МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ» (ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Х Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

T. 2

Сборник материалов

Новосибирск СГГА 2014 Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск *М. И. Эпов*

Доктор геолого-минералогических наук, академик, председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово *А. Э. Конторович*

Академик РАН, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск *М. В. Курленя*

Кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск *А. С. Ефимов*

Руководитель Регионального агентства по недропользованию по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск *А. И. Неволько*

Профессор, проректор по научной и инновационной деятельности СГГА, Новосибирск *В. А. Середович*

Кандидат геолого-минералогических наук, учёный секретарь ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск *С. П. Зайцев*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Х Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. Т. 2. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 197 с.

ISBN 978-5-87693-711-7 (т. 2) ISBN 978-5-87693-698-1 ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-711-7 (т. 2) ISBN 978-5-87693-698-1 ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

Сборник включен в систему РИНЦ.

МАКЕТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ МАЛОГЛУБИННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И РАДИАЛЬНО-ЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Евгений Вячеславович Балков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-55, e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru

Александр Константинович Манштейн

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-52, e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

В работе освещается разработка новой компактной аппаратуры электромагнитного профилирования и радиально-частотного зондирования. Она основана на новом способе компенсации первичного поля и имеет определенные преимущества. Компенсация прямого поля генератора выполняется специальным расположением измерительной катушки, используются два зондирующих параметра – разнос и частота, за счет разнесения генераторной и приемных катушек по высоте упрощается форма отклика от локальных аномалий по электропроводности. Были произведены макетирование новой аппаратуры и экспериментальные измерения, которые подтверждают теоретические предпосылки и дают основания для оптимального выбора разносов и частот при прототипировании серийного устройства для электромагнитного профилирования.

Ключевые слова: электромагнитное профилирование, радиально-частотное зондирование

PROTOTYPE OF THE EQUIPMENT FOR SHALLOW DEPTH ELECTROMAGNETIC PROFILING AND RADIAL-FREQUENCY SOUNDING

Evgeny V. Balkov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyuga 3, Ph. D., Chief Scientist, tel. (383)330-49-55, e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru

Alexander K. Manstein

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyuga 3, Ph. D., Principal Scientist, tel. (383)330-49-52, e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

Over the past several decades a number of single and multiple frequency electromagnetic sensors have been successfully developed and widely applied. All the existing equipment have the number of disadvantages. In the Institute of Petroleum Geology and Geophysics the new device for electromagnetic profiling is under development. It is based on a new approach of primary field cancellation and has some advantages. In this study a prototyping of new device and its field testing were performed. The presented results make possible the optimal choice of the Tx-Rx interspacing and the frequencies to be used in the new electromagnetic equipment.

Key words: electromagnetic profiling, radial-frequency soundings.

Введение

Электромагнитные индукционные методы весьма популярны при малоглубинных геофизических изысканиях. Они активно используются в экологических, инженерных, археологических и агрокультурных исследованиях. В последние десятилетия был разработан и успешно применяется ряд одночастотных и многочастотных электромагнитных приборов. Наиболее широкое применение аппаратура находит в задачах электромагнитного профилирования на одной или нескольких частотах. При всем разнообразии исполнения аппаратура обладает рядом недостатков. Если не выполняется компенсация первичного поля (электромагнитное поле генератора в воздухе), то уменьшается информативность сигнала, так как уровень полезного сигнала относительно первичного поля сравним с уровнем шума [Балков и Манштейн, 2006]. Схемы с компенсацией первичного поля двумя измерительными катушками работают лучше, но их настройка и калибровка требуют применения сложных электротехнических схем и конструкционных решений. Кроме того, в случае двух- или трехкатушечных устройств, один подземный объект (аномалия в электропроводности), расположенный вблизи поверхности, может обеспечивать на регистрирующем устройстве два или три образа, что затрудняет интерпретацию [Балков и др., 2013].

В Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН ведется разработка новой компактной аппаратуры электромагнитного профилирования и частотного зондирования, которая будет лишена описанных недостатков.

Схема и особенности аппаратуры

В ИНГГ СО РАН были запатентованы способ и устройство для индукционного частотного зондирования [Манштейн и Балков, 2013]. Где был предложен новый способ компенсации прямого поля генераторной катушки, заключающийся в расположении приемной катушки на линии, вдоль которой вертикальная компонента напряженности магнитного поля равна нулю (рис. 1).



Рис. 1. Аппаратура радиально-частотного зондирования и электромагнитного профилирования: запатентованная схема расположения генераторной и приемных катушек (слева), макет аппаратуры (справа)

Представленная схема позволяет компенсировать прямое поле одной измерительной катушкой и обуславливает существенное преобладание одного экстремума в кривой сигнала при профилировании над аномальным по удельному электрическому сопротивлению объектом. Последнее было теоретически подтверждено, например, в работе [Балков, 2011].

Для подтверждения описанных выше теоретических предположений было выполнено макетирование аппаратуры и проведён ряд экспериментальных работ.

Макет аппаратуры был выполнен в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, состоял из пяти приемных катушек с разносом от 0.5 м (1й зонд) до 2.5 м (5й зонд) и позволял выполнять измерения мнимой (синфазной) и реальной (квадратурной) компонент э.д.с. на 14-ти частотах (от 2.5 до 250 кГц).

Экспериментальные работы

На территории обсерватории «Ключи» (ИНГГ СО РАН), расположенной вблизи Новосибирского Академгородка, находится электрометрический полигон, предназначенный для испытаний существующих и новых разработок в области малоглубинной геофизической аппаратуры [Балков и др., 2013]. На полигоне созданы 10 квадратных площадок по 100 м2 каждая, на которых заложено 33 объекта (металлические листы, бочки, фляги; металлические и пластиковые трубы, канистры; имитации мин, бомб, снарядов и т.п.).

В ходе испытаний были проведены измерения вдоль нескольких опорных профилей.

Полученные экспериментальные результаты были представлены в виде графиков мнимой компоненты сигнала, реальной компоненты сигнала и модуля сигнала. На каждом из графиков изображен сигнал для одной из четырнадцати частот для одной из пяти приемных катушек. Ниже продемонстрированы некоторые из них (рис. 2).

Каждая из компонент по-своему интересна. Например, аномалии на четвёртом профиле над первыми двумя объектами (авиационная бомба, на глубине 2 м, большой железный лист, на глубине 1 м) присутствует только у мнимой компоненты сигнала. Эти аномалии небольшие, сравнительно с аномалиями над другими объектами, и немного сдвинуты, относительно расположения объектов. Но в любом случае, на графиках реальной компоненты сигнала и модуля сигнала данные аномалии абсолютно не прослеживаются.

Реальная компонента сигнала имеет особенность в том, что на первом профиле аномалия от второго объекта (фляга, на глубине 2 м) присутствует только на этом типе сигнала при том, что аномалия образована точно над объектом и довольно выражена. К этому добавляется еще тот факт, что только на реальной компоненте сигнала появляется небольшая аномалия (в виде увеличения сигнала) над четвертым объектом (бочка, на глубине 2.5 м) на первом профиле.

Выше были описаны свойства аномалий на некоторых профилях. Теперь рассмотрим остальные аномалии над объектами. Аномалии над первым и третьим объектом (фляга 0.5 м, бочка 0.9 м) на первом профиле проявляются одинаково хорошо на обеих компонентах и модуле сигнала.



Рис. 2. Различные компоненты сигнала макета аппаратуры электромагнитного профилирования

На втором профиле аномалия над первым объектом (бочка 1.3 м) четко выражена на всех типах сигнала. А аномалия над вторым объектом четко выделяется только на мнимой компоненте сигнала и модуле сигнала. На реальной компоненте сигнала данная аномалия смазывается и не имеет четкого пика. Аномалии над последними тремя объектами (железный круглый лист 0.5 м, медный круглый лист 0.5 м, алюминиевый лист 0.5) на четвертом профиле явно выражены и не сдвинуты от реального расположения объектов на всех компонентах сигнала и на модуле сигнала.

На пятом профиле на всех типах сигнала отчетливо выделяется только одна аномалия над первым объектом (горизонтальный железный лист 2 м). Аномалии над вторым и третьим объектом (мины 1.5 м, железные трубы 1.1 м) не очень сильные, на реальной компоненте аномалия от третьего снаряда абсолютно не прослеживается. Аномалии над четвертым и пятым объектом (пластиковые бутылки 0.8 м, пластиковая бутылка 0.5 м) выделяются только на мнимой компоненте сигнала и модуле сигнала. На реальной компоненте сигнала аномалии над четвертым объектом не выделяется вовсе, над пятым объектом аномалия немного сдвинута к концу профиля.

Всего в ходе работы было проанализировано 840 диаграмм, на которых для каждого из объектов (16 шт), для конкретной катушки (5шт), для конкрет-

ной компоненты (3 шт) и на каждой частоте (14 шт) были оценены величины аномального сигнала (всего 3360 значений).

Выводы

Полученные результаты в основном касались изучения характера сигнала над локальными неоднородностями в плане, а не по глубине. Поэтому они могут быть использованы для разработки аппаратуры электромагнитного профилирования.

По результатам кропотливого анализа данных были выделены наиболее оптимальные параметры для создания опытного образца новой компактной аппаратуры электромагнитного профилирования. В этом устройстве будет использоваться одна приемная катушка (первый зонд, с1, разнос 0.5 м). Такая конфигурация была выбрана по нескольким причинам. Первая заключается в том, что этот зонд имеет хорошо выраженные аномалии над большинством объектов. Вторая причина - эргономичность такой аппаратуры, поскольку приёмная катушка отнесена от генератора всего лишь на 0.5 м, следовательно, эффективность новой аппаратуры, направленной на профилирование, по соотношению информативность к размеру, весу, стоимости и пр., будет максимальна.

Рекомендуется обеспечить излучение электромагнитного поля на двух частотах, Первая частота будет выбрана из диапазона 10-15 кГц, вторая из диапазона 100-250 кГц. При использовании двух этих диапазонов частот было выделено большинство объектов и получены высокие значения сигнала в единицах АЦП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума СО РАН (Интеграционный проект 2012-2014 гг. № 118) и Гранта президента Российской Федерации (грант МК-7132.2013.5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е. В., Манштейн А. К. Сравнение характеристик двухкатушечной и трехкатушечной реализации индукционных зондов для малоглубинного частотного зондирования // Геофизический вестник. № 1., 2006, С. 12–17.

2. Балков Е. В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками // Всероссийская школа по электромагнитным зондированиям земли. 2011. СПб. 4 с.

3. Балков Е.В., Стойкин Т.А., Манштейн А.К., Карин Ю. Г. Результаты применения наземного малоглубинного частотного зондирования на электроразведочном полигоне ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) // Геофизические исследования, Т.14, № 3, 2013, С.55-63.

4. Манштейн А.К., Балков Е.В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования. Патент на изобретение № 2502092. Приоритет 01.08.2011.

© Е. В. Балков, А. К. Манштейн, 2014

РАЗРАБОТКА НАБОРА ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ТЕСНLOG

Светлана Сергеевна Баранова

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер лаб. 564 электромагнитных полей, тел. 8-913-382-42-19, e-mail: clairdusoleil7@gmail.com

Константин Сергеевич Сердюк

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаб. 564 электромагнитных полей, тел. (913)393-71-63, e-mail: kserdyuk@gmail.com

Андрей Юрьевич Соболев

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail:SobolevAY@ipgg.sbras.ru

В статье представлено описание разработанного набора инструментов для обработки данных бокового каротажного зондирования в составе программного комплекса Techlog компании Schlumberger.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, интерпретация данных, программный комплекс Techlog.

DEVELOPMENT OF TOOLS FOR RUSSIAN LATERAL LOGGING DATA INTERPRETATION WITHIN TECHLOG WELLBORE SOFTWARE PLATFORM

Svetlana S. Baranova

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, engineer, Laboratory of electromagnetic fields, tel. 8-913-382-42-19, e-mail: clairdusoleil7@gmail.com

Konstantin S. Serdyuk

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyuga, junior research scientist, Laboratory of electromagnetic fields, tel. (913)393-71-63, e-mail: kserdyuk@gmail.com

Andrey Y. Sobolev

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Senior Research Fellow, Candidate of Technical Sciences, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

Description of developing tools for interpretation of the Russian lateral loggingdata within Techlog wellbore software platform of Schlumberger Company is presented.

Key words: Russian lateral logging, data interpretation, Techlog wellbore software platform.

