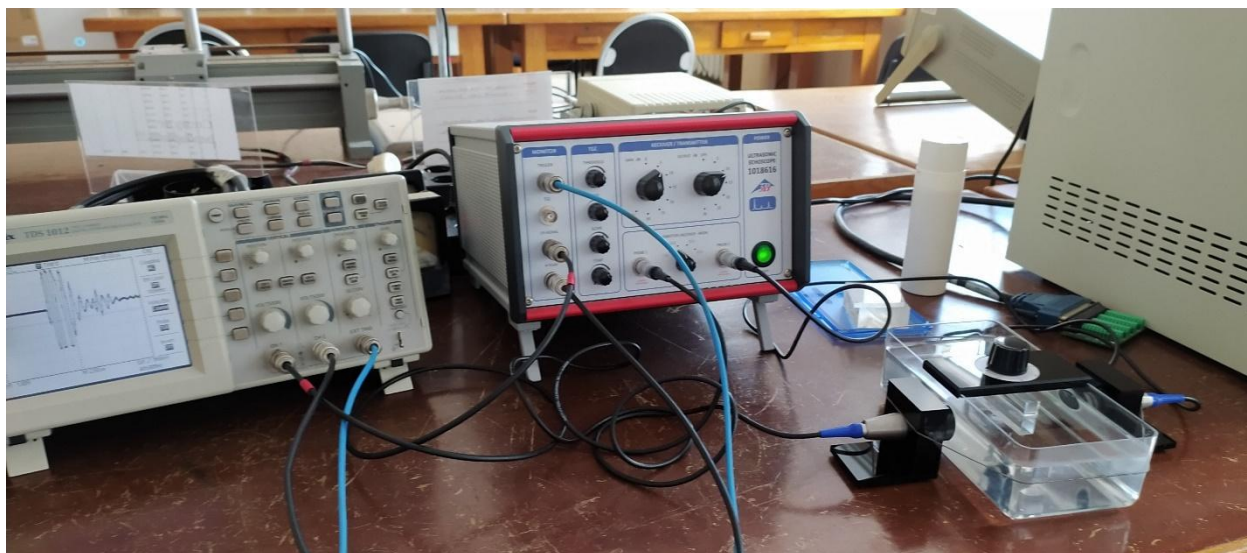


Рис. 7. Оборудование для измерения поглощения

Выполняемый эксперимент заключался в следующем: сначала к плоскопараллельным граням сосуда с водой с помощью эластичной нити прижимались ультразвуковые датчики. Для лучшего соприкосновения со стенками сосуда поверхность датчиков была смазана специальным раствором. Затем в емкость с водой помещался исследуемый образец. После этого на один из датчиков (источник) подавался сигнал (импульс Дирака) с частотой 2 МГц и в среде (вода, оргстекло) возбуждалась ультразвуковая волна.

Второй датчик, выступающий в роли приемника, регистрировал прошедшую через оргстекло и воду волну (рис. 8). Затем с помощью осциллографа определялась амплитуда пришедшей волны (рис. 9). Далее эксперимент повторялся с двумя другими пластинками оргстекла. Нужно заметить, что емкость с водой в этом эксперименте обеспечивала постоянство прижима и площади соприкосновения датчиков с моделью при смене исследуемых объектов.

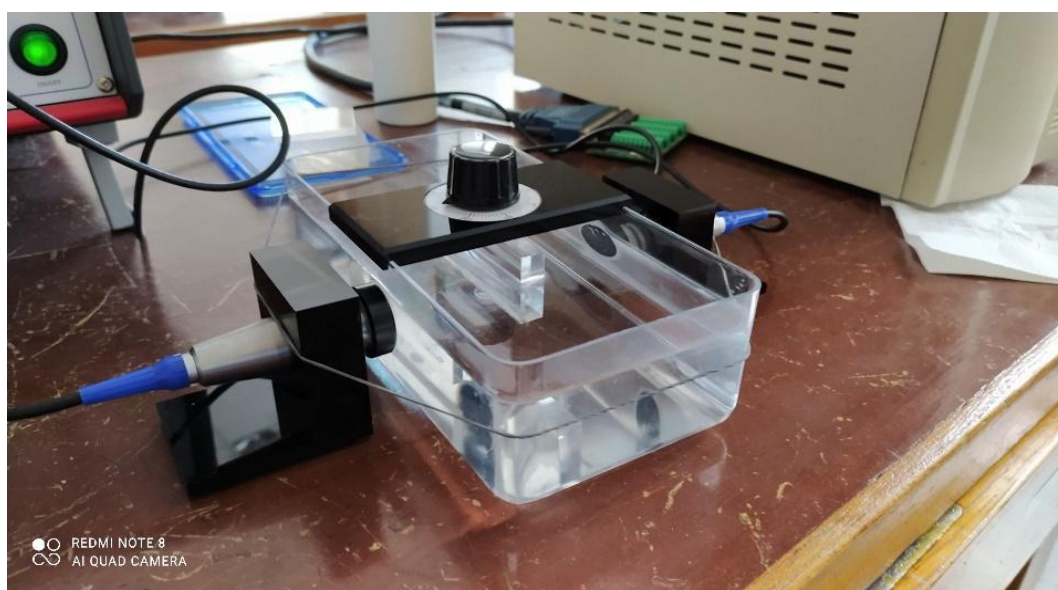


Рис. 8. Измерение поглощения в оргстекле

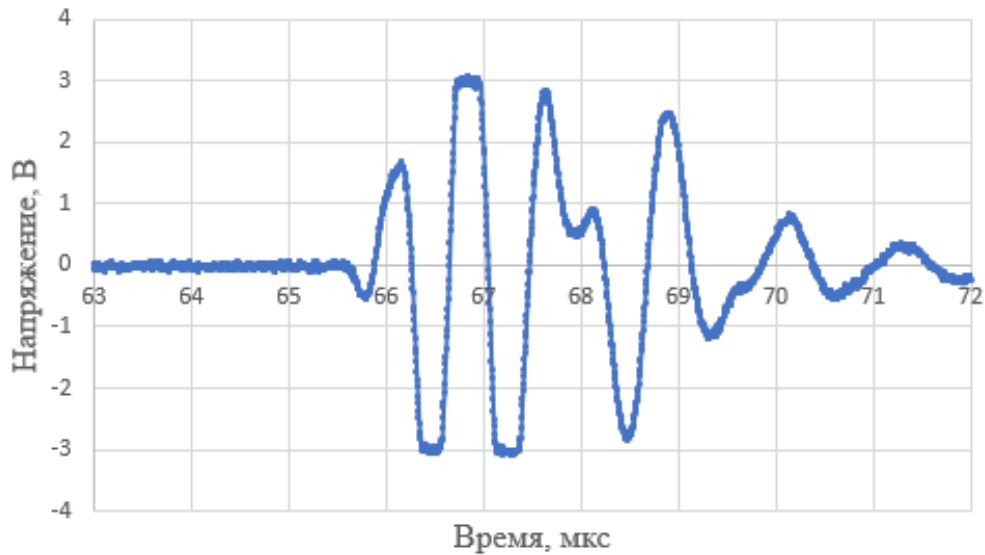


Рис. 9. Осциллограмма пришедшей волны

Теперь можно определить коэффициент поглощения в оргстекле, исходя из того, что амплитуда волны, приходящей на приемник, равна [Ермолов и др., 2004]:

$$A = A_0 e^{-\alpha r},$$

где A – амплитуда в точке измерения, r – расстояние, проходимое волной, A_0 – коэффициент, равный произведению амплитуды волны, прошедшей расстояние r без учета затухания, и коэффициентов прохождения на границах сред, α – сумма коэффициентов поглощения в воде (α_0) и оргстекле. Отсюда, зная толщины образцов, амплитуды A_1 и A_2 в двух экспериментах можно найти α :

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\Delta l} + \alpha_0,$$

где Δl – разница толщин двух образцов. Нами были проведены измерения амплитуды прошедшего сигнала для трех пластинок разной толщины. Стоит отметить, что значение амплитуды A определялось по максимуму первого пика пришедшей волны. Затем был посчитан коэффициент отражения, который получился равным 23.4 ± 0.1 Нп/м. Во многих твердых телах при не очень высоких частотах коэффициент поглощения изменяется пропорционально первой степени частоты, поэтому зачастую в таблицах приводят значение отношения этих величин, которое не зависит от частоты и пропорционально добротности материала [Bloomfield et al., 2000; Ермолов и др., 2004]:

$$Q^{-1} \sim \frac{a}{f}.$$

Из данных, приведенных в [Ермолов и др., 2004], следует, что значение данного отношения лежит в диапазоне $8\text{--}12 \cdot 10^5$ с/м. По результатам проведенного эксперимента было получено значение $11.7 \cdot 10^5$ с/м, что укладывается в диапазон табличных значений.

Таким образом, вышеописанная методика измерения коэффициента поглощения может быть применена для исследования и других материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных измерений были получены акустические параметры для множества образцов. Акустическая жесткость исследованных материалов лежит в диапазоне от 1.6 до 16.5. Для пород, приведенных в табл. 6, этот параметр колеблется от 2.3 до 23.6. Следует отметить, что в табл. 6 приведены средние показатели для оценки диапазона акустической жесткости и сопоставления с нашими измерениями.

Также была отработана методика измерения акустического поглощения в оргстекле. Полученные значения соответствуют табличным, что дает основания утверждать, что данная методика может быть в дальнейшем применима для измерения поглощения и в других образцах.

Выражаем благодарность рецензенту Д.А. Попову, замечания и комментарии которого способствовали существенному улучшению статьи. Некоторые из его предложений будут реализованы при выполнении дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0025.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверко Е.М., Максимов Л.А.** Моделирование сейсмических полей и способов их обработки. – Новосибирск: Наука, 1984. – 86 с.
- Богословский В.А., Горбачев Ю.И., Жигалин А.Д., Калинин А.В., Попов М.Г., Пушкарев П.Ю., Модин И.Н., Никитин А.А., Никитин Ан.А., Степанов П.Ю., Хмелевский В.К.** Геофизика. – М.: КДУ, Добросвет, 2018. – 320 с.
- Бродовой В.В., Глебовский Ю.С., Дмитриев В.И., Дортман Н.Б., Запорожец В.М., Мудрецова Е.А., Никитин А.А., Никитский А.Е., Номоконов В.П., Добрынина Н.П., Першина Е.Г.** Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1988. – 455 с.
- Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г.** Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Эхо, 2004. – 109 с.
- Ивакин Б.Н.** Методы моделирования сейсмических волновых явлений. – М.: Наука, 1969. – 287 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.
- Brown R.J., Lawton D.C., Cheadle S.P.** Scaled physical modelling of anisotropic wave propagation: multioffset profiles over an orthorhombic medium // *Geophysical Journal International*. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 693–702, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01428.x.
- Bloomfield P.E., Lo W.J., Lewin P.A.** Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic transducers and the acousto-electric properties of PVDF and P (VDF/TrFE) films // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control*. – 2000. – Vol. 47. – P. 1397–1405, doi: 10.1109/58.883528.
- Chang C.-H., Gardner G.H.F.** Effects of vertically aligned subsurface fractures on seismic reflections: A physical model study // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62 (1). – P. 245–252, doi: 10.1190/1.1444124.
- Chang C.-H., Gardner G.H., McDonald J.A.** A physical model of shear-wave propagation in transversely isotropic solid // *Geophysics*. – 1994. – Vol. 59 (3). – P. 484–487, doi: 10.1190/1.1443610.
- Dulaijan K.A., Margrave G.F., Wong J.** 3D seismic physical modeling for azimuthal variations of *P*-wave velocity // *CREWES Research Report*. – 2015. – Vol. 27. – 13 p.

- Evans B., McDonald J., French W.** Seismic physical modelling of reservoirs, its past, present and future // ASEG Extended Abstracts. – 2007. – Vol. 2007 (1). – P. 1–6, doi: 10.1071/ASEG2007ab037.
- Ebrom D.A., McDonald J.A.** Seismic physical modeling. Geophysics reprint series. No.15. – Society of Exploration Geophysicists, South Yale, 1994. – 519 p.
- French W.S.** Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 265–277, doi: 10.1190/1.1440426.
- Hilterman F.J.** Three-dimensional seismic modeling // Geophysics. – 1970. – Vol. 35 (6). – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.
- Terada T., Tsuboi C.** Experimental studies on elastic waves. Part 1 // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.
- Sherlock D., McKenna J., Evans B.** Time-lapse 3-D seismic physical modelling // Exploration Geophysics. – 2000. – Vol. 31 (1–2). – P. 310–314, doi: 10.1071/EG00310.
- 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 // SEG Technical Program/ Expanded Abstracts. – 2009. – P. 2642–2646, doi: 10.1190/1.3255395.