Обработка данных бокового каротажного зондирования

Боковое каротажное зондирование (БКЗ)–один из широко применяемых в России методов электрического каротажа, основанный на измерении кажущихся удельных электрических сопротивлений гальваническими зондами различной длины.

Традиционный подход к попластовой обработке каротажных данных заключается в итеративном подборе параметров модели пласта, решении прямой задачи и сравнении полученных теоретических данных с экспериментальными. Но в случае БКЗ такой подход работает плохо. Это связано с тем, что обработка

данных БКЗ является как минимум двумерной задачей из-за сильного влияния вмещающих пород, а при решении 2D обратной задачи БКЗ необходимо учитывать и подбирать большое количество параметров среды, что приводит к высоким затратам по времени

Основной подход, применяемый при решении обратной задачи БКЗ, заключается в сведение двумерной задачи к решению ряда одномерных (рис. 1). Этот подход состоит из двух этапов:

I. Предварительная обработка данных БКЗ: на этом этапе рассматривается упрощенная двумерная модель пластов без зон проникновения бурового раствора, вскрываемых скважиной. Цель этого этапа – внести в показания прибора поправки за сопротивление вмещающих пород, тем самым сведя задачу к одномерной, и получить кажущееся сопротивление пласта (одномерная модель без вмещающих пород).

II. Решение одномерной обратной задачи БКЗ, учитывая все зоны проникновения бурового раствора и используя полученное на предыдущем этапе кажущееся сопротивление пласта. Для решения этой задачи применяется традиционный подход и вычисляется истинное сопротивление пласта.

Применяя описанный подход можно добиться значительного уменьшения времени обработки данных БКЗ при сохранении достоверности результатов. Этот подход и используется в данной работе.



Рис. 1. Схема основного подхода обработки данных БКЗ

Программный модуль обработки данных БКЗ

На основе описанного подхода обработки данных БКЗ разработан программный модуль в виде подключаемой библиотеки.

В модуль входят классический и поправочныйалгоритмы снятия средних значений [1]. Они служат для предварительной обработки данных. Классиче-

ский алгоритм заключается в подсчете средних значений на отрезке $H_{\text{под}}$ ÷ $H_{\text{под}} - h + L$, где $H_{\text{под}}$ – глубина, соответствующая подошве пласта, h – мощность пласта, L – длина зонда. Этот алгоритм работает на пластах, удовлетворяющих условиюh > 1.25L. Поправочный алгоритм основан на уточнении значения снятых классическим алгоритмом отсчетов за счет внесения поправок за влияние сопротивления вмещающих и параметров скважины [2]. Алгоритм использует аппроксимацию данных из заранее созданной многомерной таблицы, которая состоит из снятых отсчетов, рассчитанных в зависимости от сопротивлений пласта и вмещающих пород, мощности пласта и диаметра скважины. Расчет таблицы проводился на основе решения двумерной прямой задачи. Используя поправочный алгоритм, можно свести двумерную задачу БКЗ к одномерной и выполнить первый этап основного подхода обработки данных БКЗ.

Далее для проведения второго этапа выбранного подхода используется быстрая одномерная обратная задача БКЗ, основанная на программных палетках, созданных в соответствии с подходом [3]. В итоге вычисляется истинное сопротивление пласта.

Также в модуль входят алгоритмы уточнения бурового раствора и оценки качества каротажа, основанные на одномерной двуслойной обратной задаче БКЗ [4]. Они позволяют подобрать значение сопротивления бурового раствора и оценить достоверность каротажных данных.

Таким образом, программный модуль позволяет проводить полную обработку данных БКЗ.

Интеграция программного модуля в программный комплекс Techlog

Для автоматической интерпретации данных существует ряд специальных программ. Одной из них является программный комплекс для петрофизической интерпретации Techlogkomnahuu Schlumberger[5]. Одним из важных преимуществ комплекса является его расширяемость, благодаря чему в Techlog интегрирован программный модуль для обработки данных БКЗ[6] в составе библиотеки Emfcore [7], разработанной в ИНГГ СО РАН.

В библиотеке Emfcoreимеется алгоритм решения одномерной обратной задачи, в котором подбор параметров единой модели выполняется сразу по двум методам ВИКИЗ и БКЗ. Совместная инверсия данных по нескольким методам дает возможность построить более точную геоэлектрическую модель, значительно уменьшив при этом область эквивалентности, что приводит к более достоверной оценке фильтрационно-емкостных свойств пласта.

Посколькуэто обратная задача оперирует одномерными моделями, то требование к качеству снятых отсчётов ужесточается. Предложенные алгоритмы позволяют подавать более достоверные входные данные в совместную обратную задачу. Для исполнения реализованных алгоритмов при проведении массовых расчетов созданы элементыпользовательского интерфейса (рис. 2).



Рис. 2. Меню обработки данных БКЗ в программном комплексе Techlog

Заключение

Разработанный программный модуль позволяет быстро проводить интерпретацию данных БКЗ, что является важной характеристикой для системы, используемой в промышленных условиях. Благодаря интеграции в комплекс Techlog использование алгоритмов стало доступным и удобным. Таким образом, программный модуль прибрел качественный интерфейс и сейчас находится на этапе тестирования представителями компании Schlumberger.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранова С.С., Соболев А.Ю. Предварительная обработка данных бокового каротажного зондирования на основе решения прямых задач // "ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-

2012". VIIIМеждунар. Науч. Конф. «Недроподбзование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых», Т.2 – Новосибирск, 2012 – С. 85-89.

2. Баранова С.С., Учет влияния скважины при обработке данных бокового каротажного зондирования в двумерной среде / С. С. Баранова, А. Ю. Соболев IXМеждунар. Науч. Конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых», Т.3 – Новосибирск, 2013 – С. 221-225.

3. Сердюк, К.С. Построение быстрых аппроксимационных модулей решения задач высокочастотного электромагнитного каротажа / Сердюк К.С., И.А. Агбаш, А.Ю. Соболев // ГЕО-Сибирь-2013. Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений ископаемых: сборник материалов IX Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2013», Новосибирск – 2013, стр. 96-101.

4. Баранова С.С., Быстрая прямая и обратная задачи бокового каротажного зондирования для двумерной среды / С. С. Баранова, А. Ю. Соболев// «Наука о Земле. Современное состояние»: Материалы I Всероссийской молодежной научно-практической конференции/ Новосиб. гос. ун-т. НовосибирскЭ, НГУ, 2013 – С. 208-210

5. Геология, геофизика и петрофизика, Techlog: сайт компании Schlumberger – 2009 [Электронный ресурс]. URL: http://sis.slb.ru/sis/techlog/ (Дата обращения: 11.03.2013)

6. Баранова С. С., Интеграция программного модуля обработки данных бокового каротажного зондирования в программный комплекс Techlog / С. С. Баранова // принята к публикации в сборнике тезисов 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»

7. Сердюк, К.С. Программная библиотека Emfcore количественной интерпретации данных электрометрических измерений в скважинах / Сердюк К.С., Урамаев М.Ш., Михайлов И.В. // ГЕО-Сибирь-2013. Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений ископаемых: сборник материалов IX Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2013», Новосибирск – 2013, стр. 83-89.

© С. С. Баранова, К. С. Сердюк, А. Ю. Соболев, 2014

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Вячеслав Николаевич Глинских

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией скважинной геофизики, тел. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Галина Владимировна Нестерова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Работа посвящена использованию компьютерных моделей электропроводности глинистых песчаников в схеме интерпретации данных электромагнитного каротажа нефтегазовых скважин. Показаны возможности определения петрофизических параметров породы по данным электромагнитного каротажа. Получены количественные оценки флюидонасыщения и пористости заглинизированных коллекторов на основе численной двумерной инверсии как синтетических, так и практических диаграмм.

Ключевые слова: моделирование, инверсия, электромагнитный каротаж, модель электропроводности, глинистость.

PETROPHYSICAL MODELS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SHALY SANDS FOR ELECTROMAGMANETIC LOG INTERPRETATION

Vyacheslav N. Glinskikh

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Ph.D., chief of Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Ph.D., senior scientist of Laboratory of electromagnetic fields, tel. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Computer models of shaly sand conductivity used during electromagnetic logging interpretation are described. Possibility of rock parameters determination from sounding data was shown. Estimation of porosity and saturation of clayed reservoir on the base of 2D inversion both of synthetic and real logs were received.

Key words: simulation, inversion, electromagnetic logging, conductivity model, clay content.

При петрофизической интерпретации данных электрокаротажа на основе единой геоэлектрической и гидродинамической модели [5-8; 10; 15] в качестве

петрофизического соотношения, связывающего гидрофизические параметры (водонасыщенность, солёность) и удельную электропроводность (УЭП) чаще всего используется тот или иной вид уравнения Арчи [2, 9]. Это уравнение ограничивается случаем только «чистых» песчаников и не учитывает ряд факторов, в том числе глинистость, которая может значительно повышать общую электропроводность породы [4].

Для корректной оценки насыщения необходим учет объемной доли и состава глинистого материала, а также пространственного распределения глинистых частиц в породе. К настоящему времени построены модифицированные уравнения, которые могут использоваться для изучения различных типов горных пород. В данной работе в качестве петрофизического соотношения используются уравнения, описывающие представленные в литературе модели трехкомпонентных сред, включающих непроводящий кремневый песок, флюид и глинистые частицы [11-14].

Рассмотрим модель песчано-глинистого коллектора, вскрытого скважиной на глинистом буровом растворе и состоящего из трех пластов. В результате проникновения фильтрата бурового раствора в пласты и оттеснения пластовой воды и нефти в каждом из прослоев образуется зона проникновения, радиус которой в данной модели считается одинаковым для всех трёх пластов, водонасыщение в зоне равно 0.9 д.е. Неизменённые части пластов имеют водонасыщение 0.25, 0.5 и 0.75 д.е. Коэффициенты глинистости и пористости на интервале коллектора постоянны и составляют 0.1 и 0.15 д.е. Остальные параметры модели либо априорно заданы, либо их можно оценить с достаточной точностью по данным других методов ГИС.

Для данной модели пласта проведено численное моделирование диаграмм электромагнитного каротажа (ВИКИЗ) с использованием модели электропроводности рассеянной глины [11]. Моделирование основано на приближенном подходе, описанном в [1]. Получены оценки влияния количества глинистого материала на сигналы разности фаз и отношения амплитуд. На рис. 1а показаны вертикальные распределения эффективной УЭП в зонах проникновения (ЗП) и неизмененных частях пластов (П) с глинистостью 0.05 (штриховые линии), 0.1 (сплошные линии) и 0.2 д.е. (штрих-пунктирные линии). Увеличение глинистости приводит к увеличению УЭП коллектора в целом. Здесь же показаны диаграммы разностей фаз (рис. 1б) и отношений амплитуд (рис. 1в) короткого (0.5 м) и длинного (2.0 м) зондов ВИКИЗ. В целом, диаграммы отражают типичную геоэлектрическую ситуацию пространственно неоднородного коллектора. Увеличение глинистости приводит к увеличению значений разности фаз и уменьшению отношений амплитуд. Проведённое численное моделирование и сравнительный анализ диаграмм показывают, что как модели электропроводности, описывающие различный генезис глинистого вещества, так и его количество оказывают существенное влияние на измеряемые сигналы.

Для выявления возможностей количественной оценки петрофизических параметров песчано-глинистых коллекторов проведена двумерная инверсия диаграмм с использованием модели электропроводности рассеянной глины. По практическим данным электромагнитного каротажа сделаны оценки водонасыщения верхнеюрских заглинизированных коллекторов. В качестве дополнительной информации привлекались результаты комплексной интерпретации данных потенциала самополяризации (ПС), гамма-каротажа (ГК) и нейтронного каротажа (НК), по которым определены глинистость и пористость с использованием принятых зависимостей, установленных по керну.



Рис. 1. Вертикальные распределения эффективной УЭП для модели электропроводности, описывающей рассеянную глину, при различной глинистости (а), синтетические диаграммы разностей фаз (б) и отношений амплитуд (в) короткого и длинного зондов ВИКИЗ.