REFERENCES

- Averko E.M., Maksimov L.A.** Modeling of seismic fields and methods of their processing [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1984. – 86 p.
- Bloomfield P.E., Lo W.J., Lewin P.A.** Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic transducers and the acousto-electric properties of PVDF and P (VDF/TrFE) films // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control. – 2000. – Vol. 47. – P. 1397–1405, doi: 10.1109/58.883528.
- Bogoslovskii V.A., Gorbachev Yu.I., Zhigalin A.D., Kalinin A.V., Popov M.G., Pushkarev P.Yu., Modin I.N., Nikitin A.A., Nikitin An.A., Stepanov P.Yu., Hmelevskij V.K.** Geophysics [in Russian]. – KDU, Dobrosvet, Moscow, 2018. – 320 p.
- Brodovoi V.V., Glebovsky Yu.S., Dmitriev V.I., Dortman N.B., Zaporozhets V.M., Mudretsova E.A., Nikitin A.A., Nikitsky A.E., Nomokonov V.P., Dobrynina N.P., Pershina E.G.** Physical properties of rocks and minerals. Handbook of geophysics [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1988. – 455 p.
- Brown R.J., Lawton D.C., Cheadle S.P.** Scaled physical modelling of anisotropic wave propagation: multioffset profiles over an orthorhombic medium // Geophysical Journal International. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 693–702, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01428.x.
- Chang C.-H., Gardner G.H.F.** Effects of vertically aligned subsurface fractures on seismic reflections: A physical model study // Geophysics. – 1997. – Vol. 62 (1). – P. 245–252, doi: 10.1190/1.1444124.
- Chang C.-H., Gardner G.H., McDonald J.A.** A physical model of shear-wave propagation in transversely isotropic solid // Geophysics. – 1994. – Vol. 59 (3). – P. 484–487, doi: 10.1190/1.1443610.
- Dulaijan K.A., Margrave G.F., Wong J.** 3D seismic physical modeling for azimuthal variations of *P*-wave velocity // CREWES Research Report. – 2015. – Vol. 27. – 13 p.
- Ebrom D.A., McDonald J.A.** Seismic physical modeling. Geophysics reprint series. No. 15. – Society of Exploration Geophysicists, South Yale, 1994. – 519 p.

- Ermolov I.N., Vopilkin A.C., Badaluan V.G.** Calculations in Ultrasonic Testing. – Echo, Moscow, 2004. – 109 p.
- Evans B., McDonald J., French W.** Seismic physical modelling of reservoirs, its past, present and future // ASEG Extended Abstracts. – 2007. – Vol. 2007 (1). – P. 1–6, doi: 10.1071/ASEG2007ab037.
- French W.S.** Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 265–277, doi: 10.1190/1.1440426.
- Hilterman F.J.** Three-dimensional seismic modeling // Geophysics. – 1970. – Vol. 35 (6). – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.
- Ivakin B.N.** Methods for modeling seismic wave phenomena [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1969. – 287 p.
- 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.
- Sherlock D., McKenna J., Evans B.** Time-lapse 3-D seismic physical modelling // Exploration Geophysics. – 2000. – Vol. 31 (1–2). – P. 310–314, doi: 10.1071/EG00310.
- Terada T., Tsuboi C.** Experimental studies on elastic waves. Part 1 // 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 // SEG Technical Program/ Expanded Abstracts. – 2009. – P. 2642–2646, doi: 10.1190/1.3255395.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

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

ОРЛОВ Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: создание физических моделей и развитие методов анализа волновых полей в сложных моделях сред.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсморазведка, геотермия.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, 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.



РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПОВЕРХНОСТНО-СОГЛАСОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУД

Р.С. Кушнарев^{1,2}, Н.А. Горевачев^{1,2}, 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, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия
e-mail: R.kushnarev@g.nsu.ru*

Рассматриваются особенности создания процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд с применением подходов факторной декомпозиции. Демонстрируется возможность изменения используемых моделей корректировки, что позволяет выбирать оптимальные модели, обладающие наибольшим соответствием обрабатываемому сейсмическому материалу в рамках решаемой задачи. Исследовано влияние значений энергии, относящихся к различным временным интервалам, содержащим сигналы, на качество получаемых оценок факторов. Тестирование процедуры выполнялось на модельных и реальных данных. Оно продемонстрировало возможности разработанной процедуры и соответствие получаемых ею результатов существующим программным продуктам мирового уровня.

Коррекция амплитуд сейсмических сигналов, факторная декомпозиция, качество получаемых оценок

TESTING PROCESSING ALGORITHMS FOR SEISMIC DATA FROM LABORATORY MODELING

R.S. Kushnarev^{1,2}, N.A. Goreyavchev^{1,2}, 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: R.kushnarev@g.nsu.ru*

The features of creating a procedure for surface-consistent amplitude correction using factors decomposition approaches are considered. The possibility of changing the models used is demonstrated, which makes it possible to choose the optimal models that have the best correspondence to the processed seismic material within the framework of the problem being solved. The effect of energy values related to different time intervals containing signals on the quality of the obtained factor estimates is studied. The procedure was tested on models and real data. It demonstrated the capabilities of the developed procedure and the correspondence of the results obtained by it to existing world-class software products.

Correction of seismic signal amplitudes, factors decomposition, quality of obtained estimates

ВВЕДЕНИЕ

Для корректного изучения свойств целевых горизонтов важным этапом является динамическая обработка сигнала. На этом этапе проводят отделение динамических особенностей сигнала, связанных с целевыми горизонтами, от особенностей его формирования, прохождения через покрывающую среду и

аддитивной помехи. Одной из основных процедур динамической обработки сейсмического сигнала является поверхностно-согласованная коррекция формы записи, включающая и амплитуду [Гольдин и Митрофанов, 1975; Taner, Koehler, 1981].

Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд участвует в различных этапах обработки сейсмических материалов, начиная с предварительной корректировки данных и заканчивая их подготовкой к интерпретационному этапу. Важность коррекции определяется тем, что сейсмический сигнал, содержащий информацию о целевых горизонтах, осложнен различными помехами. Источниками таких помех, в частности, являются неоднородные поверхностные условия проведения сейсморазведочных работ, наличие неоднородностей в верхней части разреза [Давлетханов, 2017].

Разнообразие данных и решаемых задач требует высокой универсальности разрабатываемой процедуры. Она должна выполнять анализ и корректировку исходных трасс на уровне энергетических характеристик, а также анализировать целевые сигналы. При этом при решении различных задач необходимо использовать различные модели обработки с возможностью их адаптации под решаемую задачу и обрабатываемые данные. Указанные требования могут быть выполнены при использовании факторной декомпозиции, которая стала одним из классических подходов для процедур коррекции динамики сейсмических сигналов. Идея факторного представления сформировалась в 70-х годах [Гольдин, Митрофанов, 1973; Taner et al., 1974]. Введенное Гольдиным и Митрофановым в 1972 году факторное представление [Митрофанов, 1972] опиралось на предложенную в 1970 году Гурвичем модель [Гурвич, 1970], представляющую форму отраженного сигнала последовательной сверткой нескольких импульсных характеристик. Эти импульсные характеристики описывают влияние различных областей (область источника, приемника и отражения от границы, пройденный путь) на форму отраженного сигнала. Полное описание подхода дано в монографии [Митрофанов, 2018], а его применение позволило разработать алгоритм поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд. Особенности алгоритма и его реализации изложены в статье [Кушнарев и др., 2021]. Главная сложность состоит в нахождении решения для вырожденной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Одним из способов такого решения является применение итерационных схем, обладающих простотой реализации и сходимостью к одному из решений СЛАУ [Козырев и др., 2003; Долгих, 2010; Давлетханов, 2017]. Нами предлагается другой способ, основанный на переходе к расширенным невырожденным матрицам СЛАУ. Расширение матриц обеспечивается введением дополнительных условий.

Настоящая работа продолжает развитие этих исследований. Основное внимание уделяется вопросам усложнения факторных моделей, используемых в процессе обработки данных. Такое усложнение влечет за собой решение двух значительных проблем. Первая связана с априорной информацией, необходимой для построения расширенных матриц. Вторая определяется объемами и качеством современных сейсмических данных, что усложняет детальный анализ регистрируемых колебаний, требуя его автоматизации. Следовательно, создаваемые процедуры должны обладать набором возможных моделей, позволяющих решать поставленную геофизическую задачу, и критериями, обеспечивающими выбор оптимальной модели.

При разработке процедуры коррекции амплитуд мы стремились учесть обе указанные проблемы. Ниже приводится описание нашего подхода. Тестирование разработанной процедуры осуществлялось на двух видах сейсмических материалов: модельные данные и реальные наблюдения. Во втором случае результаты, полученные с применением процедуры, сравнивались с результатами стандартной обработки сейсмических данных в пакете GEOVATION.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕДУРЫ

Описание алгоритма, положенного в основу разработанной процедуры, приведено в работе [Кушнарев и др., 2021]. Там дана общая модель и схема определения значений факторов посредством решения соответствующей СЛАУ. Придерживаясь изложенной схемы, отметим два важных момента.

Первый момент связан с выбором частных случаев общей модели Гурвича, которая приводится в указанной работе. Таких случаев может быть четыре при реализации классической схемы поверхностно-согласованной коррекции амплитуд. Наиболее простой случай представлен двухфакторной моделью, содержащей факторы источников ($s_i(t)$) и приемников ($r_j(t)$), которые описывают вариации формы сигналов, связанные с неоднородностью условий возбуждения и приема реальных колебаний. Индексы i и j определяют номера источников и приемников в системе наблюдений. Они также однозначно задают географическое положение областей возбуждения и приема сейсмических колебаний.

Именно двухфакторная модель служила основой для различных представлений, включая модельные эксперименты, в предыдущей статье. Несмотря на ее простоту, она может быть использована не только для модельных экспериментов, но и при обработке реальных данных [Taner et al., 1998; Mitrofanov et al., 2021]. Общий вид двухфакторной модели представляется выражением:

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) + \xi_{ij}(t), \quad (1)$$

где $y_{ij}(t)$ – наблюдаемые данные, которыми могут являться сейсмограммы, отдельные сигналы, энергии или амплитуды; $S^0(t)$ – идеальный исходный импульс, возбуждаемый во всех источниках рассматриваемого сейсмического эксперимента (выполняемого исследования); $\xi_{ij}(t)$ – оставшаяся аддитивная часть волнового поля или сигнала, не описываемая первым слагаемым, t – временная переменная.

При применении модели (1) для описания данных нужно учитывать, что она не предполагает каких-либо других изменений в форме исходного импульса кроме вариаций в источниках и приемниках. Такое предположение может быть обосновано для небольшого класса задач, где отсутствует информация о регулярных особенностях среды. Например, считается, что среда обладает случайным распределением свойств, приводящим к импульсной характеристике $U_{ij}(t)$, являющейся реализацией случайного процесса. Подобное предположение может быть использовано на этапах предварительной обработки данных.

В случае появления некоторых регулярных особенностей в анализируемом волновом поле или сейсмическом сигнале необходимо применять более сложные факторные модели. Ими являются два частных случая общей модели, которые представимы следующими трехфакторными моделями:

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) * G_k(t) + \xi_{ij}(t), \quad (2)$$

и

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) * L_l(t) + \xi_{ij}(t). \quad (3)$$

Различие этих моделей состоит в видах выделяемых регулярностей. Для первой из указанных моделей такая регулярность определяется фактором $G_k(t)$, который связан с общей центральной точкой (ОЦТ) системы наблюдений. Мы предполагаем, что наблюдения, относящиеся к заданной ОЦТ, могут обладать специфическими особенностями, описываемыми значениями $G_k(t)$. Для второй модели предполагается, что особенности связаны с фактором $L_l(t)$, характеризующим изменения волнового поля или сигнала в зависимости от удаления источник–приемник. Такая зависимость представляется достаточно очевидной. Ее наиболее простое описание дается через изменение амплитуды сигнала за счет расхождения фронта распространяющейся волны. В лог-спектральной области на фиксированной частоте факторы за ОЦТ и удаление источник–приемник обозначаются соответственно γ_k и λ_l .

Для выражения (1) в лог-спектральной области на фиксированной частоте мы имеем двухфакторную модель простого вида:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

где факторы: α_i и β_j характеризуют изменения условий возбуждения и приема сейсмических колебаний на фиксированной частоте, а ε_{ij} – помеха. В этой модели, как и во всех последующих, нами опущена постоянная составляющая, которая определяется неоднозначно [Кушнарев и др., 2021].

Переход от модели (1) к моделям (2)–(3) сопровождается усложнением факторных моделей и увеличением количества неоднозначно определяемых составляющих в получаемом решении СЛАУ. Поэтому нам уже недостаточно условия, вводимого в предыдущей работе [Кушнарев и др., 2021]. Это достаточно просто показать, используя линеаризованное представление модель (3) в лог-спектральной области:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \lambda_l + \varepsilon_{ij}. \quad (5)$$

Теперь, добавив линейную составляющую $c(i-j)$ к фактору за удаление и вычитая соответствующие компоненты из α_i и β_j , приходим к равенству

$$\alpha_i + \beta_j + \lambda_l = (\alpha_i - ci) + (\beta_j + cj) + (\lambda_l + c(i-j)), \quad (6)$$

указывающему на неединственность определения линейных составляющих в значениях факторов. Общие исследования вопросов неединственности получаемых решении СЛАУ были выполнены в [Митрофанов, 2018]. Там же предложены способы введения априорной информации необходимой для получения однозначных решений СЛАУ. В частности, показано, что в случае моделей (2)–(3), требуется введения трех дополнительных условий, фиксирующих линейные составляющие.

Укажем, что при применении общей четырехфакторной модели, приведенной в предыдущей работе, требуется дополнительное расширение числа условий. В разработанной нами процедуре поверхностно-согласованной коррекции амплитуд ввод требуемых условий выполняется автоматически при изменении типа используемой модели.

Второй важный момент, который не был представлен в предыдущей работе, относится к критериям качества используемых моделей. Такие критерии важны, как при выборе наилучшей из используемых моделей, так и обоснованности всей процедуры коррекции амплитуд. Наиболее простыми из них являются критерии Фишера [Кобзарь, 2006], позволяющие определить, насколько значимыми будут вариации различных факторов относительно всевозможных других вариаций, присутствующих в рассматриваемых данных.

ПОДГОТОВКА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сопоставление двухфакторной и трехфакторной модели проводилось на синтетических данных, полученных с использованием 3D системы наблюдений. Для моделирования синтетических данных, с последующим моделированием неоднородностей верхней части разреза, была реализована 3D модель, представленная на рис. 1. Данная модель была сделана для демонстрации работы алгоритма по разделению и учету факторов, относящихся к различным областям модели, и влияющих на регистрируемый сигнал.

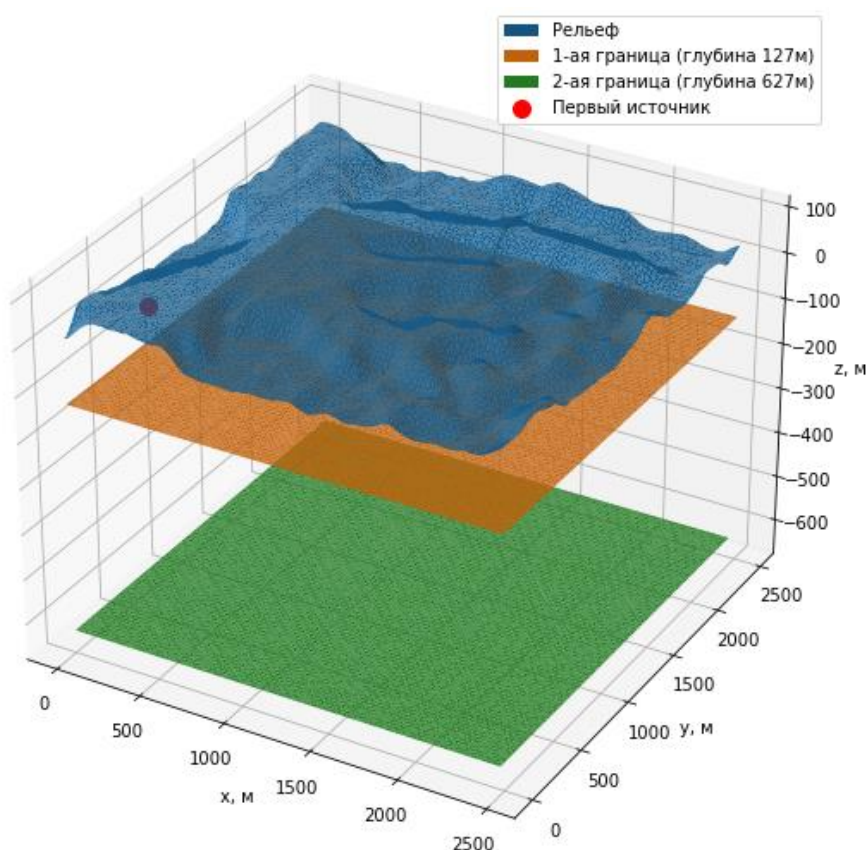


Рис. 1. Структура 3D модели

Модель содержит две горизонтальные границы на глубине 200 и 700 м. Скорости продольной волны между поверхностью наблюдения и первой границей – 1852 м/с, между 1-ой и 2-ой границей – 2229 м/с, под 2 границей – 2947 м/с. Скорость поперечной волны во всех слоях в два раза меньше продольной скорости, плотность всюду составляет 2500 кг/м³.

Рельеф, показанный на рис. 2, основан на картах рельефа Западной Сибири. Перепады высот от 0 до 70 м, угол перепада высот порой достигает 30°.

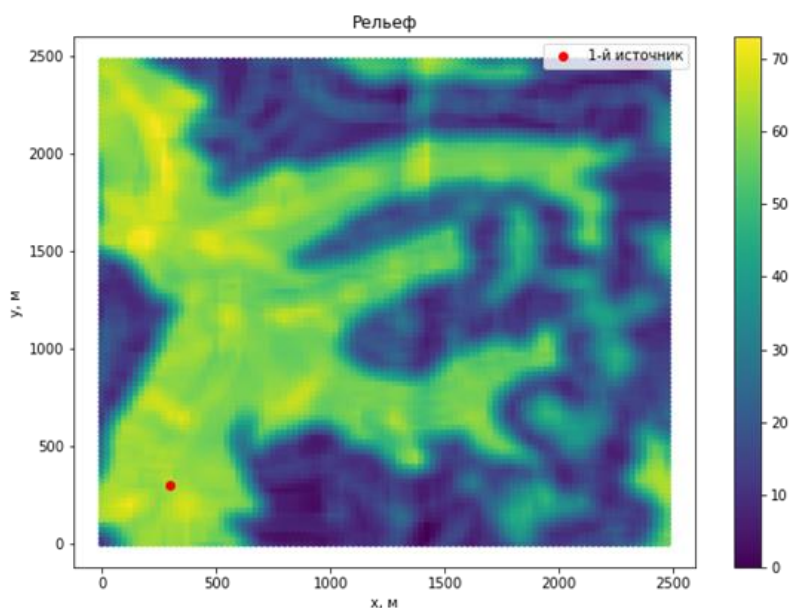


Рис. 2. Рельеф с положением первого источника

Система 3D наблюдений включает в себя 10 000 фиксированных приемников и 400 перемещаемых источников. Расстояние между источниками по координатам x и y равняется 25 м, для приемников расстояние по обеим координатам равняется 100 м. Приемники имеют фиксированное положение, покрывая всю поверхность. Общий объем наблюдений составляет 4 млн.

В данной модели, были рассчитаны амплитуды пришедшего сигнала для отраженных волн от 1-ой и 2-ой границ. Расчет проводился с применением лучевого метода, дальнейший анализ – с использованием максимального значения амплитуды отраженной волны (далее для краткости просто амплитуды). Вид амплитуд, первого источника, указанного на рис. 2, показан на рис. 3, а. Наблюдаемое отличие полученных амплитуд зависит от пройденного лучом пути, зависящего от рельефа и положения источника. Вариации значений амплитуд по всей площади представлены гистограммами, которые приведены на рис. 4, а.

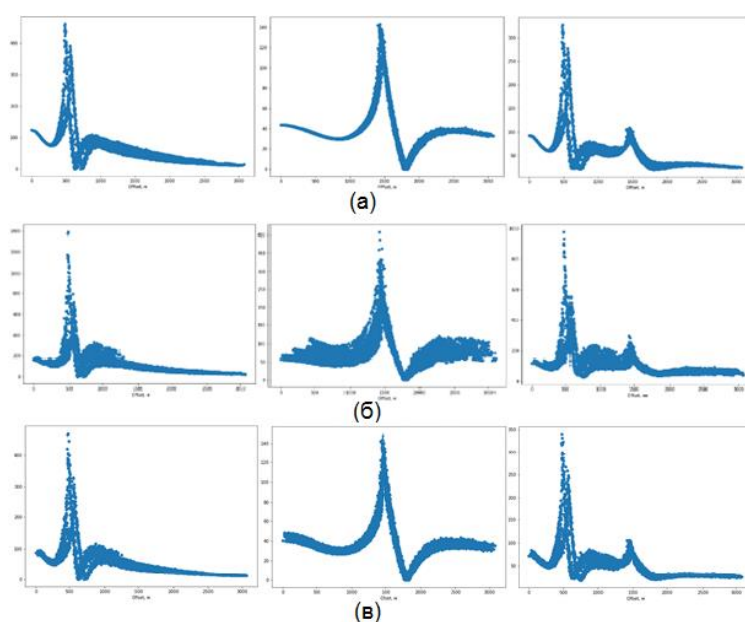


Рис. 3. Зависимость амплитуд отраженных волн от удаления (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений. Описание вариантов (а), (б), (в) дано в тексте

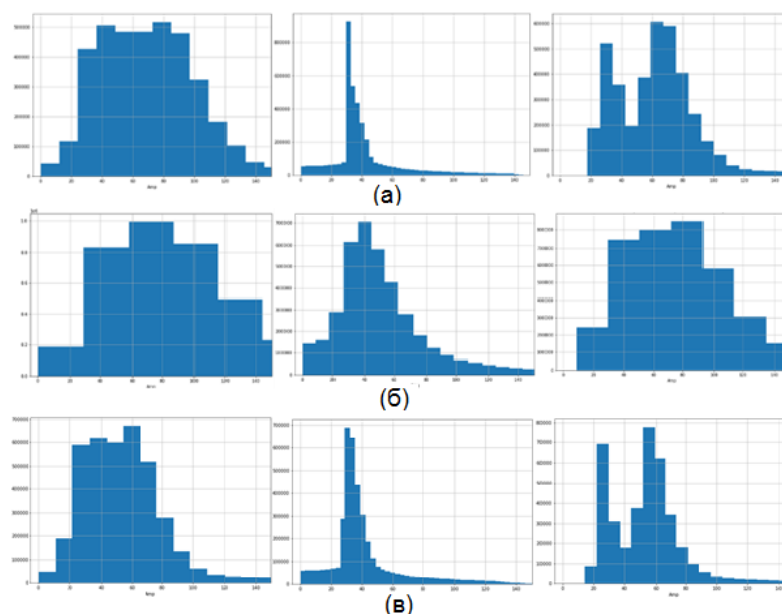


Рис. 4. Гистограммы амплитуд отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений. Описание вариантов (а), (б), (в) дано в тексте

Дальнейшее усложнение амплитуд проводилось посредством умножения каждой рассчитанной амплитуды на три множителя, моделирующих неоднородность верхней части разреза, влияющую на изменение условий возбуждения и приема. Для каждого приемника значение амплитудного множителя определялось в зависимости от того, в каком месте находится приемник. На рисунке 5 показана карта распределения неоднородностей для приемников. На карте видны области с одинаковым множителем, каждая из таких областей соответствует своей физической модели. Так область с более низким значением соответствует более рыхлой, мягкой почве, а более высокие значения соответствуют более плотным породам. Минимальное значение коэффициента равняется 0.75, а максимальное 1.5.

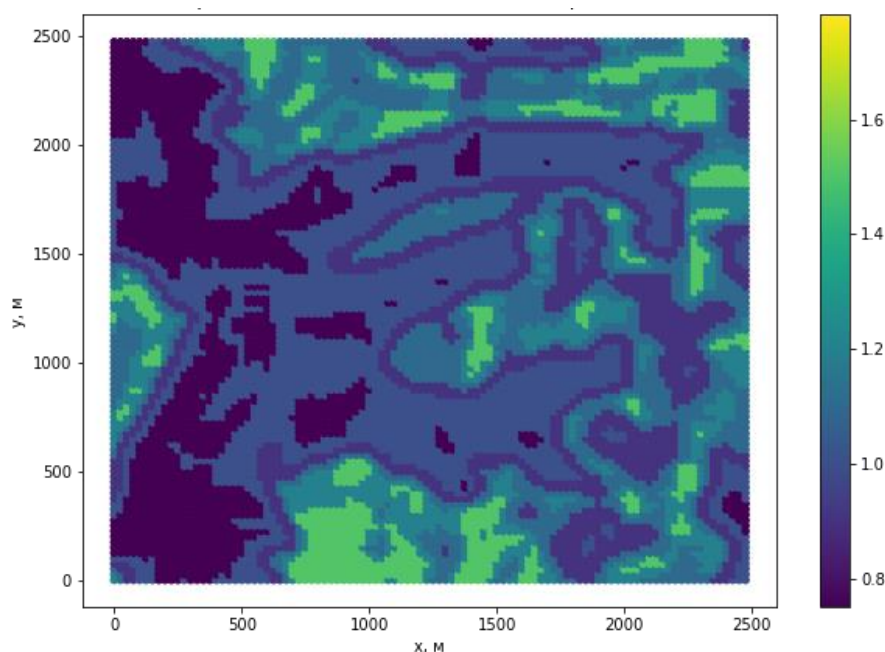


Рис. 5. Вариации амплитуд для приемников

Таким же образом была введена неоднородность для источников. Главным отличием между неоднородностями за источник и приемник состоит в том, что они разночастотные. На рисунке 6 показана карта распределения неоднородностей для источников. Видно, что они носят более низкочастотный характер, чем у приемников. Вариация значений амплитуд в источнике составляет от 0.52 до 1.93.