На рис. 2 представлены результаты численной инверсии данных ВИКИЗ на интервале заглинизированного коллектора. Коллектор перекрыт глинистыми отложениями и подстилается плотным карбонатным прослоем. По данным ПС, ГК и НК рассматриваемый коллектор характеризуется уменьшением пористости от 0.18 до 0.14 д.е. и увеличением глинистости от 0.051 до 0.164 д.е. с глубиной. С учётом данных о глинистости (1) на интервале коллектора получены количественные оценки водонасыщения в неизмененных частях пластов (3) и окаймляющих зонах (4), а также уточнено распределение пористости (2) по глубине (рис. 2а, сплошные линии). Также проведено восстановление водонасыщения с использованием минимального значения глинистости (штриховые линии). Как видно, без учёта глинистости оценка водонасыщения на интервале коллектора значительно завышена (до 15%). Вертикальные распределения эффективной УЭП в прискважинных зонах и неизмененных частях пластов показаны на рис. 2 б. Сравнительный анализ практических (сплошные линии) и синтетических (штриховые линии) диаграмм ВИКИЗ указывает на их хорошее соответствие и удовлетворительный подбор модельных параметров (рис. 2 в). Расхождение диаграмм в среднем не превышает 3-4% для всех зондов. Отметим, что полученные результаты в этом и в предыдущих примерах удовлетворительно согласуются с результатами оперативной интерпретации. Данный пример в целом иллюстрируют возможности использования моделей электропроводности глинистых песчаников при интерпретации данных электромагнитного каротажа.



Рис. 2. Вертикальные распределения петрофизических параметров (а), эффективной УЭП в зонах проникновения, окаймляющих зонах и неизмененных частях пластов (б), практические и синтетические диаграммы ВИКИЗ (в) на интервале заглинизированного коллектора

Наряду с вышеописанными моделями электропроводности, проведен анализ моделей, учитывающих описание поверхностной проводимости. Известно, что разные глинистые породы существенно отличаются по удельной поверхности [4]. Создана программа расчёта поверхностной проводимости по формуле, учитывающей строение диффузного двойного слоя [3].

В заключение укажем следующее. Разработанные компьютерные модели электропроводности глинистых песчаников включены в систему количественной интерпретации данных электромагнитного каротажа. Проведено численное моделирование и анализ относительных амплитудно-фазовых характеристик в моделях терригенных заглинизированных пластов-коллекторов. Возможность использования моделей электропроводности глинистых песчаников при интерпретации данных электромагнитного каротажа проиллюстрирована на практических примерах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Линеаризованные решения двумерных прямой и обратной задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – №12. – С. 1942-1951.

2. Дахнов В.Н. Интерпретация каротажных диаграмм. М-Л, 1941. – 496 с.

3. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов. М.: «Мир» . – 1967. – 252 с.

4. Дорогиницкая Л.М. Количественная оценка добывных характеристик коллекторов нефти и газа по петрофизическим данным и материалам ГИС. – Томск: Изд-во STT. – 2007. – 278 с.

5. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Петрофизическая интерпретация повторных электромагнитных зондирований в скважинах // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 852-861.

6. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. – 2012. – Т. 445. – № 6. – С. 671-674.

7. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1031-1042.

8. Alpak F.O., Torres-Verdín C., Habashy T.M. Petrophysical inversion of borehole arrayinduction logs: Part I — Numerical examples // Geophysics. – 2006. – V. 71. – No. 4. – P. F101-F119.

9. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Tran. AIME. – 1942. – V. – 146. – P. 54-62.

10. Epov M.I., Yeltsov I.N. Integrated Resistivity and Invasion Model of Invaded Zone // Petrophysics. - 2004. - V. - 45. - No 2. - P. 198.

11. Lima de O.A.L., Sharma M.M. A grain conductivity approach to shaly sandstones // Geophysics. – 1990. – V. 55. – No 10. – P. – 1347-1356.

12. Lima de O.A.L., Sharma M.M. A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands // Geophysics. – 1992. – V. 57. – No 3. – P. 431-440.

13. Lima de O.A.L. Water saturation and permeability from resistivity, dielectric and porosity log // Geophysics. – 1995. – V. 60. – P. 1756-1764.

14. Lima de O.A.L., Niwas S. Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements // J. of Hydrology. – 2000. – V. 235. – P. 12-26.

15. Torres-Verdín C., Alpak F.O., Habashy T.M. Petrophysical inversion of borehole arrayinduction logs: Part II – Field data examples // Geophysics, 2006. – V. 71. – No.5. – P. G261-G268.

© В. Н. Глинских, Г. В. Нестерова, 2014

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЯ И ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Зинаида Никитична Гнибиденко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник, тел. (8)330-49-66, e-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Александра Викторовна Левичева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, аспирант, тел. (8)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты комплексного палеомагнитного и палеонтологического изучения верхнемеловых отложений Бакчарского железорудного месторождения осадочного происхождения (юго-восток Западной Сибири, Колпашевский фациальный район), вскрытых двумя скважинами С-114 и С-124. На основании полученных данных разработан магнитостратиграфический разрез верхнемеловых отложений юго-востока Западной Сибири, который охватывает три региональных горизонта и одноименные свиты верхнего мела и палеогена, совершенно не изученных в палеомагнитном отношении в юго-восточной части Западной Сибири. Обратно намагниченная славгородская свита с прямой полярностью в верхней части, датируемая кампаном, сопоставляется с хроном СЗЗг (верхняя часть) и СЗЗ(n) (нижняя часть) шкалы Градстейна [Gradstein et al., 2008]. Ганькинская свита, характеризуемая прямой полярностью и датируемая маастрихтом, коррелируется с хроном СЗО.

Ключевые слова: магнитостратиграфия, палеомагнетизм, магнитозона, верхнемеловые отложения, Бакчарское месторождение, юго-восток Западной Сибири.

MAGNETOSTRATIGRAPHY AND PALEOMAGNETISM OF UPPER CRETACEOUS SEDIMENTS OF SOUTH-EAST OF WEST SIBERIA

Zinaida N. Gnibidenko

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptyug 3, leading research scientist, tel. (8)330-49-66, e-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Alexandra V. Levicheva

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptyug 3, postgraduate, tel. (8)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Presents the results of complex paleomagnetic and paleontological study of Upper Cretaceous deposits of Bakchar iron ore deposits of sedimentary origin (south-east of Western Siberia, Kolpashevo facial region), stripped by two wells C-114 and C-124. Based on obtained data Upper Cretaceous magnetostratigraphic section of the south-east of Western Siberia is developed. This magnetostratigraphic section covers the three regional horizons and the same-named suites Upper Cretaceous and Paleogene, absolutely not studied paleomagnetically in the south-east of Western Siberia. Reversal polarity Slavgorod suite with normal magnetized horizon at the top, dated Campanian compared with chron C33r (upper part) and 33(n) the lower part of the Gradstein's scale [Gradstein et al., 2008]. Gan'kino suite, characterized by normal polarity and dated by Maastrichtian, is correlated with chron C30.

Key words: magnetostratigraphy, paleomagnetism, magnetozone; Upper Cretaceous sediments; Bakchar iron ore deposits; south-east of West Siberia.

В работе представлены результаты комплексных палеомагнитных и палеонтологических исследований верхнемеловых отложений Бакчарского железорудного месторождения осадочного происхождения (юго-восток Западной Сибири, Колпашевский фациальный район), вскрытых двумя скважинами С-114 и С-124. Целью изучения было построение магнитостратиграфического разреза верхнемеловых отложений для юго-востока Западной Сибири. Все выполненные исследования носили комплексный характер и осуществлялись на основе палеомагнитных, палеонтологических и геолого-стратиграфических данных. Расчленение разреза и обоснование возраста исследуемых отложений, представленного славгородской и ганькинской свитами, проведено на основании палеонтологических данных абсолютного датирования. Разрез представлен отложениями славгородской, ганькинской (верхний мел) и люлинворской (палеоген) свитами. В литологическом отношении это глины, алевриты, песчаники и пески.

Отбор ориентированных образцов для палеомагнитных исследований и обработка полученных результатов в целом не отличались от общепринятой и стандартной методики [Палеомагнитология, 1982; Молостовский, Храмов..., 1997]. Образцы ориентировались по направлению «верх-низ». Каждый стратиграфический уровень представлен двумя-тремя, иногда более, образцамикубиками. В процессе лабораторной обработки рассчитывались средние значения магнитных параметров на стратиграфическом уровне, а также для всей свиты в целом. Для обеспечения корректных комплексных исследований при отборе ориентированных образцов параллельно и одновременно отбирались пробы и образцы для палеонтологических исследований. Для определения магнитных минералов – носителей намагниченности был выполнен дифференциальный термомагнитный анализ и анализ кривых насыщения. Компонентный анализ векторов естественной остаточной намагниченности (EOH, J_n) проводился путем анализа диаграмм Зийдервельда [Zijderveld, 1967], графиков размагничивания и стереографических направлений намагниченности в процессе магнитной чистки. При этом использовался пакет программ Р. Энкина [Enkin, 1994]. При вычислении компонент намагниченности применялся метод наименьших квадратов Киршвинка [Kirschvink, 1980].

Верхний отдел мела. Славгородская свита (K₂sl). Свита сложена алевролитами, песчаниками и глинами, в ней установлен комплекс диноцист DK-I (Trithyrodinium suspectum, Chatangiella niiga, C. vnigrii, C. serra-tula, C. bondarenkoi, C. tripartita, Rhiptocorys veligera, Isabelidinium microarmum, I. belfastense, I. rectangulatum, Dinogymnium spp. и др.). Этот комплекс диноцист сопоставляется с кампанскими комплексами Западной Сибири. Верхний отдел мела. Ганькинская свита (K₂gn). Свита представлена глинами и алевролитами. Эту свиту характеризует комплекс диноцист и палинокомплекс. Комплекс диноцист DK-II (*Cerodinium diebelii*, Achomosphaera ramulifera, Fromea chytra, Cladopyxidium spp., Membranosphaera maastrichtica, Microdinium kustanaicum, Palaeocystodinium golzowense) позволяет датировать отложения маастрихтом. В обоих свитах установлен палинокомплекс ПК-I, соответствующий кампанмаастритскому комплексу.

В процессе исследований были определены магнитные и палеомагнитные параметры пород. Так, магнитная восприимчивость меняется в пределах 9,2 -424,9×10-5 ед. СИ, естественная остаточная намагниченность варьирует от 0,3 до 96,1 мА/м., фактор Кенигсбергера меньше 1. Основные минералы-носители намагниченности горных пород – магнетит, гематит, гидроокислы железа – определены с помощью анализа кривых нормального намагничивания Jrs(H) и кривых терморазмагничивания Jn(T) пород. Присутствие гематита с точкой Кюри в 675°С устанавливается по потере породой намагниченности в интервале температур 675-680°С, а также по пологим кривым насыщения (Hs=600 кА/м) и малым значениям намагниченности насыщения (Jrs =40-60 мА/м), а присутствие магнетита – по спаду намагниченности в интервале температур 560-580°С. Ориентационная природа намагниченности исследуемых пород установлена исходя из условий образования пород и по фактору Кенингсбергера. Были выполнены эксперименты по ступенчатому терморазмагничиванию и размагничиванию переменным магнитным полем. Тот и другой методы ступенчатого размагничивания показывают одинаковые результаты. По результатам ступенчатого терморазмагничивания естественная остаточная намагниченность (NRM) состоит из низкотемпературной и высокотемпературной компонент. Низкотемпературная компонента разрушается при температуре 300-400°C, высокотемпературная компонента (ChRM) выделяется в пределах 400-675°С. При размагничивании переменным магнитным полем выделяется две компоненты стабильная и нестабильная. Нестабильная компонента снимается переменными полями 5-20 мТл, стабильная сохраняется в полях 20-50 мТл. Палеомагнитные разрезы обеих скважин, построенные по характеристической (первичной) компоненте, характеризуются прямой и обратной полярностью.

Славгородская свита в двух исследуемых скважинах имеет преобладающую обратную полярность с небольшим горизонтом прямой намагниченности, а ганькинская свита характеризуется в основном прямой полярностью с одним горизонтом обратной намагниченности. На основании палинологических данных, полученных Н.К. Лебедевой, палеомагнитные разрезы скважин 114 и С-124, были привязаны к региональной стратиграфической шкале и получили ранг магнитостратиграфических разрезов. Согласно этим данным славгородская свита по комплексу диноцист DK-I датируется кампаном, а ганькинская свита на основании комплексов диноцист DK-II и палинокомплекса ПК имеет маастрихтский возраст. Магнитостратиграфические разрезы этих скважин были сопоставлены между собой и с магнитохронологической шкалой Градстейна [Gradstein et al., 2008] (рис. 1).