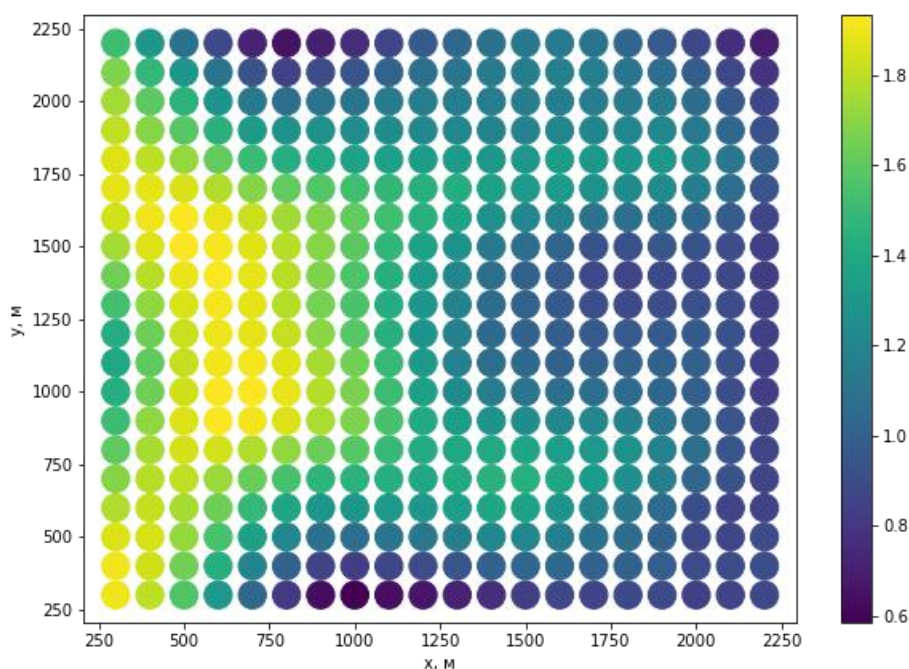


Рис. 6. Вариации амплитуд для источников

Кроме двух указанных типов вариаций, в амплитуды были введены мультипликативные случайные помехи, заданные высокочастотными поверхностно-несогласованная вариациями, величина которых изменялась в интервале от 0.9 до 1.1.

После введения всех указанных вариаций в сигнал, зависимость амплитуды от удаления для анализируемых данных стала не столь однозначной, как у исходных сигналов. Так, сравнение изменений в амплитудах для первого источника (см. рис. 3, б) показывает, что для одного и того же удаления, встречаются большие разбросы по амплитудам, при этом основной вид зависимости сохраняется. Эти изменения проявляются и в структуре гистограмм, характеризующих всю совокупность данных (см. рис. 4, б).

ОЦЕНКА И КОРРЕКТИРОВКА АМПЛИТУД ПО МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Для оценивания вариаций амплитуд в рамках модельного эксперимента применялись две модели: двухфакторная (4) и трехфакторная (5). Это позволило продемонстрировать возможности разрабатываемой процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд по выбору оптимальной факторной модели при работе с имеющимися данными.

Для каждой из моделей была выполнена факторная декомпозиция на основе решения соответствующей СЛАУ. Полученные оценки факторов после их потенцирования были использованы для формирования оценок амплитуд сигналов, очищенных от вариаций, связанных с неоднородностью условий возбуждения и приема сейсмических колебаний, а также вариаций, вызванных случайными некоррелированными мультипликативными помехами. Эти значения амплитуд были вычтены из

наблюденных амплитуд. Полученные разности представлены в виде гистограмм, которые показаны на рис. 7. Здесь же приведены значения среднеквадратических отклонений.

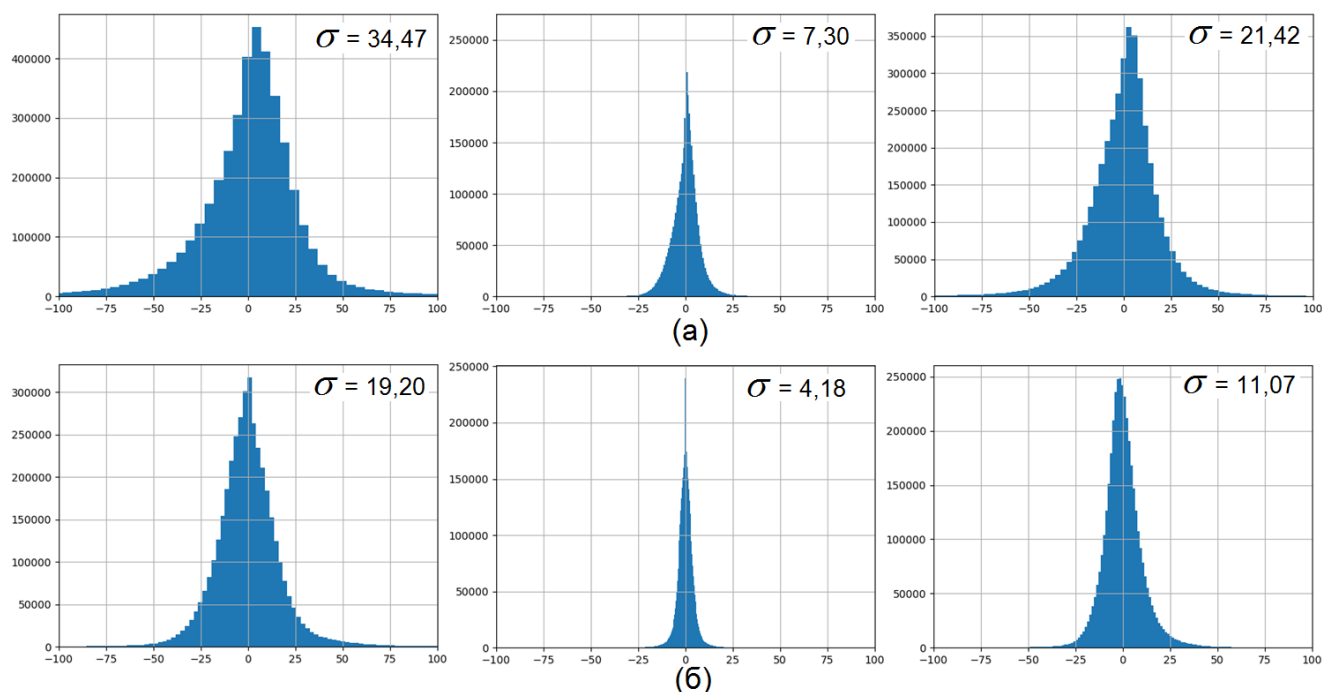


Рис. 7. Гистограммы разностей амплитуд, полученные для отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений, в случае применения двухфакторной (а) и трехфакторной (б) модели

Согласно рис. 7, применение трехфакторной модели обеспечивает повышение точности корректировки амплитуд. При этом не только уменьшается значение среднеквадратического отклонения, но и улучшается структура разностных гистограмм, приобретающая более симметричную форму. Выполненный анализ позволил нам выбрать трехфакторную модель в качестве основной для процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд модельных данных.

Выбранная трехфакторная модель служила основой для построения СЛАУ, содержащей 4 млн. уравнений. Здесь неизвестными являлись 400 значений фактора за источник, 10 тысяч значений фактора за приемник и 176 значений фактора за удаление. Отметим, что при формировании части матрицы, отвечающей фактору за удаление, наблюдения и соответствующие уравнения были объединены в группы по 20 м. В качестве наблюдений в левой части могут выступать амплитуда отраженной волны от первой границы, амплитуда отраженной волны от второй границы или же среднеквадратичное значение энергии, отнесенное к единичному отсчету для двух сигналов. Таким образом, получается не одна, а три системы уравнений с одинаковой правой, но разными левыми частями.

Для того чтобы однозначно решить любую из полученных СЛАУ, необходимо добавить уравнения, содержащие априорную информацию. Для данной факторной модели и данной системы наблюдений достаточно добавить априорную информацию за один источник и один приемник. Таким же образом делается для двух других систем уравнений.

В результате решения систем уравнений были получены поправки за источники, приемники и удаления. Полученные поправки за приемники приведены на рис. 8, поправки за источники приведены на рис. 9.

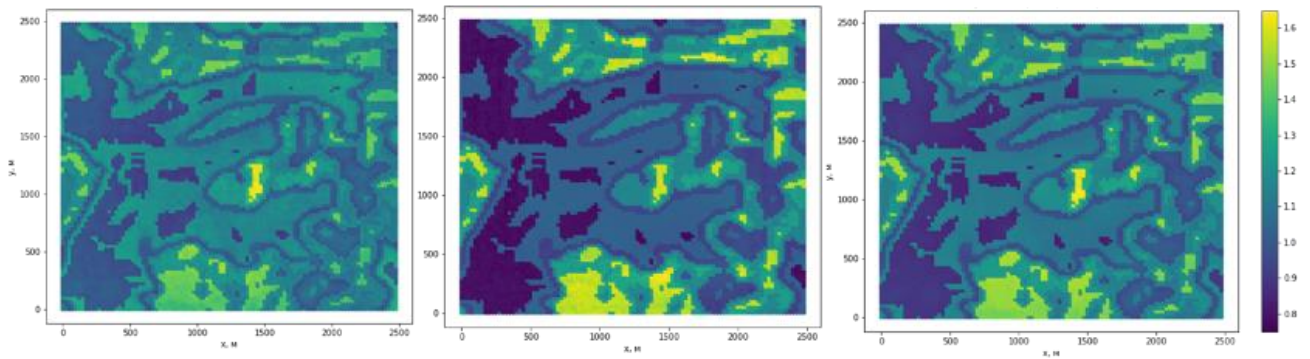


Рис. 8. Оценки фактора за приемники, полученные для разных отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

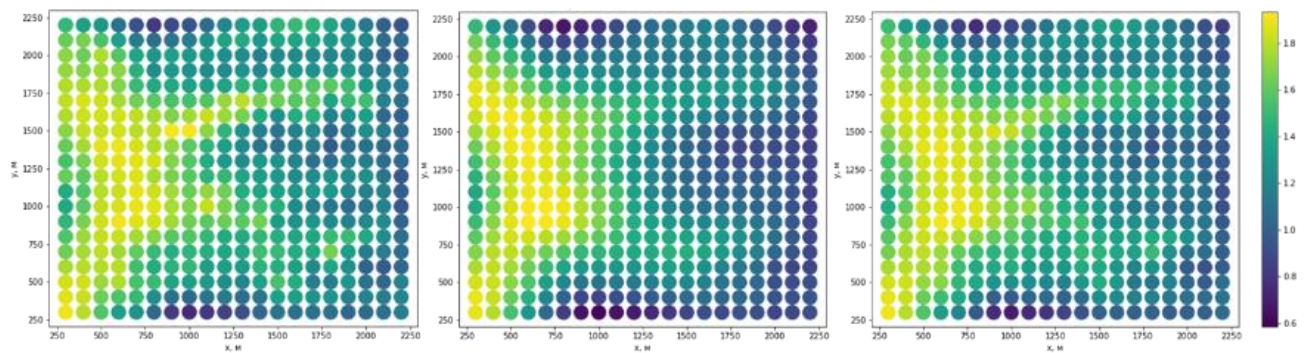


Рис. 9. Оценки фактора за источник, полученные для разных отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

Полученные поправки за удаления приведены на рис. 11. Зависимость полученных поправок от удаления имеет вид аналогичный зависимости амплитуды исходных отраженных сигналов (см. рис. 3, а).