Рис. 1. Корреляция магнитостратиграфических разрезов скв. 114 и 124 с мировой тагнитохронологической шкалой (Gradstein et al., 2008)

Обратно намагниченная славгородская свита с прямой полярностью в верхней части, датируемая кампаном, сопоставляется с хроном C33r (верхняя часть) и C33(n) (нижняя часть) шкалы Градстейна. Ганькинская свита, характеризуемая прямой полярностью и датируемая маастрихтом, коррелируется с хроном C30.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (грант 13-05-00051.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палеомагнитология / А.Н. Храмов, Г.И. Гончаров, Р.А. Комиссарова и др.; Под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра. 1982. 312 с.

2. Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. Саратов: Изд-во СГУ. 1997. 179 с.

3. Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks analysis of results // Methods in paleomagnetism. Amsterdam, 1967, p. 254-718.

4. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data // Pacific Geoscience Centre, Geol. Survey Canada. Sidney, 1994, 16 p.

5. Kirschvink J.L. The least square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1980, vol. 62, p. 699-718.

6. Gradstein F.M., Ogg J.G. and Van Kranendonk M. On the Geological Time Scale 2008 // Newsletters on Stratigraphy. Vol. 43. No 1. June 2008. P. 5-13.

© 3. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева, 2014

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ И НЕВЯЗКА ПРИ ЧИСЛЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Алексей Александрович Горбатенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, аспирант лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)330-79-47, e-mail: gorbatenkoaa@ipgg.sbras.ru

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)330-49-52, e-mail: suhorukovakv@ipgg.sbras.ru

В статье исследуются невязки данных высокочастотного электромагнитного каротажа, которые используются при инверсии в горизонтальных скважинах. На примере численного моделирования показано, что при условии уменьшения погрешности измерения отношения амплитуд эта характеристика сигнала может успешно применяться для инверсии в горизонтальных скважинах.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, горизонтальные скважины.

MEASUREMENT ERROR AND MISFIT IN NUMERICAL INTERPRETATION OF ELECTROMAGNETIC WELL LOGGING SIGNALS IN HORIZONTAL WELLS

Alexey A. Gorbatenko

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptuga, 3, graduate student, laboratory of well logging geophysics, tel. (383)330-79-47, e-mail: gorbatenkoaa@ipgg.sbras.ru

Karina V. Suhorukova

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptuga, 3, senior researcher, laboratory of well logging geophysics, tel. (383)330-49-52, e-mail: suhorukovakv@ipgg.sbras.ru

The article deals with misfits of electromagnetic well logging data, which is used, while the process of inversion in horizontal wells. On the example of numerical modeling it is shown that in case of attenuation measurement error reduction it can be successfully applied for inversion in horizontal wells.

Key words: electromagnetic well logging, horizontal wells.

Направленное бурение скважин с горизонтальным завершением позволяет существенно повысить эффективность разработки нефтегазовых месторождений. В наши дни оно получило повсеместное распространение. Вместе с тем, применение в горизонтальных скважинах стандартных приборов, созданных для исследования вертикальных стволов, встречает определенные трудности в интерпретации каротажных данных. В частности, это относится к методам электромагнитного каротажа, в том числе и к высокочастотному электромагнитному каротажному зондированию (ВЭМКЗ).

К факторам, усложняющим численную интерпретацию данных ВЭМКЗ в горизонтальных скважинах, в первую очередь можно отнести усиление влияния вмещающих пород по сравнению с вертикальными стволами [1]. При зенитных углах более 80° диаграммы ВЭМКЗ становятся симметричными, а вклад в сигнал смежных со вскрытым пластом геологических пород наблюдается на большем удалении от границ пластов [2]. Мощность вскрываемых на сегодняшний день коллекторов часто бывает меньше 1–2 м, поэтому в горизонтальных интервалах скважин, вскрывающих такие пласты, сигналы длинных зондов ВЭМКЗ всегда будут подвержены влиянию вмещающих пород.

В таких условиях определение удельного электрического сопротивления (УЭС) и мощности пласта, по которому проведена скважина, является сложной задачей, которую невозможно разрешить без привлечения дополнительной информации. Вследствие этого, необходимо также максимально полно использовать записанные прибором данные.

Каждый зонд прибора ВЭМКЗ в аппаратуре СКЛ записывает две характеристики сигнала: разность фаз и отношение амплитуд э.д.с. в приемных катушках. Однако традиционно при численной интерпретации принято использовать только разность фаз, а отношение амплитуд подключать лишь при инверсии на базе цилиндрически-слоистой модели. Проведенные ранее исследования указывали на то, что малый динамический диапазон отношений амплитуд по сравнению с заявленной производителями аппаратуры погрешностью измерений не позволяет использовать эту характеристику сигнала в той же мере, что и разность фаз [3].

Это можно продемонстрировать на примере сравнения областей эквивалентности решения одной и той же обратной задачи по разности фаз и отношению амплитуд длинного зонда (2,0 м, 0,875 МГц). На рис. 1 слева изображены невязки, рассчитанные по разности фаз, а справа – по отношению амплитуд для трехмерной обратной задачи. Для вычисления невязки использовалась стандартная формула, применяемая при инверсии данных ВЭМКЗ [4]:

$$F^{nz} = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left[\frac{\Delta \varphi_i^{nz} - \overline{\Delta \varphi_i^{nz}}}{\delta \Delta \varphi_i^{nz}} \right]^2}$$

Здесь N_p – число отсчетов по глубине, $\Delta \varphi_i$ – измеренный сигнал, $\delta \Delta \varphi_i$ – погрешность его измерения, $\overline{\Delta \varphi_i}$ – сигнал, рассчитанный в слоистой однородной среде, nz – индекс зонда. Для вычислений, представленных ниже, была выбрана абсолютная погрешность измерений, равная 0,2° для разности фаз и 0,02 – для отношения амплитуд. Поскольку в исследуемой ниже модели динамический диапазон измеряемых величин небольшой, для упрощения анализа значения погрешности выбраны постоянными.

Используемая в расчетах модель представляет собой двухслойную среду с горизонтально расположенной границей, УЭС верхнего полупространства 4 Ом·м, нижнего – 15 Ом·м. Исследуемый интервал скважины находится в верхнем полупространстве и не пересекает границу, зенитный угол скважины во всех точках равен 85°. При расчете невязок считалось, что УЭС верхнего слоя известно, и задача состоит в том, чтобы определить положение границы и УЭС нижнего полупространства. Оранжевым цветом показана область, в которой значение невязки меньше 1. Таким образом, все комбинации параметров среды, попадающие в эту область, могут считаться решением обратной задачи [5]. Другими словами, оранжевым цветом отмечена область эквивалентности решения обратной задачи.

Область эквивалентности для отношения амплитуд, изображенная в правой части рис. 1, существенно превосходит по своим размерам область эквивалентности для разности фаз. Исходя из этого можно сделать вывод, что отношение амплитуд нельзя использовать для инверсии.



Рис. 1. Невязки разности фаз (слева) и отношения амплитуд (справа) при решении обратной задачи по нахождению положения границы и УЭС нижнего полупространства в двухслойной среде, когда скважина находится в верхнем полупространстве

Однако анализ скважинных записей отношений амплитуд показывает, что эта характеристика обладает довольно высоким соотношением сигнал-помеха и

с высокой степенью коррелирует с изменениями фазовой характеристики. При этом относительные изменения по скважине, адекватно отражающие изменение разреза, оказываются меньше предлагаемой производителями максимальной оценки погрешности измерения. Есть положительный опыт коррекции систематической погрешности измерения отношения амплитуд на интервалах реперных пластов. Кроме того, медленное изменение сигнала по скважине и большое количество точек измерения в однородных интервалах часто позволяет провести накопление сигнала и частично компенсировать случайную составляющую помехи, в том числе и технологического происхождения. Поэтому предположим, что относительные погрешности измерения разности фаз и отношения амплитуд одинаковые, и применим подход, при котором при численной интерпретации данных ВЭМКЗ используются трансформации разности фаз и отношения амплитуд в значение кажущегося УЭС – $\rho_k(\Delta \varphi)$ и $\rho_k(A_1/A_2)$, соответственно. Это позволит использовать амплитудную и фазовую характеристики и тем самым увеличивать информативность и достоверность результатов численной интерпретации. Такой приём – представление в виде трансформаций измеряемых характеристик сигнала – характерен для всех зарубежных производителей аналогичных приборов.

На рис. 2 представлены невязки, определенные для $\rho_k(\Delta \varphi)$ и $\rho_k(A_1/A_2)$. Для упрощения при вычислении для обеих характеристик взята одинаковая относительная погрешность, равная ±3% от кажущегося УЭС (среднее значение погрешности определения кажущегося сопротивления по разности фаз при принятой выше абсолютной погрешности). Область эквивалентности, полученная по трансформации $\rho_k(A_1/A_2)$, в таком случае существенно меньше по размерам, чем область, полученная без трансформации сигнала (рис. 1). Кроме того, области эквивалентности в правой и левой частях рис. 2 теперь близки по своим размерам. Это дает возможность проводить совместную инверсию по этим двум величинам.

Относительная погрешность 3%, принятая для трансформаций, при пересчёте в погрешности измеряемых характеристик, составит в исследуемом диапазоне изменения около 2% для разности фаз (или 0.7° при $\Delta \phi$ =19° и 0.34° при $\Delta \phi$ =8.4°) и около 0.005% – для отношения амплитуд (или 0.008 при A_1/A_2 =0.811 и 0.004 при A_1/A_2 =0.935). Для разности фаз такая погрешность близка к реальной. Для отношения амплитуд эта оценка дает погрешность гораздо меньшую, чем заявленная производителем в 0,02. Поэтому перед интерпретацией отношение амплитуд нуждается в дополнительной коррекции, например, по измерениям в реперном пласте. Другая возможность поднять точность измерения отношения амплитуд заключается в повышении глубины компенсации прямого поля в двух измерительных катушках и в соответствующем метрологическом сопровождении аппаратуры.



Рис. 2. Невязки кажущегося УЭС по разности фаз (слева) и отношения амплитуд (справа) при решении обратной задачи по нахождению положения границы и УЭС нижнего полупространства в двухслойной среде, когда скважина находится в верхнем полупространстве

Трансформация разности фаз и отношения амплитуд в кажущиеся сопротивления позволяет сравнивать эти величины, что также помогает при качественной и количественной интерпретации. Однако использование отношения амплитуд при численной интерпретации в горизонтальных скважинах возможно только при условии снижения уровня систематической погрешности измерения. Для этого необходимо усложнить метрологические испытания зондов ВЭМКЗ с целью более точного определения систематической и случайной составляющих погрешности измерения отношения амплитуд и проводить коррекцию измеренных значений на интервалах реперных пластов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Epov M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A., Arzhantsev V.S. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation// SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition, Moscow, Russia 16–18th October 2012. Online library OnePetro (http://www.onepetro.org). – SPE Conference Paper 162034-MS. 18 pp.

2. Gorbatenko A.A, Suhorukova C.V. VEMKZ Data in Deviated and Horizontal Wells: Features of Inversion and Interpretation // Tyumen 2013 - New Geotechnology for the Old Oil Provinces, 25-29 March 2013, Tyumen, Russia, Online library EarthDoc (http://earthdoc.eage.org/).

3. Ельцов И. Н., Эпов М.И. Анализ фазовых и амплитудных характеристик сигналов высокочастотных электромагнитных каротажных зондирований// Электр. и электромагн.

методы исследования в нефтегазовых скважинах. – Новосибирск: НИЦ ОИГГГМ СО РАН, 1999. – С. 41–50.

4. Никитенко М.Н. Экспресс-интерпретация данных ВИКИЗ, полученных в наклонногоризонтальных скважинах // Состояние и пути развития высокочастотного электромагнитного каротажа: Материалы научно-практической конференции. – Новосибирск: НИЦ ОИГ-ГиМ СО РАН, 1998. – С. 49–51.

5. Глущенко М.Н., Соболев А.Ю. Чувствительность к геоэлектрическим параметрам сигналов зондов двойного бокового каротажа аппаратурного комплекса СКЛ // Материалы XX Международного научного форума «Ломоносов-2013». / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2013.