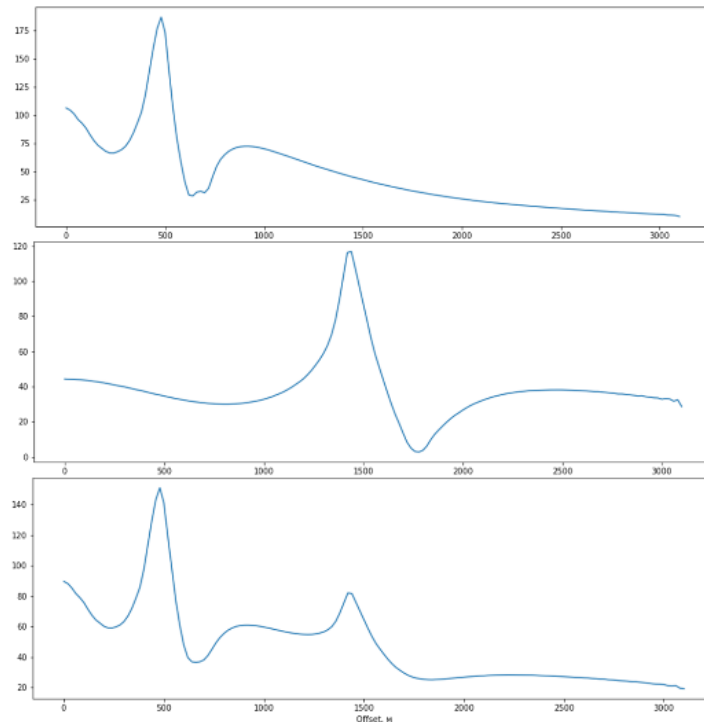


Рис. 10. Оценки фактора за удаление, полученные для разных отраженных волн (сверху вниз): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

Сравнивая полученные оценки фактора за приемники (см. рис. 8) и за источники (см. рис. 9) с модельными вариациями (см. рис. 5 и 6), видим, что применяемое нами решение позволяет разделять разнопериодные вариации для источников, приемников и удалений.

Полученные поправки за источник и приемник были введены в модельные трассы для устранения влияния верхней части разреза. Зависимость амплитуды от удаления для первого источника после учета вариаций приведена на рис. 3, в. Сравнивая начальные зависимости амплитуды отраженной волны от удаления для первого источника и распределения амплитуды по всей площади (рис. 3, а и 4, а) с результатами, полученными после корректировки данных (см. рис. 3, в и 4, в) можно сделать следующий вывод: разработанная процедура позволяет достаточно точно получить амплитуды отраженных сигналов, освобожденные от влияния неоднородностей в условиях возбуждения и приема колебаний.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ К РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Тестирование процедуры на реальных данных проводилось с применением двухфакторной модели. Это было связано с тем, что исходные данные были подвергнуты предварительной обработке, устранившей изменение амплитуд в зависимости от удаления источник–приемник. 3D система наблюдений имела 23 777 уникальных источников, 25 686 уникальных приемников. Общее количество наблюдений составляло 110 621 697. Поверхностное расположение 3D системы наблюдений показано на рис. 11.

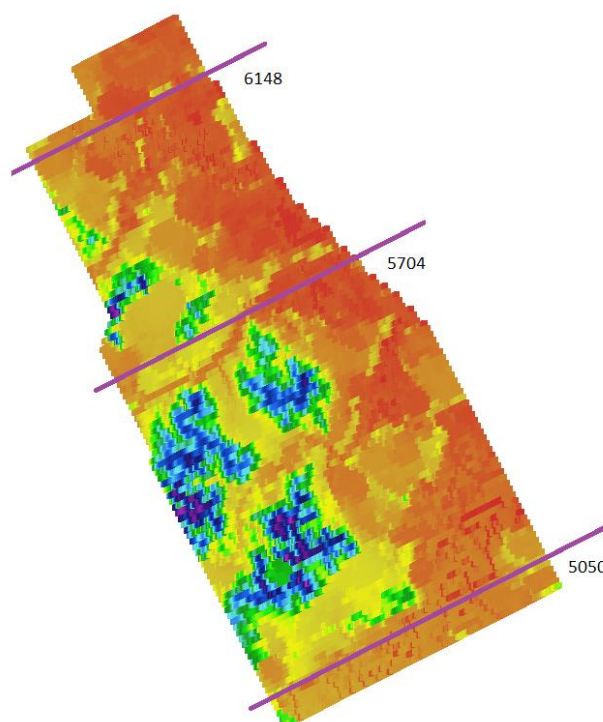


Рис. 11. Поверхностное расположение системы наблюдений. Линиями указаны тестовые профили. Цветом показаны высоты приемников (минимальная высота – синий цвет, максимальная высота – красный цвет)

На рисунке 12 показаны суммарные разрезы и энергия по опорным горизонтам для тестовых профилей до применения процедуры. Заметно наличие трасс, амплитуда которых сильно отличается от амплитуды соседних трасс. Это так же видно на графиках с энергией по опорным горизонтам, приведенным на рис.12 над разрезами.

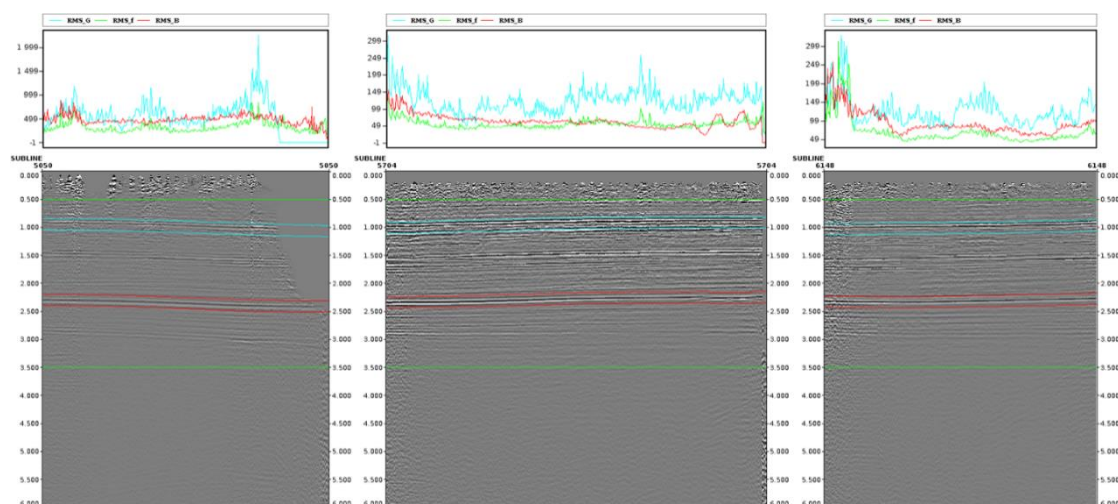


Рис. 12. Суммарные разрезы по тестовым профилям (слева профиль 5050, в центре 5704, справа 6148), синим цветом выделен горизонт G, красным цветом – горизонт B, зеленым цветом – окно 500–3500 мс

На рисунке 13 показана энергия по опорным горизонтам по всей площади. На этом рисунке видно, что амплитуды отраженных волн сильно отличаются в различных областях опорных горизонтов. По мнению заказчика, многие из имеющихся амплитудных аномалий могли быть связаны с поверхностно-согласованными неоднородностями.

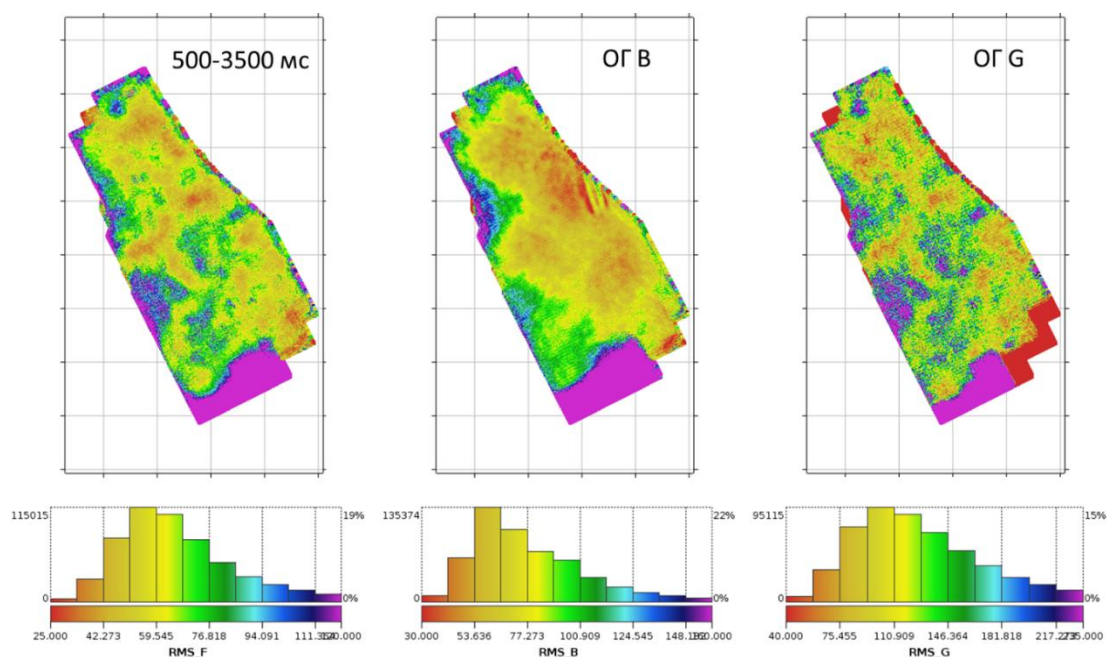


Рис. 13. Энергия по опорным горизонтам до применения процедуры

Согласно статье [Кушнарев и др., 2021], решение проблемы вырожденности СЛАУ для двухфакторной модели требует добавления псевдо-априорной информация. В качестве такого дополнения выступает одно уравнение, которое содержит информацию о том, что среднее значение поправок за источник равно нулю. Оно полностью устраняет неоднозначность решения.

Для оценивания качества результата применения поправок, полученных разработанной процедурой (рис. 14 и 15), была выполнена аналогичная процедура, реализованная в программном пакете GEOVATION (рис. 16 и 17).

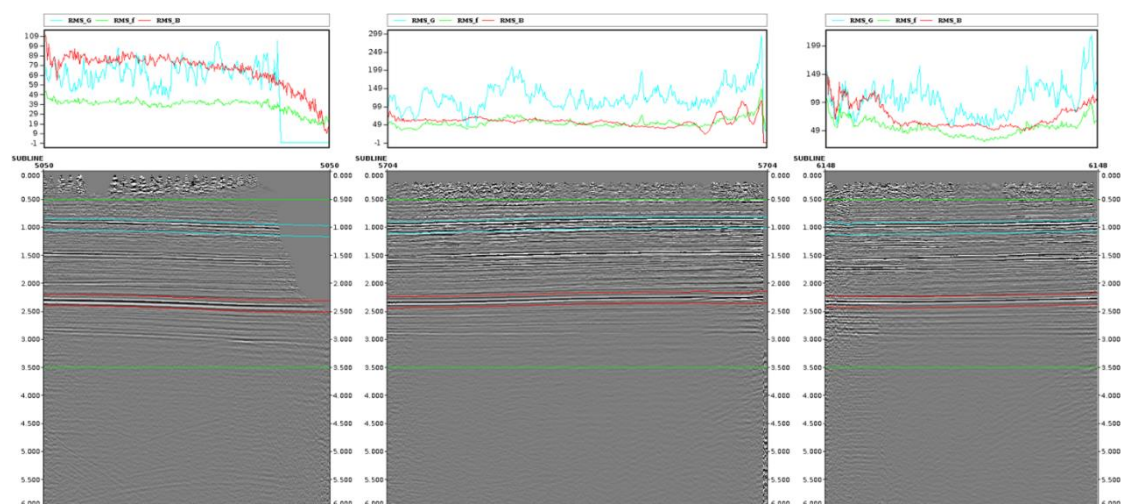


Рис. 14. Суммарный разрез после применения разработанной процедуры

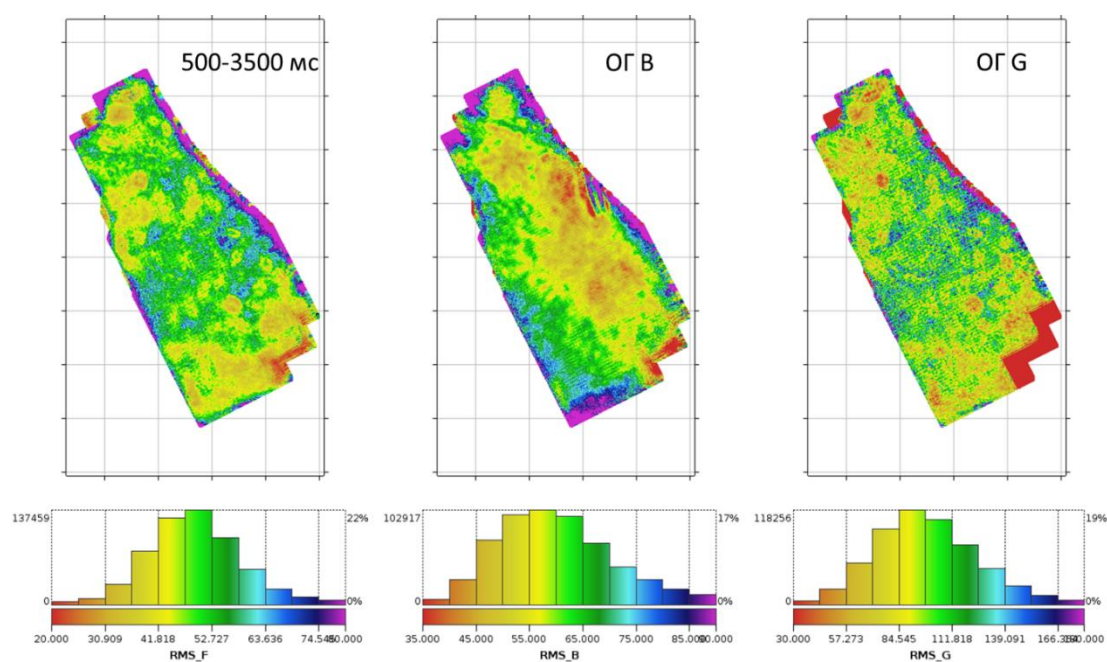


Рис. 15. Энергия по опорным горизонтам после применения разработанной процедуры

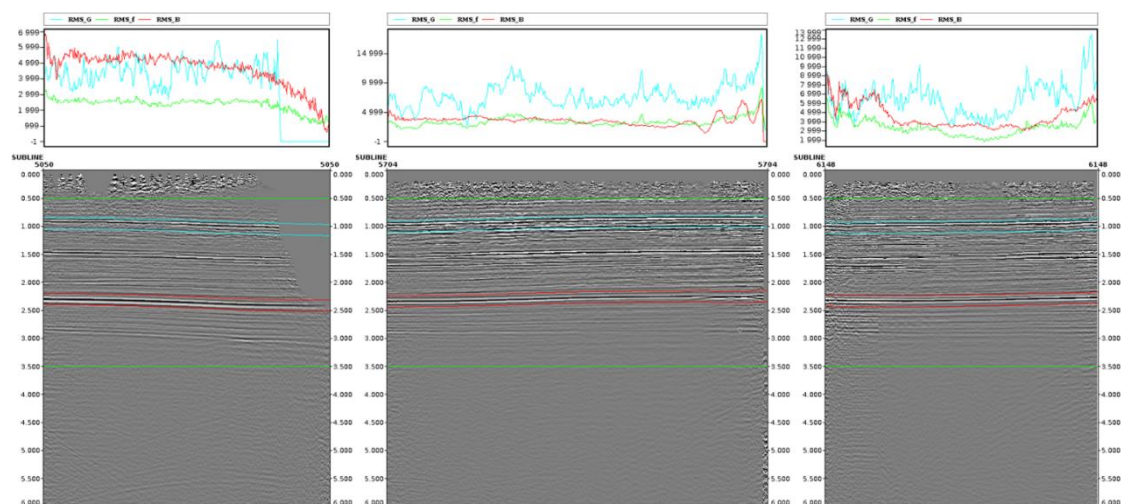


Рис. 16. Суммарный разрез после процедуры GEOVATION

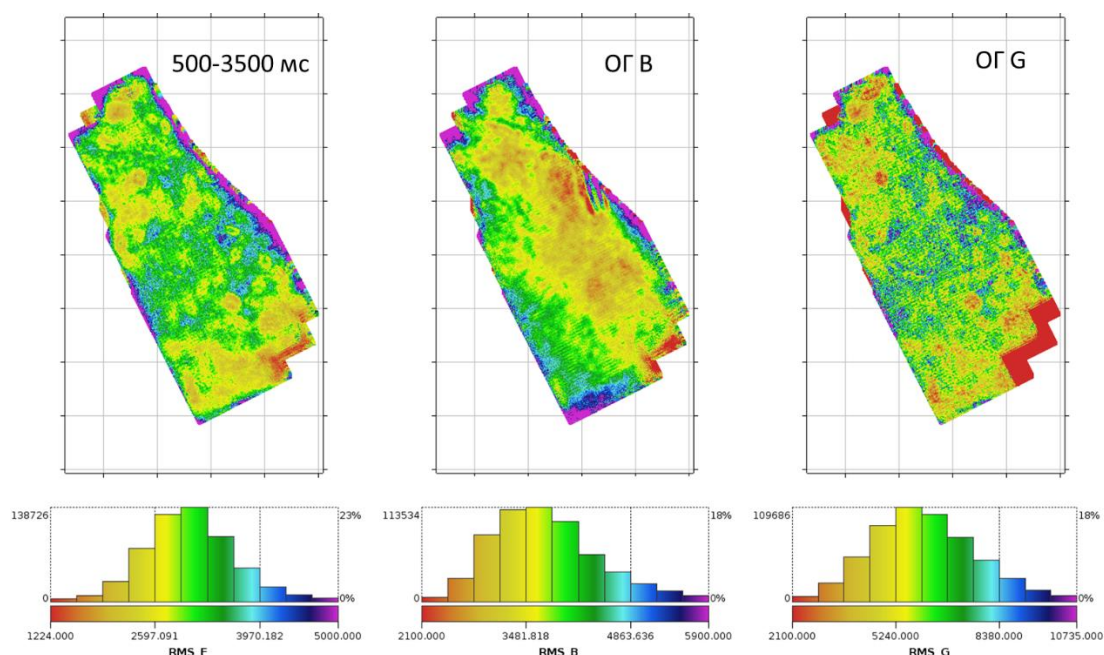


Рис. 17. Энергия по опорным горизонтам после процедуры GEOVATION

После введения полученных поправок, распределение амплитуд по опорным горизонтам стало более однородным, как по результатам разработанной процедуры, так и с применением процедуры из пакета GEOVATION. Тестовые суммарные разрезы показывают, что полученные поправки позволили скорректированы трассы, амплитуда которых сильно отличалась от соседних трасс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка модельных данных с применением различных факторных моделей продемонстрировала возможность выбора оптимальной модели, обеспечивающей наилучшую поверхностно-согласованную коррекцию амплитуд. При этом применение трехфакторной модели на синтетических данных, позволило разделить разночастотные вариации за источник и приемник, а также получить зависимость амплитуды сейсмического сигнала от удаления. Интересными представляются результаты, относящиеся к отдельным сигналам и их совокупности. Они указывают на различие в получаемых оценках факторов.

Результаты применения разработанной процедуры на реальных данных показали, что на ее основе удастся получать корректировку данных, которая не уступает процедуре, реализованной в зарубежном программном комплексе GEOVATION, широко используемом в российских нефтегазовых компаниях.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0025.

ЛИТЕРАТУРА

- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. – Киев: Знание, 1973. – С. 6–8.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. – 1975. – № 6. – С. 102–112.

- Гурвич И.И.** О теоретических основах динамических измерений в сейсморазведке // Известия вузов. Геология и разведка. – 1970. – № 6. – С. 108–113.
- Давлетханов Р.Т.** Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отраженных волн, соответствующих пластовой модели среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. – М.: МГУ, 2017.
- Долгих Ю.Н.** Методика коррекции сейсмоструктурных построений за длиннопериодные погрешности, обусловленные влиянием неоднородностей ВЧР // Технологии сейсморазведки. – 2010. – № 3. – С. 60–68.
- Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
- Кушнарев Р.С., Гореев Н.А., Митрофанов Г.М.** Алгоритм поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд и его тестирование на модельных данных // Геофизические технологии. – 2021. – № 4. – С. 26–35, doi: 10.18303/2619-1563-2021-4-26.
- Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б.** Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.
- Митрофанов Г.М.** Учет поверхностных неоднородностей в методе ОГТ // Тезисы докладов X научной студенческой конференции (Геология. Геофизика. Геохимия). – Новосибирск: НГУ, 1972. – С. 44–45.
- Митрофанов Г.М.** Нелинейные преобразования сигналов с применением спектральных и факторных разложений (приложение к сейсморазведке). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 444 с.
- Mitrofanov G., Goreyavchev N., Kushnarev R.** Improving accuracy in studying the interactions of seismic waves with bottom sediments // Journal of Marine Sand Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2). – 229, doi: 10.3390/jmse9020229.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Wagner D.E., Baysal E., Lu L.** A unified method for 2-D and 3-D refraction statics // Geophysics. – 1998. – Vol. 63 (1). – P. 260–274, doi: 10.1190/1.1444320.

REFERENCES

- Davletkhanov R.T.** Correction of seismic records for the influence of the upper part of the section with the preservation of the kinematics of reflected waves corresponding to the reservoir model of the medium. PhD Thes. [in Russian]. – MSU, Moscow, 2017.
- Dolgikh Yu.N.** Method of correction of seismostructural constructions for long-period errors caused by the influence of inhomogeneities of the RF // Technologies of Seismic Exploration. – 2010. – Vol. 3. – P. 60–68.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Reconstruction of the signal shape in the presence of surface inhomogeneities. // Seismic methods of prospecting and exploration of minerals [in Russian]. – Znanie, Kiev, 1973. – P. 6–8.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Spectral-statistical method for accounting for surface inhomogeneities in systems for multiple tracking of reflected waves // Soviet Geology and Geophysics. – 1975. – Vol. 6. – P. 102–112.
- Gurvich I.I.** On the theoretical foundations of dynamic measurements in seismic exploration. Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1970. – Vol. 6. – P. 108–113.

- Kobzar A.I.** Applied mathematical statistics. For engineers and scientists [in Russian]. – Fizmatlit, Moscow, 2006. – 816 p.
- Kozyrev V.S., Zhukov A.P., Korotkov I.P., Zhukov A.A., Schneerson M.B.** Consideration of inhomogeneities of the upper part of the section in seismic exploration. Modern technologies [in Russian]. – LLC "Nedra-Businesscenter", Moscow, 2003. – 227 p.
- Kushnarev R.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M.** Algorithm of surface-matched compensation of seismic amplitudes and its testing on model data // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2021. – Vol. 4. – P. 26–35, doi: 10.18303/2619-1563-2021-4-26.
- Mitrofanov G.M.** Accounting for surface inhomogeneities in the CDP method // Abstracts of the X scientific student conference (Geology. Geophysics. Geochemistry). – NSU, Novosibirsk, 1972. – P. 44–45.
- Mitrofanov G.M.** Nonlinear signal transformations using spectral and factor decompositions (appendix to seismic exploration) [in Russian]. – NSTU Publishing House, Novosibirsk, 2018. – 444 p.
- Mitrofanov G., Goreyavchev N., Kushnarev R.** Improving accuracy in studying the interactions of seismic waves with bottom sediments // Journal of Marine Sand Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2). – 229, doi: 10.3390/jmse9020229.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Wagner D.E., Baysal E., Lu L.** A unified method for 2-D and 3-D refraction statics // Geophysics. – 1998. – Vol. 63 (1). – P. 260–274, doi: 10.1190/1.1444320.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КУШНАРЕВ Роман Сергеевич – студент НГУ, лаборант лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследование систем линейных уравнений в задачах обработки геофизических данных.

ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методы повышения эффективности обработки геофизических данных.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: обработка и интерпретация геофизических данных, методы решения обратных задач.



ОЦЕНКА НЕФТЕНАСЫЩЕННОСТИ КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА: ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФИЗИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТОВ

А.Ю. Соболев^{1,2}, Г.В. Москалев²

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

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

Предложена схема проведения численного эксперимента для оценки качества интерпретации каротажных сигналов с использованием цифровой модели нефтяного коллектора, включающей геологические, петрофизические и физические параметры среды и взаимосвязанное моделирование в системе АТЛАС МФМ физических процессов, протекающих в околоскважинном пространстве. Оценивается доверительный интервал нефтенасыщенности, полученной в результате интерпретации зашумленных синтетических каротажных кривых для моделей с низким и высоким удельным сопротивлением.

Удельное электрическое сопротивление, прискважинная зона, зона проникновения, электромагнитный каротаж, ВИКИЗ, геоэлектрическая модель

RECOVERING OIL RESERVOIR PARAMETERS ACCORDING TO HIGH-FREQUENCY INDUCTION LOGGING DATA: NUMERICAL STUDY USING MULTIPHYSICS MODELING

A.Yu. Sobolev^{1,2}, G.V. Moskalev²

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

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

The paper proposes a scheme of numerical experiment to assess the quality of interpretation of logging signals using a digital model of the oil reservoir, including geological, petrophysical, and physical parameters of the environment and interrelated modeling in the ATLAS MPhM system of physical processes occurring in the near-well space. The confidence intervals of oil saturation obtained as a result of interpretation of noisy synthetic logging curves for models with low and high resistivity are estimated.