© А. А. Горбатенко, К. В. Сухорукова, 2014

ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ

Вадим Александрович Горбатенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, инженер, e-mail: gorbatenkova@ipgg.sbras.ru

Вячеслав Николаевич Глинских

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-45-05, e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

Работа посвящена разработке параллельных алгоритмов численного решения прямой и обратной двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа с использованием специализированных вычислений на графических процессорах персональных компьютеров. Решение прямой задачи основано на сеточном методе конечных разностей. Решение обратной задачи использует подход к построению и анализу областей квазирешений и включает полный перебор модельных параметров. Проводится детальный анализ особенностей реализации и оптимизации параллельных алгоритмов на графических процессорах различных поколений.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, моделирование, инверсия, графические процессоры, параллельные вычисления.

NUMERICAL SOLUTIONS OF ELECTROMAGNETIC LOGGING PROBLEMS USING GPUS

Vadim A. Gorbatenko

Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av. 3, Engineer, e-mail: gorbatenkova@ipgg.sbras.ru

Vyacheslav N. Glinskikh

Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av. 3, Ph.D., head of laboratory, e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Institute for Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentyev av. 6, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

The paper deals with the development of parallel computational algorithms for 2D forward and reverse high-frequency electromagnetic logging problems with the use of specialized PC GPUs calculations. Forward problem solution is based on the finite differences grid method. Reverse problem solving utilizes creating and analysis of quasi-solution areas. It includes exhaustive search of model parameters. A detailed analysis of realization peculiarities and parallel algorithms optimization using GPUs of different generations is made.

Key words: electromagnetic logging, simulation, inversion, GPU, parallel computations.

В настоящее время изучение и разработка нефтегазовых месторождений сопровождается увеличением требований к эффективности и достоверности результатов интерпретации данных электрокаротажа. Современная обработка и интерпретация данных основывается на численных решениях двух- и трехмерных прямых задач электродинамики в полных математических постановках. Эффективность применения алгоритмов во многом определяется их производительностью, которая может быть достигнута с использованием параллельных вычислений. Такие вычисления могут быть оперативно исполнены на графических процессорах (GPU) персональных компьютеров.

Одной из технологий для реализации вычислений на GPU является NVidia CUDA [1]. В отличие от центрального процессора (CPU) современные GPU имеют уже сотни и даже первые тысячи потоковых процессоров. В зависимости от поколения вычислительного устройства варьируется их количество, составляющих один потоковый мультипроцессор. Единицей исполнения в CUDA является поток, группы которых объединяются в блоки расположенные на одной сетке. Все потоки в блоке и все блоки в сетке имеют свои индексы, что позволяет однозначно определять каждый поток по уникальному идентификатору. Данная технология, благодаря архитектуре графических устройств, предоставляет возможность исполнения одной и той же операции над большим количеством данных. При вычислении происходит распределение блоков потоков по потоковым мультипроцессорам, при чем несколько блоков может исполняться одновременно.

В работе рассматривается решение двумерной прямой задачи электромагнитного каротажа на основе метода конечных разностей [2]. Эта задача сводится к решению уравнения Гельмгольца, которое в результате аппроксимации сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с пятидиагональной матрицей. Эта особенность структуры СЛАУ дает возможность упрощения вычислительной сложности наиболее часто используемых и ресурсоемких матрично-векторных операций. После симметризации СЛАУ решается с использованием предобуславливания [3].

Проведен анализ возможностей численного моделирования на графических процессорах с архитектурами NVidia Fermi и Kepler. Последняя архитектура реализована на графическом процессоре GK110 и поддерживает динамический параллелизм, что позволяет наиболее оптимально подойти к численному решению задачи. Используется технология Hyper-Q, которая позволяет CPU ядрам одновременно задействовать GPU. Так, при решении прямой задачи электромагнитного каротажа применяются относительно небольшие сетки, что не позволяет использовать все доступные вычислительные мощности современных графических процессоров. Поэтому вычисления сигналов различных зондов производятся параллельно.

Для численной инверсии данных электромагнитного каротажа применяется подход, основанный на построении и анализе полного множества квазирешений обратной задачи [4]. Множества квазирешений характеризуются областями неоднозначностей определения модельных параметров. Для их построения проводится анализ целевой функцией невязки, в качестве которой выбрано среднеквадратичное расхождение синтетических и практических данных. Применяемый подход к решению обратной задачи позволяет не только определять модельные параметры, но и оценивать их погрешности.

Построение областей неоднозначности проводится путем полного перебора модельных параметров в заданных диапазонах, что может эффективно производиться параллельно. Одной из основных особенностей параллельного алгоритма инверсии является динамическое определение модельных параметров по идентификатору каждым потоком. Проведенный анализ показал, что хранение данных является избыточным и влечет за собой накладные расходы на обращение к глобальной памяти и добавочную нагрузку на L1 и L2 кэши. Вычисление необходимых данных в момент их использования и хранения в регистрах позволяет существенно ускорить алгоритм. В процессе работы алгоритма не удается организовать обращения в глобальную память в виде согласованных доступов, поэтому используется текстурная и разделяемая память для уменьшения времени ожидания данных. Подобные вычисления требуют копирования больших объемов данных из памяти GPU в память CPU. Разбивая исходные вычисления на отдельные независимые части, появляется возможность перекрыть копирования данных с вычислениями, тем самым уменьшив время бездействия видеокарты.

В заключение укажем следующее. Разработаны параллельные алгоритмы численного моделирования и инверсии данных электромагнитного каротажа на графических процессорах. Проведен детальный анализ особенностей реализации и оптимизации алгоритмов на графических процессорах различной архитектуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боресков А.В., Харламов А.А. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA // Издательство Московского университета 2012

2. Суродина И.В., Эпов М.И. Влияние биополимерных буровых растворов на диаграммы высокочастотного электромагнитного каротажа// Геология и геофизика, – М., 2012.

3. Лабутин И.Б., Суродина И.В. Разработка параллельных алгоритмов для решения задач каротажа на графических процессорах // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2012): труды международной научной конференции (Новосибирск, 26 – 30 марта 2012 г.). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 690 – 697.

4. Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В. Быстрое решение двумерной обратной задачи высокочастотного электромагнитного каротажа в нефтегазовых скважинах // Геофизический журнал, 2012, т. 34, № 4, с. 292-297.

© В. А. Горбатенко, В. Н. Глинских, И. В. Суродина, 2014

СТРОЕНИЕ ШАДРИХИНСКОГО РАЗЛОМА (ПРАВОБЕРЕЖНОЕ ПРИОБЬЕ) ПО ДАННЫМ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Екатерина Сергеевна Горностаева

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, e-mail: GornostaevaES@gmail.com

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-08, e-mail: Olenchen-koVV@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Потапов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-41-22, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Проведены электромагнитные зондирования в пределах зоны Шадрихинского разлома. Определена мощность коры выветривания глинистых сланцев и ширина зоны дробления в разломе. Установлен надвиговый характер дислокации.

Ключевые слова: аудиомагнитотеллурическое зондирование, геоэлектрический разрез, разлом.

STRUCTURE SHADRIHA FAULT BY RESULT OF THE AUDIOMAGNETOTELLURIC SOUNDING

Ekaterina S. Gornostaeva

Novosibirsk State University, National Research, 630090, Russia, Novosibirsk, ul. Pirogov, 2, e-mail: GornostaevaES@gmail.com

Vladimir V. Olenchenko

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptyuga 3, Senior Researcher, tel. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Potapov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptyuga 3, Researcher, tel. (383)330-41-22, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Electromagnetic sounding were carried out in the area Shadriha fault. Defined thickness of the crust of weathering shale and crushing zone width in the fault. Overthrust character dislocation was detected.

Key words: audiomagnetotelluric sounding, geoelectric section, fault.

Район исследований приурочен к переходной области от восточной окраины Западно-Сибирской низменности (Приобской равнины) к Колывань-Томской складчатой зоне (КТСЗ) и северо-западной окраине Салаира. Рельеф области представляет собой расчлененную равнину. Эта равнина, изрезанная густой речной сетью, имеет пологий уклон к северу и западу в сторону Западно-Сибирской низменности [1].

Краевая часть Салаира имеет общее антиклинальное строение. По мере движения с юга к северо-востоку простирание пород в его пределах изменяется с северо-восточного близкого к меридиональному на восток- северо- восточное, близкое к широтному.

Мелкие разрывные нарушения часто осложняют складчатые структуры окраины Салаира и очень распространены в отложениях Колывань-Томской складчатой зоны.

Для отложений КТСЗ характерно широко проявляющееся глубокое рассланцевание пород, при этом в отложениях юргинской свиты происходит тончайшая рассланцовка глинистых сланцев, а залегающие среди них горизонты известняков и кварцевых жил дробятся на обломки. В полях распространения юргинской свиты присутствуют мелкие нарушения, имеющие чаще всего северо-восточное и меридиональное простирание [2].

Формирование интенсивно дислоцированного палеозойского основания происходило длительно в результате проявления многих фаз тектонических движений. Наиболее интенсивно проявились позднегерцинские фазы, с которыми связано возникновение складчатости в отложениях КТСЗ, подновление разломов древнего заложения, возникновение зон смятия и надвигов в окраиной части КТСЗ.

Изучаемый участок расположен на правом берегу р. Обь в 8 км к востоку от Новосибирского Академгородка, в районе научного стационара ИНГГ СО РАН «Ключи». Участок работ пересекает протяжённая (около 12 км) линейно вытянутая вдоль реки Шадриха геоморфологическая структура, интерпретируемая как разлом северо-восточного простирания.

Для определения строения разломной зоны на участке исследований были проведены аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) вдоль профиля, пролегающего вкрест простирания структуры (рис. 1).

Метод АМТЗ основан на изучении поверхностного импеданса естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне частот от 0,1 Гц до 10 кГц. Основным источником электромагнитных полей звукового диапазона частот является, грозовая активность в экваториальной части Земли, и эти поля имеют шумовой характер [4].

Измерения естественных электромагнитных полей в рассматриваемом диапазоне частот позволяют изучать геоэлектрический разрез в диапазоне глубин от первых десятков метров до первых километров.

Важным достоинством метода АМТЗ является возможность аппроксимации первичного поля плоской вертикально падающей волной. Это наиболее простая модель поля, и для нее детально разработаны способы интерпретации результатов измерений для случаев горизонтально–слоистой и горизонтально–неоднородной сред. В изучаемом частотном диапазоне естественное поле не обладает выраженной поляризацией, что позволяет реализовать тензорные измерения и получать информацию о строении горизонтально–неоднородных сред.



Рис. 1. Карта района работ: 1-профиль АМТЗ, 2- стационар «Ключи»

При проведении электроразведочных пород методом AMT3 была использована многофункциональная и специализированная электроразведочная аппаратура канадской компании Phoenix Geophysics. В систему Phoenix MTU входят: прибор MTU-5, позволяющий регистрировать электрические (Ex, Ey) и магнитные (Hx, Hy, Hz) компоненты магнитотеллурического поля, и ПО компании Phoenix. Phoenix MTU-это аппаратурно-программный комплекс, позволяющий проводить синхронизированную регистрацию магнитных и электрических компонент MT-поля. Определение координат точек осуществляется в автоматическом режиме, с использованием встроенных в регистрирующий модуль GPS.

Для одномерной интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований использовалась программа «ZONDMT1D» [3]. Данная программа представляет удобный аппарат для автоматической и полуавтоматической (интерактивной) интерпретации профильных данных в рамках одномерной геоэлектрической модели.

В пределах участка работ были выполнены зондирования в 7 пунктах на расстоянии от 270 до 780 м. В результате обработки полевого материала была выполнена количественная интерпретация кривых зондирования и получены геоэлектрические модели.

Геоэлектрический разрез характеризуется двухслойным строением типа $\rho_1 \ll \rho_2$ (рис. 2). Мощность первого слоя варьирует от первых десятков метров до 150 м в зоне разлома. Первый слой с УЭС 15-30 Ом м включает в себя чет-

вертичные отложения и кору выветривания глинистых сланцев. Второй слой характеризуется высоким УЭС (800-4000 Ом·м), представлен консолидированными сланцами юргинской свиты.



Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю:

1- точки АМТЗ; 2- девонские отложения юргинской свиты (сланцы); 3-выветрелые сланцы; 4- удельное электрическое сопротивление пород, Ом[•]м; 5- ось разлома

Шадрихинский разлом выделяется зоной низкого УЭС (15-30) шириной до 1000 метров. Ассиметричное строение проводящей зоны разлома говорит о её наклонном залегании. Предполагаемое падение разлома – юго-восточное, что согласуется с представлениями о надвиговом характере дислокации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартынов В.А., Мизеров Б.В., Никитин В.П., Шаевич Я.Е.Геоморфологическое строение долины р. Обь в районе г. Новосибирска // Институт геологии и геофизики СО АН СССР.- 1977. - С. 59

2. Васютинская Т.Ф., Михайловский Д.В. Геологическая карта 1:200 000. Объяснительная записка // ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ.- 1969.- С. 55-57

3. ZONDMT1D. Руководство пользователя // Zond geophysical software Saint-Petersburg.- 2001-2012

4. Электроразведка. Метод АМТЗ. Аппаратура АКФ. Поиск кимберлитовых трубок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://geoget.ru/content/view/28/132/

© Е. С. Горностаева, В. В. Оленченко, В. В. Потапов, 2014

ИСТОРИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ В КАЙНОЗОЙСКОЕ ВРЕМЯ

Сергей Анатольевич Гуськов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН; Российская Федерация, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-29-01, e-mail: GusskovSA@ipgg.sbras.ru

Валентина Сергеевна Волкова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, главный научный сотрудник, тел. (383)330-29-01, e-mail: VolkovaVS@ipgg.sbras.ru

На основании анализа геологических карт нового поколения и стратиграфических разбивок кайнозойских отложений в колонковых и разведочных скважинах, впервые построены структурные карты по опорным уровням кайнозойских отложений и карты толщин заключенных между ними образований. В итоге была создана трехмерная модель палеогеновых и неоген-четвертичных отложений Западно-Сибирской геосинеклизы. Анализ построений позволил выявить принципиальные черты истории геологического развития территории исследования в это время и оценить ее влияние на перспективы нефтегазоносности этой территории.

Ключевые слова: кайнозой, стратиграфия, структурные карты, карты толщин, история геологического развития, Западно-Сибирская геосинеклиза.

GEOLOGICAL HISTORY OF THE ARCTIC REGIONS OF WESTERN SIBERIAN GEOSYNECLISE IN CENOZOIC

Sergey A. Gusskov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 630108, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av., 3, PhD in Geology, senior research scientist, tel. (383)330-29-01, e-mail: GusskovSA@ipgg.sbras.ru

Valentina S. Volkova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 630108, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av., 3, PhD in Geology, chief research scientist, tel. (383)330-29-01, e-mail: VolkovaVS@ipgg.sbras.ru

Based on the analysis of the new generation geological maps and stratigraphic arrangements of the Cenozoic deposits studied in core drilling and exploration wells, for the first time structural maps were built using datum levels of the Cenozoic deposits, and thickness maps for geological formations included between them. The result is a three-dimensional model of Paleogene and Neogene-Quaternary sediments of the West Siberian geosyneclise. Analysis builds revealed fundamental features geologic history of the study area in the Cenozoic and evaluate the petroleum potential of this site.

Key words: cenozoic, stratigraphy, structural maps, thickness maps, history of geological developmenty, West Siberian geosyneclise.
При рассмотрении истории генерации нефти и углеводородных газов в северной части Западно-Сибирского осадочного бассейна в кайнозое было показано, что основные процессы генерации углеводородов здесь протекали в позднем мелу и, особенно в кайнозое [1].

Как известно, в кайнозойской геологической истории Западно-Сибирского осадочного бассейна четко обособляется три совершенно непохожих друг на друга этапа, каждый из которых был крайне важен направленности процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления на севере Западно-Сибирского бассейна. Однако характер процессов, происходивших на этих этапах, был принципиально различен.

Важно также заметить, что обособление трех этих этапов связано с глобальными геодинамическими и климатическими изменениями [2, 3,4]

Первый этап охватывает палеоген, в котором, как и в течение большой части мезозоя, Западно-Сибирский бассейн продолжал прогибаться. В нем накапливались мощные толщи осадков палеоцена, эоцена и олигоцена, температура пород в юрских и меловых комплексах продолжала возрастать, и активно протекали процессы катагенетических преобразований органического вещества, сопровождавшиеся интенсивной генерацией жидких и газообразных углеводородов.

Второй этап начался в конце олигоцена и продолжался в течение всего неогена. На этом этапе в тесной связи с историей развития Северного Ледовитого океана происходило воздымание северной части бассейна и интенсивный размыв ранее накопившихся осадков. Рост температур при воздымании в осадочном чехле прекратился. Как следствие, замедлились или приостановились и процессы генерации углеводородов. В этот же период времени проявились тектонические процессы в южной части Западно-Сибирской геосинеклизы и складчатом обрамлении. Эти процессы были обусловлены коллизией жесткого Индостанского блока с Азиатской литосферной плитой и, в конечном счете, привели к воздыманию южной части геосинеклизы.

Наконец, третий этап начался в конце плиоцена и охватил весь плейстоцен. Он связан с резким похолоданием климата в северном полушарии, формированием многолетнемерзлых пород и мощных ледовых покровов, что коренным образом меняло термодинамический режим осадочного чехла и также оказало существенное влияние на формирование скоплений углеводородов.

Первый ключевой момент в новейшей геологической истории Западно-Сибирского осадочного бассейна произошел в позднем олигоцене, начале миоцена, когда режим погружения Западно-Сибирского осадочного бассейна сменился на режим воздымания и размыва палеогеновых и, частично, меловых отложений. Начало этого этапа датируется возрастом 25-20 млн. лет тому назад. В результате подъема бассейна и размыва палеогеновых и, частично, меловых отложений в системе снизились температура и давление. Как следствие, генерация углеводородов в осадочных комплексах севера Западно-Сибирского осадочного бассейна прекратилась. Прекращение генерации углеводородов не означает, что с этого времени прекратилось развитие и эволюция нефтегазовой системы Западно-Сибирского осадочного бассейна. Изменился характер этих процессов и режим эволюционирования системы. Если до конца олигоцена нефтегазовая система работала преимущественно как генерационная, то с началом подъема бассейна, снижения давления и температуры она работала, как миграционно-аккумуляционная и диссипативная.

Эффекты, созданные воздыманием северной части Западно-Сибирского осадочного бассейна были усилены процессами, вызванными коллизией Индостанского блока с Азиатской литосферной плитой. Воздымание Алтая и вслед за ним южной окраины Западно-Сибирского бассейна создало благоприятные условия для инфильтрации метеорных вод в осадочный бассейн вдоль его южной границы и формирования потока подземных вод в бассейне в северном направлении.

Происходивший в конце олигоцена и неогене размыв в ряде случаев мог сказаться и на сохранении залежей углеводородов. Напомним, что в северозападной части Припайхойско-Новоземельской депрессии толщины размытых пород превышали 1100 м. Примерно таким же был размыв в северной части Предъенисейской депрессии. Такие глубокие размывы могли уничтожить туронский флюидоупор и привести к разрушению скоплений углеводородов. С этих позиций требуют тщательного анализа данные сейсморазведки.

В конце плиоцена, около 2,5 млн. лет тому назад произошло еще одно глобальное событие - резкое похолодание климата в северном полушарии. Это событие сказалось на температурном режиме осадочного чехла. Особо значительное уменьшение температур имело место в позднем плейстоцене, причем происходило нарастание суровости климата. К концу позднего плейстоцена сформировались большие мощности мерзлых толщ (до 1000-1500 м), температуры грунтов были ниже современных на 8-10°С. Резкое похолодание климата и промерзание пород осадочного чехла привело к изменению температурного поля во всем чехле. По имеющимся оценкам даже на глубинах 3,0-3,5 км температура пород в осадочном чехле снизилась по сравнению с предплиоценовыми температурами на 15-20°С.

Не менее важными событиями этого этапа были формирование периодически мощных ледниковых покровов и их деградация. Центр ледникового покрова, мощность которого достигала 3500 м. находился в пределах акватории Карского моря. Огромные мощности льда создавали дополнительное давление на осадочный чехол. Периодическое увеличение давления за счет массы ледовых покровов и затем его снижение также оказывало влияние на формирование и переформирование залежей углеводородов.

Вопрос требует специального рассмотрения в части влияния ледникового покрова на формирование и сохранение скоплений углеводородов в акватории Карского моря.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Историко-геологическое моделирование процессов нафтидогенеза в мезозойскокайнозойском осадочном бассейне Карского моря / Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Малышев Н.А., Сафронов П.И., Гуськов С.А., Ершов С.В., Казаненков В.А., Ким Н.С., Конторович В.А., Костырева Е.А., Меленевский В.Н., Лившиц В.Р., Поляков А.А., Скворцов М.Б. Историко-геологическое моделирование процессов нафтидогенеза в мезозойскокайнозойском осадочном бассейне Карского моря // *Геология и геофизика.* - 2013. - Т. 54. - № 8. - С. 1179-1226.

2. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск: ГЕО. 2002, 248 с.

3. Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины. Новосибирск, СНИИГиМС, 2000, 64 с.

4. Унифицированные региональные стратиграфические схемы неогеновых и палеогеновых отложений Западно-Сибирской равнины (объяснительная записка). СНИИГиМС, 2001, 83 с.

© С. А. Гуськов, В. С. Волкова, 2014

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕМЕНТОВ В ГАЗО-АЭРОЗОЛЬНОЙ ФАЗЕ

Анна Юрьевна Девятова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник

Новосибирский Государственный Университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент, тел. +7-9137455379, e-mail: DevyatovaAY@ipgg.nsc.ru

Елизавета Павловна Бессонова

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, тел. +7-9139027169, e-mail: Liza@igm.nsc.ru

В статье представлены результаты физико-химического моделирования для техногенных процессов, происходящих при высоких температурах и низких давлениях с помощью ПК «Селектор». В качестве основы техногенной системы для модели взяты процессы переноса элементов при горении угольных отвалов.

Ключевые слова: физико-химическое моделирование, угольные отвалы, перенос элементов, атмосферное загрязнение.

TECHNOGENIC PROCESSES PHYSIC-CHEMICAL MODELING OF ELEMENTS TRANSFER IN GAS-AEROSOL PHASE

Anna Y. Devyatova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp. scientific researcher

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2, Pirogov st., docent, tel. +7-9137455379, e-mail: DevyatovaAY@ipgg.nsc.ru,

Elizaveta P. Bessonova

Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp. scientific researcher, tel. +7-9139027169, e-mail: Liza@igm.nsc.ru National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30

The article presents the results of physic-chemical modeling for industrial processes taking place at high temperatures and low pressures using a PC "Selector". The model basis on burning coal dumps technogenic system.

Key words: physic-chemical modeling, coal dumps, transfer elements, atmospheric pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Производственная деятельность человека вносит свой вклад в химические, минералого-геохимические и геоморфологические изменения окружающей среды. Процессы высокотемпературного техногенеза происходят в ряде отрас-

лей промышленности и в зависимости от участия техники и человека, могут быть управляемыми (электроэнергетика, пирометаллургия, петрургия, высокотемпературные процессы в химии, в керамических, цементных, стекольных производствах) и стихийными (рудничные пожары, взрывы в шахтах, горящие отвалы).

Процессы техногенного минералообразования и твердофазных превращений, на настоящий момент, достаточно хорошо изучены на примерах горящих угольных отвалов[1-3]. Отвалы от добычи угля содержат в основном вскрышные и вмещающие породы, годовые объемы которых в несколько раз превышают объемы добываемого угля. В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. Породы неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб [4]. По температурному состоянию отвалы делятся на горящие и негорящие. Отвал считается горящим, если на нем имеется хотя бы один очаг горения с температурой пород на глубине до 2,5 м более 80°С.