Resistivity, near borehole zone, invaded zone, electromagnetic logging, VIKIZ, geoelectrical model

ВВЕДЕНИЕ

Определение параметров нефтегазонасыщенных пластов-коллекторов по данным геофизических и геотехнологических исследований скважин – важнейшая задача скважинной геофизики. Изучение и сравнение разных подходов к интерпретации данных является актуальным. Разработанная в ИНГГ СО РАН система АТЛАС МФМ [Нестерова и др., 2021] позволяет описать нефтяной коллектор, задав

физические, петрофизические и геологические параметры. Далее решаются задачи взаимосвязанного моделирования геомеханических, гидродинамических и геофизических процессов [Нестерова и др., 2019]. Распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) при этом является следствием многофизичных процессов, протекающих в околоскважинном пространстве в процессе и после бурения скважины. Такая система позволяет проводить численные эксперименты и опробовать подходы к обработке каротажных данных, используя «цифровой двойник» пласта.

В работе предложена схема вычислительного эксперимента, использующая многофизичное моделирование взаимосвязанных процессов в околоскважинной зоне. Оценивается достоверность определения петрофизических параметров нефтенасыщенного пласта по синтетическим данным электромагнитного каротажа, полученным с помощью электрофизического, гидродинамического и геомеханического моделирования в АТЛАС МФМ [Нестерова и др., 2021].

ПРОЦЕССЫ В СКВАЖИНЕ

Общая схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 1. Моделирование процессов в околоскважинном пространстве проводится с помощью блоков, входящих в состав АТЛАС МФМ (см. рис. 1, левая колонка). Это блоки геомеханического и гидродинамического моделирования, задание петрофизических зависимостей и моделирование сигналов электрического и электромагнитного каротажа.

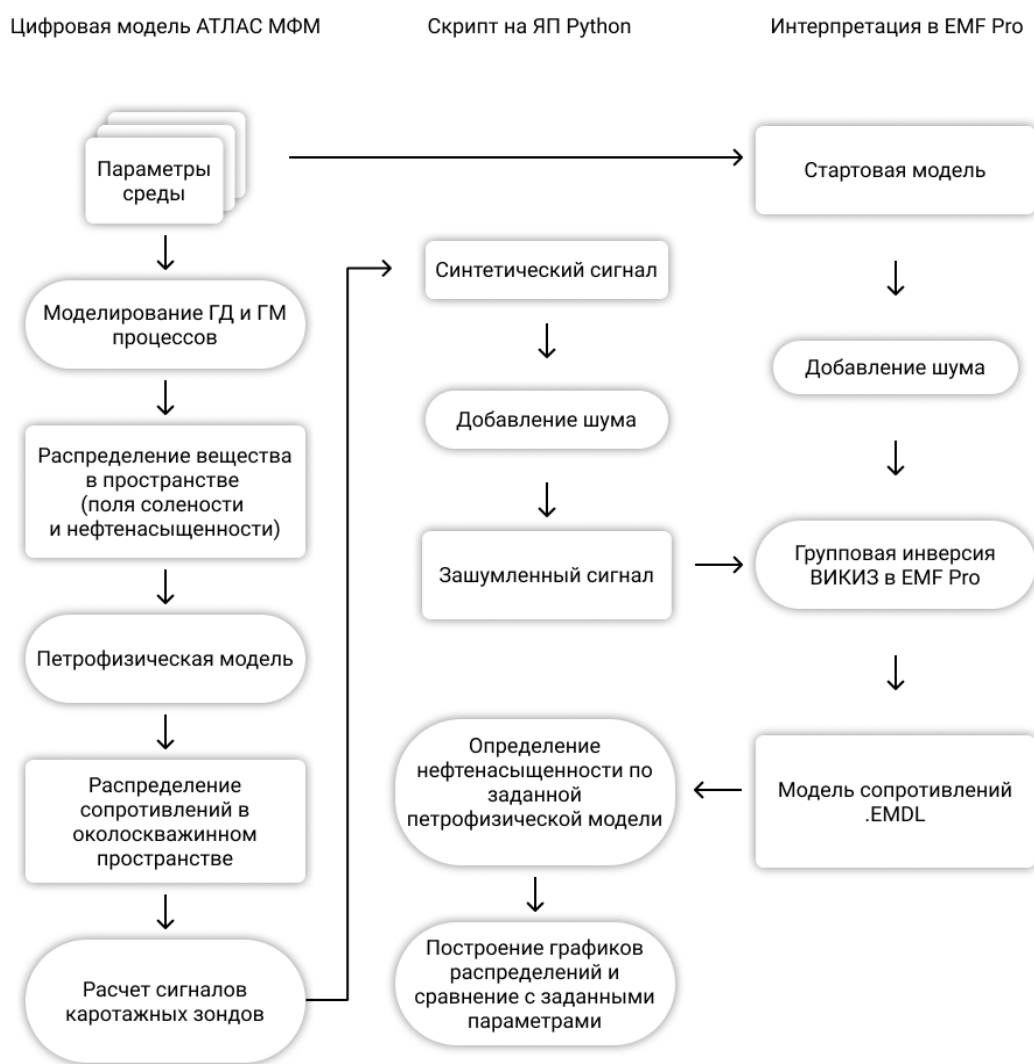


Рис. 1. Схема вычислительного эксперимента

Геомеханическая и гидродинамическая задача

Факторами, которые определяют процессы в околоскважинном пространстве в начале и по завершению бурения, являются изменение напряженно-деформированного состояния скелета породы, перераспределение давлений, разрушение пород и изменение проницаемости, циркуляция бурового раствора, фильтрация жидкостей (воды и нефти) и солеперенос, рост и разрушение глинистой корки [Кашеваров и др., 2003; Назарова и др., 2013].

Процесс двухфазной фильтрации и солепереноса в околоскважинном пространстве описывается системой уравнений Баклея–Левретта, в которую входят закон Дарси, закон сохранения массы для каждой фазы, линейная зависимость пористости от давления, уравнение солепереноса и роста глинистой корки [Кашеваров и др., 2003].

На глубинах, типичных для нефтегазовых месторождений Западной Сибири, необходимо также учитывать деформацию за пределом упругости и разрушение пород в прискважинной зоне, что приводит к изменению проницаемости [Назарова и др., 2013].

Деформирование среды описывается упругопластичной моделью, включающей уравнения равновесия, соотношения Коши, закон Гука для упругих областей, а также критерии разрушения породы и условие аддитивности тензора приращения деформации.

Совместная геомеханическая и гидродинамическая задача решается поэтапно: методом конечных элементов находится распределение напряжений и деформаций, по известным напряжениям определяется проницаемость, для каждого времени конечноразностным методом переменных направлений решается задача фильтрации и солепереноса, и методом Эйлера решается задача о росте глинистой корки, описывающейся обыкновенным дифференциальным уравнением [Назарова и др., 2013].

Результатом этого этапа являются распределения солёности и водонасыщенности в околоскважинном пространстве в зависимости от времени, глубины, расстояния от центра скважины и – для неосесимметричных случаев – угла [Ельцов и др., 2014].

Петрофизические модели

Перераспределение вещества и солеперенос приводят к изменению электрических параметров среды, однако связь эта не является тривиальной. В нефтегазовой индустрии принято описывать эту связь некоторой эмпирической зависимостью, вид которой зависит от типа коллектора, а конкретные параметры определяются по керновым исследованиям и каротажу [Нестерова и др., 2008]. В системе АТЛАС можно выбрать из нескольких видов зависимости; для чистых песчаников используется формула Арчи-Дахнова:

$$\rho = \rho_w \varphi^{-n} S^{-m}, \quad (1)$$

где φ – пористость, S – водонасыщенность, ρ – удельное электрическое сопротивление (УЭС) водонефтенасыщенного образца, ρ_w – УЭС полностью водонасыщенного образца, m и n – параметры Арчи.

Для учета неполного вытеснения в системе АТЛАС используется так называемая обобщенная формула Арчи [Ельцов и др., 2004]:

$$\rho = A(C + C_0)^{-p}(S + S_0)^{-m}(\varphi + \varphi_0)^{-n}, \quad (2)$$

где C – концентрация солей в поровой воде, а индексом 0 обозначаются остаточные, не участвующие в фильтрации величины.

Для глинизированных коллекторов выбираются формулы Гловера и де Лима [de Lima, 1995; Нестерова и др., 2008].

Вычисления не являются ресурсоемкими и выполняются «на лету», результатом этого этапа является распределение электропроводности в околоскважинном пространстве в каждый момент времени.

Для целей настоящей работы использовались формулы (1)–(2) с параметрами по умолчанию.

Распространение электромагнитных полей

В некоторый момент после вскрытия пласта – обычно от часа до нескольких суток – проводится запись показаний каротажных приборов. Для моделирования этого процесса в системе АТЛАС есть модули расчета синтетических сигналов для методов постоянного тока и высокочастотного электромагнитного каротажа. В последнем случае записывается система уравнений Максвелла для амплитуд электрического $\mathbf{E}$ и магнитного $\mathbf{H}$ полей в гармоническом режиме; эта система с источником в виде вертикального магнитного диполя приводится к уравнению Гельмгольца относительно вектора аномального электрического поля $\mathbf{E}^a$ [Суродина, Нестерова, 2019]:

$$-\Delta^2 \mathbf{E}^a + \mathbf{E}^a(i\omega\epsilon - \sigma)i\omega\mu = \mathbf{E}^0(\sigma - \sigma_0 - i\omega\epsilon)i\omega\mu, \quad (3)$$

где $\mathbf{E}^0$ — поле в однородной среде с проводимостью σ_0 , $\sigma(x, y, z)$ – проводимость среды, $\epsilon(x, y, z)$ – диэлектрическая проницаемость, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость, ω – циклическая частота. Задача дискретизируется с использованием консервативной конечно-разностной схемы для случая разрывных коэффициентов на неравномерной сетке, матрица СЛАУ симметризируется [Суродина, Нестерова, 2015] и решается итерационным методом [Суродина, Нестерова, 2019]. Результатом являются синтетические сигналы каротажа для выбранных моментов времени.

Инверсия

Традиционная обработка каротажных сигналов ВИКИЗ [Ельцов и др., 2016] заключается в оценке параметров $\mathbf{P}$ (УЭС и толщины слоев) эквивалентной цилиндрически-слоистой модели оптимизационным методом. Для этого вводится функционал, фактически являющийся L2-нормой в пространстве сигналов, расстояние между измеренным $\mathbf{X}$ и теоретическим $\mathbf{Y}(\mathbf{P})$ сигналами:

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}(\mathbf{P})) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{X_i^2 \delta_i^2}}, \quad (5)$$

где n – количество измерений, δ_i – погрешность i -го измерения.

Строится начальное приближение – стартовая модель $\mathbf{P}_0$, и затем итерационно функционал F^2 минимизируется с помощью алгоритма Нелдера–Мида и SVD-разложения. Результатом является полученная оценка параметров $\mathbf{P}$ для каждого пропластка.

ОЦЕНКА КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВМЕСТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Описание модели среды

Для численного эксперимента использовались характеристики среды, присущие юрскому нефтяному коллектору (ЮС2), выделяемому в разрезе Сургутского свода Западной Сибири. Коллектор представлен мелко- или среднезернистым песчаником и крупнозернистым алевритом. В разрезе

преобладают алевриты, а песчаники выделяются в кровельных частях пластов. Пласт залегает на интервале 2700–2900 м и обладает высокой нефтенасыщенностью в верхних слоях (85–95 %). Для этого коллектора присущи следующие значения фильтрационно-емкостных характеристик: проницаемость — 8–20 мД, пористость — 15–19 %. Плотность пласта составляет 2400 кг/м³, минерализация пластовой воды — 25–40 г/л [Тюкавина, 2013; Нечаева и др., 2016].

Основные параметры, которые использовались в работе — пористость, нефте- и водонасыщенность, проницаемость. Нефтенасыщенность цифровых моделей коллекторов задавалась в диапазоне от 10 до 97 %, пористость от 10 до 20 %, проницаемость 30 мД. Остальные параметры, в частности касающиеся параметров бурения, взяты из работы [Нечаева и др., 2016].

Описание численного эксперимента

Полученные для заданных параметров среды синтетические сигналы зашумлялись нормально распределенным шумом, параметры которого брались либо из паспортной характеристики аппаратуры $\pm(2.6+20/\Delta f)$ %, или оценивались из реальных измерений 0.2–1.8 % [Москалев, Соболев, 2018]. Таким образом для каждой модели генерировались по 500 реализаций — «измерений», который далее обрабатывались в EMF Pro.

Для оптимизационных алгоритмов EMF Pro для каждой модели требуется подобрать стартовое значение параметров P_0 . В системе встроена возможность автоматического построения стартовой модели, однако в случае отсутствия шума результаты инверсии получаются идентичными и не отражают неопределенность (дисперсию) результатов.

Поэтому стартовая модель задавалась также программно: ко всем значениям параметров среды добавлялся нормально распределенный десяти- или пятидесятипроцентный шум (см. рис. 1). Для незашумленных сигналов это эквивалентно мультистартовому алгоритму.