Наше исследование направлено на определение форм переноса элементов в газовой и аэрозольной фазах при горении угольных отвалов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевой отбор паро-газовых конденсатов и проб отвального вещества проводился на горящих угольных терриконах Челябинской области (г. Копейск). Химический состав газовых конденсатов выявлялся с использованием метода анализ ИСП-МС на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan MAT) в ИГМ СО РАН. Для определения состава твердого вещества многоэлементный анализ РФА-СИ, проведенный на станции элементного анализа VEPP – 3 (ИЯФ СО АН);

Основные термодинамические расчеты проводились с помощью программного комплекса (ПК) Селектор [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана физико-химическая модель формирования техногенного тела в условиях горения. Методика основана на принципе проточного ступенчатого реактора и охватывает область формирования техногенных минералов, газов и аэрозолей при взаимодействии прогретых пород террикона с атмосферным воздухом и водой при постоянном давлении 1 атм. В качестве природного прообраза моделируемых объектов рассматривалась техногенная система, развивающаяся в горящем угольном отвале. Рассчитаны варианты модели, при различных температурах. Расчеты проводились с помощью ПК «Селектор» [5] для мультисистемы H-O-N-S-Si-Ti-Al-C-Cl-F-K-Mg-Na-Fe-Cu-Zn-Ni-Pb-Rb-Sr-Ba-Li-V-Mn-Be-Cr-As-Co-Cs в интервалах температур 50-450°C (T1- высокотемпературная модель), 50-200°C (T2-низкотемпературная модель). Каждая из моделей эволюционирует во времени, расчеты были произведены для десяти «времен». Для расчета термодинамических свойств веществ использовались стандартные базы данных компонентов водного раствора, газов, расплавов, твердых веществ и минералов [6-14]. В качестве прообраза техногенной системы использованы данные по парогазовым конденсатам и составам отвальных пород угольных терриконов Челябинской области. Для моделирования использовалась схема, показанная на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема модели техногенной системы

При взаимодействии вещества отходов с атмосферным воздухом и осадками при разных температурах формируются различные минеральные ассоциации, а соответственно и различные компоненты мигрируют вместе с газовоаэрозольной смесью в окружающею среду. Естественно при более высоких температурах (450°С) взаимодействие идет активнее, быстро формируется ассоциация минералов характерная для окислительных условий (рис. 2). Преобладающими минералами являются кварц, монтмориллонит, силлиманит, вначале взаимодействия велика доля полевых шпатов (более 20%) (рис. 2a), к 10-му «времени» их доля уменьшается за счет увеличения доли кварца и силлиманита (рис. 2б). Микрокомпоненты Fe, Cu, Zn, Pb, Sr, As, Co на первом «времени» находятся в сульфидной форме, но уже ко второму времени переходят в сульфатную и оксидную. Также со временем повышается степень окисления V, As, Fe. Основные газы это CO₂, N₂ и H₂O. С газами мигрируют именно микрокомпоненты в виде соединений с хлором, редко с фтором, однако основная часть элементов переносится в виде аэрозолей, формируя высококонцентрированные слабокислые растворы. В целом при условии начального взаимодействия при высоких температурах выносятся щелочные металлы: Li, Na, K, Rb, Cs. В процессе остывания и подъема к поверхности из газоаэрозольной смеси осаждаются минералы: при 300°С - кварц, при 200°С -хлориды Rb, Li, K, Na, при 150°С фториды Li, Al. Очень небольшое количество (сотые процента) Li, Cs, Rb выносятся с аэрозолями в окружающею среду.



Рис. 2. Минеральный состав высокотемпературной системы в разное время

Вторым примером было выбрано взаимодействие при температуре 200°С. Изначально в первом резервуаре складывается совсем другая ассоциация минералов (рис. 3). Более восстановительные условия на начальном этапе приводят к тому, что существенная доля углерода остается в породе в виде графита (до 30%), также в отличие от предыдущего случая значительна доля иллита (30%) (рис. 3а). При дальнейшем взаимодействие к 10-му времени графит практически исключается из системы, повышается доля кварца и появляется биотит (рис. 3б). Микрокомпоненты в начале процесса представлены в основном в виде хлоридов и фторидов, только для мышьяка и железа характерны сульфиды. В дальнейшем степень окисления повышается, и металлы формируют сульфаты и оксиды.

При условии не высоких температур миграция элементов с газовоаэрозольной смесью происходит намного более активно за счет большой доли аэрозольной фазы. Выносится почти все элементы, существенное количество Fe, Cu, Co, Cr. Соответственно, формируется и более богатая ассоциация новообразованных фаз. Во втором резервуаре (T=180°C) существенную долю составляют сульфаты Ba, Li, гидросульфат Cu. В третьем резервуаре (150°C) преобладает сульфат меди (более 90%), присутствуют сульфаты Rb, Li, Ba, Co, оксид пятивалентного V. При более низких температурах количество осаждающихся минералов совсем незначительно, также представлено сульфатами. Вынос элементов с газо-аэрозольной смесью в окружающею среду гораздо существеннее, чем при условии начально высоких температур.



Рис. 3. Минеральный состав низкотемпературной системы в разное время

Таким образом, в зависимости от начальной температуры взаимодействия атмосферного воздуха и осадков с породами отвалов меняется окислительновосстановительная среда и как следствие формируются сильно различающиеся ассоциации минералов.

Соотношение газ/аэрозоль определяет количество вещества выщелачиваемого из породы отвалов. Чем более «сухой» газ, тем меньшее элементов по количеству и разнообразию выносится во внешнею среду.

По минеральному составу новообразованных корочек во флюидопроводниках можно делать предположения о первоначальных физико-химических условиях взаимодействия атмосферного воздуха и осадков с породами отвалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coal and Peat Fires: A Global Perspective: Volume 1: Coal - Geology and Combustion. Edited by Glenn B. Stracher, Anupma Prakash, Ellina V. Sokol, Elsiver 2011, 357 pp

2. Masalehdani, M.N. et al., 2004. Products of oxidation and combustion within the burning coal waste heaps in the Nord-Pas-de-Calais Coalfield, northern France. In Proceedings of the Joint Earth Sciences Meeting (RST), Strasburg, France, 20-25 September 2004, 39

3. Чесноков Б.В., Бушмакин А.Ф., "Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение восьмое)" Уральский минералогический сборник, N 5. Миасс: ИМин УрО РАН, 1995. С. 3-22.

4. Максимович Н. Г. Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // Географический вестник. – 2006. – №2. – С. 128-134.

5. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 283 с.

6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.

7. Berman R.G. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na2O-K2O-CaO-MgO-FeO-Fe2O3-Al2O3-SiO2-TiO2-H2O-CO2 // Jour. of Petrology, 1988, v. 29, p. 445-522.

8. Holland T.J.B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // Jour. Metamorphic. Geol. 1998. V. 16. № 3. P. 309-343.

9. Ghiorso M.S., Sack R.O. Chemical mass transfer in magmatic processes. IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1995. V. 119. P. 197-212.

10. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (105 Pascals) pressure and at higher temperatures // U. S. Geol. Survey Bull. V. 2131. Washington. 1995. 461 p.

11. Shock E.L., Sassani D.C., Willis M., Sverjensky D.A. Inorganic species in geologic fluids: Correlations among standard molal thermodynamic properties of aqueuos ions and hydroxide complexes // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61, № 5. P. 907-950.

12. Sverjensky D.A., Shock E.L., Helgeson H.C. Prediction of the thermodynamic properties of aqueous metal complexes to 1000°C and 5 kb. // Geoch. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61, № 7. P. 1359-1412.

13. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // Journal of the National Chemical Laboratory for Industry. 1988. V. 83. P. 27-121.

© А. Ю. Девятова, Е. П. Бессонова, 2014

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ИЛИ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ Р-Т УСЛОВИЯХ

Аркадий Николаевич Дробчик

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, e-mail: A.N.Drobchik @gmail.com

Николай Алексеевич Манченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, e-mail: manch_kol@mail.ru

Никита Александрович Голиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, e-mail: golikovna@ipgg.sbars.ru

Исследование физических свойств осадков (грунтов) в процессе их промерзания (таяния) или разложения газогидратов имеет значение как при изучении структуры и устойчивости многолетнемерзлых пород, так и при изучении скоплений газовых гидратов. Лабораторные измерения физических свойств на разных стадиях фазового перехода позволит оценить возможности их идентификации геофизическими методами. В работе приводятся результаты по созданию установки для автоматизации измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) и упругих свойств осадков в различных Р-Т условиях.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, метод сопротивлений, лабораторные эксперименты, автоматизация измерений, упругие свойства мерзлых пород.

DEVELOPING LABORATORY DEVICES FOR MEASURING PHYSICAL PROPERTIES OF FROZEN OR HYDRATE SEMPLES AT VARIOUS P-T CONDITIONS

Arkadiy N. Drobchik

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Ac. Koptyuga ave., e-mail: A.N.Drobchik @gmail.com

Nikolay A. Manchenko

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Ac. Koptyuga ave., e-mail: manch_kol@mail.ru

Nikita A. Golikov

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Ac. Koptyuga ave., e-mail: golikovna@ipgg.sbars.ru

Measuring physical properties of freezing sediments is important for studying the structure and stability of permafrost and gas-hydrate baring sediments. Therefore, performing laboratory measurements of these properties at different stages of freezing will allow assessing possibility to identify them by geophysical methods. In the paper we present the results of developing laboratory setup for automated measurements of electrical resistivity by the four-electrode probe and measurements of acoustic properties in different P-T conditions. **Key words:** electrical resistivity, resistance method, laboratory experiments, electrical properties of permafrost, automation of measurements, elastic properties of permafrost.

Исследование физических свойств промерзающих осадков (грунтов) имеет значение как при изучении структуры и устойчивости многолетнемерзлых пород, так и при изучении процессов формирования и разложения газовых гидратов [1,2]. Поэтому важной задачей является изучение физических свойств осадков на разных стадиях промерзания, что позволяет оценить возможности их дифференциации геофизическими методами. Определяющими физическими свойствами горных пород в электроразведке и сейсморазведке являются: удельное электросопротивление (УЭС) и скорость продольных и поперечных волн, соответственно. В настоящее время существует лабораторная установка, позволяющая в небольшом объеме моделировать условия формирования газогидратов с возможностью регулировки температуры и давления в камере. В данной работе дается описание зондов, разработанных для изучения электрофизических и упругих свойств в этой установке.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Эксперимент по измерению УЭС методом сопротивлений заключается в создании первичного поля совокупностью точечных источников, располагаемых различным способом на поверхности или внутри образца, и последующему анализу созданного в образце поля.



Рис. 1. Схема эксперимента по измерению УЭС методом сопротивлений

В нашем случае образец помещался в камеру высокого давления (рис. 1) в которой может меняться температура в диапазоне от -20 до +70С с помощью термостата и давление до 10 МПа. Эта установка может быть использована как для промораживания и замерзания грунтов, так и формирования осадков, содержащих газовые гидраты.

Для измерения УЭС использовался цилиндрический игольчатый четырехэлектродный зонд. На электроды А и В подается синусоидальное переменное напряжение с частотой 600Гц. Величина тока, протекающего через образец, регистрируется по падению напряжения на эталонном сопротивлении R (рис.1). Зная разность потенциалов на измерительных электродах MN можно получить по закону Ома УЭС образца. Подробно метод сопротивлений рассматривается в [3]. Регистрация температуры осуществляется цифровыми датчиками DS18S20, которые расположены в образце и на стенке камеры высокого давления (T1, T2, рис.1).

Проведение одного эксперимента составляет 5-7 часов. Для автоматизации проведения эксперимента был разработан прибор, регистрирующий разность потенциалов до 10В и температур в интервале от -25 до 50°С. Это позволяет строить непрерывные зависимости УЭС, потенциалов и температур от времени на протяжении всего эксперимента (5-7 часов).

Прибор построен на базе платы Seeeduino 3.0. В данной плате имеется 8 аналоговых входов, по 10 бит на канал. Диапазон регистрируемых напряжений от 0 до +5В. То есть минимальная регистрируемая величина напряжения без усиления составляет 0,0048 В. В эксперименте же диапазон измеряемых величин составляет 0-2,5В. При этом, если мы будем измерять сразу разницу потенциалов, то диапазоны будут 0,001-0,03В для UR2 и 0,01-0,6В для разницы UM-UN. Была создана схема на дифференциальных усилителях, на вход которой подаются пары потенциалов, а на выходе получается искомая разность потенциалов. Также схема производит приведение исходного диапазона к диапазону АЦП для исключения потери битности, и как следствие точности измерений.

Была написана программа под микроконтроллер. При получении команды через последовательный порт микроконтроллер проводит сбор данных о разности потенциалов с аналоговых входов, считывание температуры с цифровых датчиков и организовывает отправку данных через последовательный порт.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Полученная система была протестирована на описанной выше установке (рис. 1). В качестве образца для тестирования измерительной системы использовался кварцевый песок при полном насыщении порового пространства раствором NaCl в дистиллированной воде (С=0.3 г/л). Сначала в камеру (рис. 1) заливалось 650 г раствора NaCl (0.3%), затем в раствор медленно засыпался кварцевый песок (после загрузки уровень жидкости превышал образец на 2 см). Предполагается, что такой метод позволяет полностью заполнить поровое пространство раствором. После этого с помощью термостата камера высокого дав-

ления охлаждалась от комнатной температуры (24 ^оC) до полного замерзания образца.