Завершающий этап сводится к определению нефтенасыщенности по заданной петрофизической модели и построением графиков распределений с последующим сравнением полученных экспериментально и изначально заданных параметров.

Определение нефтенасыщенности и полученный результат

При создании синтетической модели среды в АТЛАС МФМ была задана нефтенасыщенность 65 %. Это значение является средним для месторождений Западной Сибири [Балин и др., 2014]. После стандартной интерпретации сигналов ВИКИЗ построена электрофизическая модель и получены оценки нефтенасыщенности.

В низкоомном коллекторе удельное сопротивление пласта (см. рис. 2А) определяется устойчиво, среднее значение $\rho = 6.3$ Ом·м, дисперсия около 2 % от среднего УЭС; намного менее устойчиво определяются параметры зоны проникновения (УЭС и радиус). В результате параметр нефтенасыщенности (рис. 2Б) определяется хуже: дисперсия около 10 % и его оценка существенно занижена (45–55 % при ожидаемой 65 %). Результат почти не зависит от уровня шума, добавленного к синтетическому сигналу.

В случае высокоомного карбонатизированного коллектора полученные оценки УЭС пласта (см. рис. 3А) имеют дисперсию выше 10 %, что существенно превышает погрешность измерений. Значения нефтенасыщенности (рис. 3Б) в среднем немного завышены, распределились в диапазоне 40–70 %, хотя большая часть результатов приходится на узкий диапазон с дисперсией меньше 5 %.

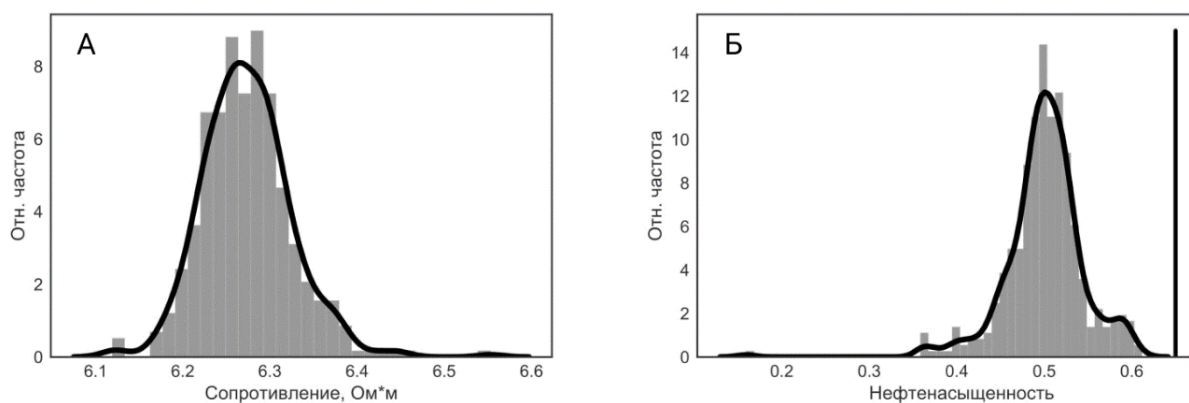


Рис. 2. Распределение полученных значений удельного сопротивления (А) и нефтенасыщенности (Б) пласта для синтетических сигналов низкоомного коллектора

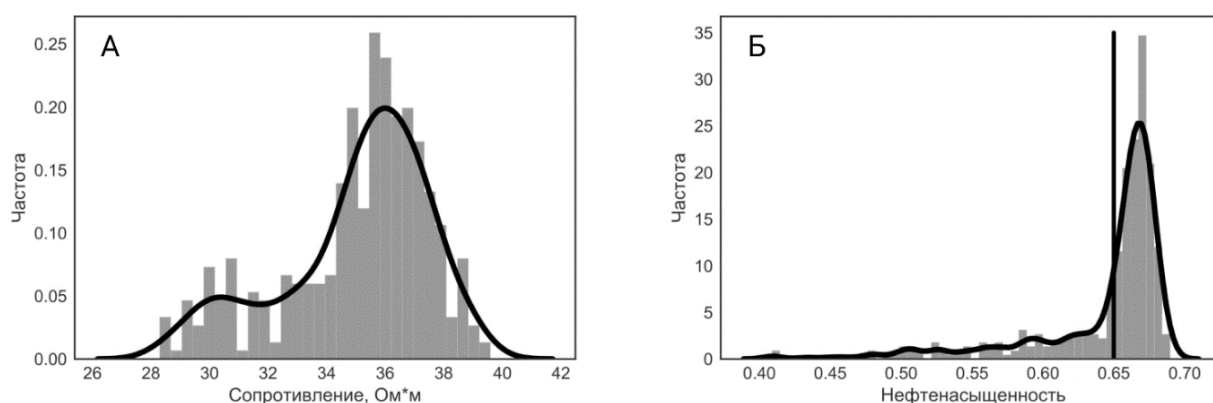


Рис. 3. Распределение полученных значений удельного сопротивления (А) и нефтенасыщенности (Б) пласта для синтетических сигналов высокоомного коллектора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многофизичная цифровая модель водонефтенасыщенного пласта позволяет проводить численные эксперименты, и в частности, опробовать алгоритмы обработки каротажных данных. Электрофизические параметры околоскважинного пространства при этом оказываются не независимыми: распределение УЭС является следствием процессов, протекающих в околоскважинном пространстве в процессе и после бурения скважины.

Показано, что доверительный интервал полученных таким образом оценок коэффициента нефтенасыщенности k_{oil} для пластов неограниченной мощности довольно широк: для типичного коллектора — 10–15 %, для карбонатизированного — 20–30 %, и мало зависит от аппаратного шума. Кроме того, оценка k_{oil} по данным электромагнитного каротажа оказалась систематически смещенной (заниженной) на 15 %.

Предполагается, что одна из причин такой низкой достоверности определения коэффициента нефтенасыщенности состоит в используемой модельной базе интерпретации, при которой электрофизические параметры полагаются независимыми и аппроксимируются двумя-тремя слоями с кусочно-постоянным значением УЭС, что приводит к эквивалентности параметров промытой зоны.

Работа выполнена в рамках базового проекта НИР № FWZZ-2022-0025 «Геоэлектрика многомасштабных гетерогенных геологических сред: модели, программы, технические средства».

ЛИТЕРАТУРА

- Балин В.П., Мохова Н.А., Синцов И.А., Остапчук Д.А.** Определение коэффициента вытеснения нефти с использованием изучения структуры порового пространства методом капилляриметрии // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2017. – № 1–2. – С. 40–50.
- Ельцов И.Н., Власов А.А., Соболев А.Ю., Фаге А.Н., Байкова М.А.** Обработка, визуализация и интерпретация геофизических исследований в скважинах в системе EMF Pro: Учебное пособие. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2016. – 94 с.
- Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Эпов М.И.** Обобщение формулы Арчи и типы радиального распределения удельного электрического сопротивления в прискважинной зоне // Геофизический вестник. – 2004. – № 7. – С. 9–14.
- Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И.** Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – № 55 (5–6). – С. 978–990.
- Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И.** Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – № 44 (6). – С. 148–157.
- Москалев Г.В., Соболев А.Ю.** Оценка параметров собственного шума зондов аппаратуры СКЛ-160 в условиях нефтегазовых скважин Западной Сибири // Интерэкспо ГеоСибирь. – 2018. – № 3. – С. 274–280.
- Назарова Л.А., Назаров Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н.** Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5. – С. 37–49.
- Нестерова Г.В., Кашеваров А.А., Ельцов И.Н.** Эволюция зоны проникновения по данным повторного каротажа и гидродинамического моделирования // Каротажник. – 2008. – № 1 (166). – С. 52–68.
- Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю.** База многофизичных моделей пластов АТЛАС МФМ // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – № 2 (3). – С. 63–71.
- Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Соболев А.Ю., Суролина И.В., Черняк Н.М.** ATLAS_MPhMR: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621410, заявка № 2021621283 от 22.06.2021, зарегистрировано 29.06.2021.
- Нечаева А.Г., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н.** Характеристика геоэлектрических моделей высокоомных среднеюрских коллекторов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – № 2 (1). – С. 246–250.
- Суролина И.В., Нестерова Г.В.** Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015: Сборник статей EAGE. – 2015. – С. 85–94.
- Суролина И.В., Нестерова Г.В.** Быстрые алгоритмы трехмерного численного моделирования показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ, учитывающие неравнокомпонентное поле напряжений в окрестности скважины // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – № 2 (3). – С. 55–62.
- Тюкавкина О.В.** Литолого-петрографические характеристики сложнопостроенных коллекторов в зонах остаточных запасов // Геология, география и глобальная энергия. – 2013. – № 1 (48). – С. 23–32.
- de Lima O.A.L.** Water saturation and permeability from resistivity, dielectric, and porosity logs // Geophysics. – 1995. – Vol. 60 (6). – P. 1756–1764, doi: 10.1190/1.1443909.

REFERENCES

- Balin V.P., Mokhova N.A., Sintsov I.A., Ostapchuk D.A.** Determination of oil displacement coefficient using exploration of the pore space structure with the help of capillary studies // Oil and Gas Territory. – 2017. – Vol. 1–2. – P. 40–50.
- de Lima O.A.L.** Water saturation and permeability from resistivity, dielectric, and porosity logs // Geophysics. – 1995. – Vol. 60 (6). – P. 1756–1764, doi: 10.1190/1.1443909.
- Kashevarov A.A., Yeltsov I.N., Epov M.I.** Hydrodynamic model for the evolution of an invaded zone in borehole drilling // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2003. – Vol. 44 (6). – P. 872–879.
- Moskalev G.V., Sobolev A.Yu.** Noise level parameters estimation of the SKL-160 probes under the oil and gas wells conditions of Western Siberia // Interekspo Geo-Sibir'. – 2018. – Vol. 3. – P. 274–280.
- Nazarova L.A., Nazarov L.A., Epov M.I., El'tsov I.N.** Evolution of geomechanical and electro-hydrodynamic fields in deep well drilling in rocks // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49 (5). – P. 704–714, doi: 10.1134/S1062739149050031.
- Nechaeva A.G., Nesterova G.V., Yeltsov I.N.** Characteristics of the geoelectrical models of high-resistance Middle Jurassic reservoirs // Interekspo Geo-Sibir'. – 2016. – Vol. 2 (1). – P. 246–250.
- Nesterova G.V., Kashevarov A.A., El'tsov I.N.** Invaded zone evolution studied on the basis of relogging and hydrodynamical modeling data // Karotazhnik. – 2008. – Vol. 1 (166). – P. 52–68.
- Nesterova G.V., Yeltsov I.N., Sobolev A.Yu., Surodina I.V.** Multiphysical reservoir model collection ATLAS MPhM // Interekspo Geo-Sibir'. – 2019. – Vol. 2 (3). – P. 63–71.
- Nesterova G.V., Yeltsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Sobolev A.Yu., Surodina I.V., Chernyak N.M.** ATLAS MPhMR. Certificate of state registration of database № 2021621410, publ. 29.06.2021. – Bulletin No. 7. – 2021.
- Surodina I.V., Nesterova G.V.** VIKIZ and BKZ log simulation using Graphics Processing Units // Petrophysics of Complicated Reservoirs: Problems and Perspectives 2015. – EAGE, 2015. – P. 85–94.
- Surodina I.V., Nesterova G.V.** Fast 3D algorithms of VIKIZ and BKZ log numerical simulation taking into account the unequal component natural stress field in the borehole environment // Interekspo Geo-Sibir'. – 2019. – Vol. 2 (3). – P. 55–62.
- Tyukavkina O.V.** Complex lithological and petrographic characteristics of residual hydrocarbon stocks in different collector zones // Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya. – 2013. – Vol. 1 (48). – P. 23–32.
- Yeltsov I.N., Kashevarov A.A., Epov M.I.** Generalization of Archie's formula and types of radial resistivity profiles in the borehole environment // Geofizicheskii Vestnik. – 2004. – Vol. 7. – P. 9–14.
- Yeltsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.Yu., Epov M.I.** Geomechanics and fluid flow effects on electric well logs: Multiphysics modeling // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55 (5–6). – P. 775–783, doi: 10.1016/j.rgg.2014.05.020.
- Yeltsov I.N., Vlasov A.A., Sobolev A.Yu., Fage A.N., Baikova M.A.** Processing, visualization and interpretation of geophysical wells investigations in EMF Pro system [in Russian]. – INGG SO RAN, Novosibirsk, 2016. – 94 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СОБОЛЕВ Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: программное и методическое обеспечение количественной интерпретации комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

МОСКАЛЕВ *Георгий Владимирович* – магистрант кафедры геофизических систем физико-технического факультета НГТУ. Основные научные интересы: исследование поведения сигналов электрокаротажа в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.