На рис. 2 показан пример такого графика; показана зависимость расчетного значения УЭС и температуры внутри и снаружи камеры в зависимости от времени. Из графика видно, что до момента полного оледенения воды в образце наблюдается повышение УЭС. По окончании оледенения УЭС резко падает и принимает значение близкое нулю. Это может быть объяснено тем, что на электродах произошло намерзание ледяной корки, и ток перестал течь через образец.



Рис. 2. Синяя кривая - зависимость УЭС от времени. Красная кривая – датчик температуры №2 (снаружи камеры). Зеленая кривая – датчик температуры №1 (в центре камеры)

ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Для изучения акустических свойств был создан зонд (рис. 3). Зонд состоит из пьезокерамического излучателя и приемника расположенных друг напротив друга и удерживаемыми стержнями.

Между излучателем и приемником размещается исследуемый образец. Излучатель и приемник схожи по конструкции (рис. 4). В латунный корпус укладывается подложка из текстолита, в которую вклеиваются 2 пьезокерамические шайбы. Одна шайба служит для возбуждения продольных волн, а другая - поперечных. Для возбуждения волн на контакты Up и Us подается дельта импульс относительно потенциала земли. По времени задержки прихода импульса на приемник можно судить о скорости распространения волны. Сверху подложка задавливается свинцом, так что один контакт соединяется с корпусом и тем самым заземляется. Все стыки проливаются эпоксидной смолой для обеспечения герметичности. На пьезокерамику подаются импульсы с импульсного высоковольтного генератора длительностью порядка 1 мкс и амплитудой 60В. Предполагаемые частоты возбуждаемых волн 500-700 кГц. Для данных измерений планируется использовать цифровой осциллограф с возможностью управления с ПК.



Рис. 3. Акустический зонд

Рис. 4. Пьезокерамический излучатель

выводы

В работе описано устройство, которое разработано и создано для автоматизации длительных экспериментов по измерению УЭС и температуры осадков в процессе моделирования мерзлых и гидратсодержащих промерзания или оттаивания образцов. Устройство создано на базе платы Seeeduino 3.0 и имеет графический интерфейс под Matlab.

Был создан зонд для измерения упругих свойств.

Разработанные устройства позволят измерять УЭС и упругие свойства осадков и грунтов на разных стадиях замерзания/оттаивания, а также в процессе разложения газогидратов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Дучкову А.Д., Манакову А.Ю., Дучкову А.А., Манштейну А.К. и Пермякову М.Е. за помощь в работе. Работа была поддержана МИП СО РАН №19 и грантом РФФИ (12-05-00415-а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. // СПб.: ВНИИ Океангеология, 1994.

2. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермяков М.Е. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири. // Криосфера Земли, т. XIII, №4, 2009, с. 62-68

3. Якубовский Ю. В., Ренард И.В. Электроразведка. // Недра, 1991. – 358 с.

© А. Н. Дробчик, Н. А. Манченко, Н. А. Голиков, 2014

ОЦЕНКА ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ВОСТОЧНОЙ ТУВЫ В ЗОНЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ 2011-2012 гг.

Альберт Дмитриевич Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, профессор, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Людмила Степановна Соколова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Авторы рассмотрели распределение теплового потока на территории Восточной Тувы. Показано, что тувинские землетрясения (2011-2012 гг.) произошли в пограничной зоне между «холодным» и «горячим» блоками земной коры. Геотермическим методом выполнена оценка распределения температуры в земной коре вдоль профиля, проходящего через эпицентры землетрясений. Полученные данные использованы для оценка термоупругих напряжений в зоне сейсмической активизации 2011-2012 гг. Сделан вывод о возможном влиянии температурных условий на развитие сейсмического процесса.

Ключевые слова: Восточная Тува, землетрясения, земная кора, тепловой поток, температура, термоупругие напряжения.

EVALUATION THERMOELASTIC STRESSES IN THE CRUST OF EASTERN TUVA IN ZONE SEISMIC ACTIVITY IN 2011-2012

Albert D. Duchkov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect academician Koptyug, 3, Professor, Doctor of Sci., Chief scientific officer, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Lyudmila S. Sokolova

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect academician Koptyug, 3, Ph.D., Senior Researcher, tel. (383)330-25-91

The authors examined the distribution of heat flow in East Tuva. It is shown that the Tuvan earthquakes (2011-2012) occurred in the border zone between the "cold" and "hot" crustal blocks. Geothermal method used to estimate the temperature distribution in the Earth's crust along a profile passing through the earthquake epicenters. The obtained data were used to estimate the thermoelastic stresses in the zone of seismic activity in 2011-2012 years. Calculations suggest a possible influence of temperature conditions on the seismic process development.

Key words: Eastern Tuva, earthquakes, earth's crust, heat flow, temperature, thermoelastic stress.

Ранее неоднократно указывалось, что одной из причин возникновения землетрясений могут явиться термоупругие напряжения, формирующиеся в земной коре в результате изменений температуры земных недр во времени и пространстве [1, 2]. Впоследствии это направление исследований не получило развития. Причин вероятно две. С одной стороны, существенно развились сейсмологические исследования, которые показали, что сейсмичность связана со многими факторами, среди которых температура не является основным или очевидным. С другой стороны, очень медленно происходит по технологическим причинам накопление геотермических данных.

Землетрясения, произошедшие в Восточной Туве в 2011-2012 гг. (ML = 6,7-6,8) [3], случились после долгого сейсмического затишья в пограничной зоне между двумя блоками земной коры, характеризующимися различным тепловым режимом. Эта ситуация показалась нам благоприятной для оценки возможного влияния геотермических условий на развитие сейсмического процесса.

Геотермическими исследованиями [4, 5] установлено, что Тувинская котловина и предгорья Восточного Саяна характеризуются невысоким тепловым потоком (30-50 мВт/м²); восточные же районы Тувы, примыкающие к Байкальской рифтовой зоне, наоборот разогреты. Здесь тепловой поток (q) достигает 70-80 мВт/м² (рис. 1).



Рис. 1. Распределение теплового потока (q, мВт/м²) в Восточной Туве: 1 - пункты геотермических измерений q, 2 – пункты оценки q по измерения изотопов гелия в термальных источниках. 3 - звездочки отмечают эпицентры тувинских землетрясений 2011-2012 гг. Изогнутая линия показывает расположение интерпретационного профиля (начинается от р. Элегест и заканчивается в западной Бурятии)

На рис. 2 показан график теплового потока вдоль интерпретационного профиля и соответствующее ему распределение температуры в земной коре. Оценка глубинных температур выполнена геотермическим методом по данным

о тепловом потоке, строении и физических свойствах (плотность, теплопроводность, радиогенная теплогенерация) земной коры.



Рис. 2. Распределение теплового потока (верхний график) и температуры в земной коре (изолинии в ⁰C) вдоль интерпретационного профиля. Вертикальные черточки – пересечение профиля с меридианами 95⁰-99⁰ в.д.; звездочки – расположение гипоцентров землетрясений 27.12.2011 и 26.02.2012 гг.; вертикальные штриховые линии – границы блоков I, II и III расчетной модели; ширина блока III C = 130 км

По тепловому режиму земную кору вдоль профиля можно разделить на три блока. На западе располагается «холодный» блок (I), где температура на границе Мохо составляет $500-600^{\circ}$ С. На востоке можно выделить «горячий» блок (II), в пределах которого температура у подошвы земной коры превышает $1000-1100^{\circ}$ С. Непосредственно внутри «холодного» и «горячего» блоков изотермы располагаются в основном горизонтально, особенно в верхней коре. Между блоками I и II расположен промежуточный блок III, в пределах которого изотермы отклоняются от горизонтали, что свидетельствует о существовании горизонтальной температурной неоднородности, которая может привести к возникновению и накоплению температурных напряжений. Примечательно, что гипоцентры тувинских землетрясений располагаются именно в блоке III.

Используя такую блоковую модель земной коры мы попытались оценить хотя бы порядок возможных термоупругих напряжений, которые могут возникнуть в блоке III. Все расчеты выполнены в пределах этого блока. Начало координат располагалось в точке пересечения западной границы блока с поверхностью, ось у направлена на восток, ось z – вниз; на верхней границе сохраняется нулевая температура.

На боковых границах блока III существуют распределения температуры $T_1(z)$ и $T_2(z)$, соответствующие средним тепловым потокам в блоках I и II (q₁ =

45 мВт/м² и $q_2 = 75$ мВт/м²). Учитывая это, изменение температуры внутри блока III можно описать формулой:

$$T(z,y) = T_1(z) + [\Delta T(z) \cdot y]/C$$
(1)

Согласно [1, 2] для оценки температурных напряжений в породах земной коры применима теория упругих деформаций. Из обзора В.Н. Николаевского [7] следует, что наиболее благоприятные условия для накопления напряжений, приводящих к землетрясениям, существуют до глубин 20-25 км. Поэтому расчеты производились до глубины 30 км.

Для оценки термоупругих напряжений в блоке III мы воспользовались схемой, предложенной в работе [2] для тех же целей применительно к осадочной толще. Особое внимание было уделено оценке скалывающих напряжений, которые сопровождают сдвиговые процессы, доминирующие в земной коре. Рассматривалась двумерная задача поскольку в блоке III температура изменяется в горизонтальном направлении только по оси у. Для расчета скалывающих напряжений о_{zy} авторами получена формула:

$$\sigma_{zv} = 0.5 \cdot [(1 - 2v)/(1 - v) \rho \cdot g \cdot z - E \cdot \alpha \cdot \Delta T/(1 - v)], \qquad (2)$$

где α – коэффициент линейного расширения, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ρ - плотность пород земной коры, g – ускорение силы тяжести. Первый положительный член в формуле (2) отвечает за упругие напряжения, второй член со знаком минус определяет напряжения, связанные с пространственными изменениями температуры.

Чтобы получить количественную оценку возможных скалывающих напряжений в блоке III, подставим в формулу (8) типичные для горных пород значения входящих в нее величин: Е = 60 ГПа, v = 0.25, $\alpha = 10^{-5}$ K⁻¹, $\rho = 2700$ кг/м³, g = 9.8 м/сек². Δ T оценивается по формуле (1). Результаты расчетов σ_{zy} в блоке III приведены в таблице.

Таблица

У, км Z, км	0	16	32	49	65	81	97	114	130
1	0,8	0,7	0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1	-11
5	12	8	4	0,1	-4	-8	-12	-16	-20
10	24	19	13	8	2	-3	-9	-14	-20
15	40	33	25	18	10	3	-4	-12	-20
20	56	48	38	30	20	15	2	-6	-16
25	80	69	58	46	34	23	12	-0,1	-12
30	105	91	77	65	49	35	21	7	-7

Распределение скалывающих напряжений σ_{zv} (в Мпа) в блоке III

Примечание: черным цветом выделена часть разреза, в которой на глубине 14 и 17 км расположены гипоцентры тувинских землетрясений 2011-2012 гг.

Из таблицы следует, что в блоке III развиваются скалывающие напряжения противоположных знаков. В левой части блока превалируют положительные упругие напряжения. Влияние температурной составляющей здесь не заметно. Примерно с середины блока отрицательные температурные напряжения возрастают и в конце концов начинают преобладать. Нулевая граница соответствует балансу этих двух видов напряжений. Гипоцентры землетрясений примерно приурочены к зоне смены типов напряжений. По абсолютной величине рассчитанные суммарные напряжения на глубине расположения гипоцентров составляют 20-30 МПа, т.е. примерно на порядок ниже предельных значений прочности кристаллической коры, которые согласно работе [8] составляют 400-500 Мпа на глубине 15-20 км. Разрушение пород происходит, если скалывающие напряжения превосходят свои предельные значения прочности. В этих условиях землетрясение может произойти лишь в ослабленной зоне, где прочностные свойства пород значительно снижены. Ослабленные зоны существуют вблизи разломов, в местах распространения сильной трещиноватости. Очевидно из-за приуроченности к зонам разломов скалывающие напряжения даже очень сильных землетрясений могут не превышать 10 МПа [1], что даже в 2-3 раза ниже полученных нами значений. Согласно [4] тувинские землетрясения приурочены к Каахемскому глубинному разлому, активность которого длительное время поддерживается тектоническими силами.

Выполненное исследование не может считаться доказательством того, что именно наблюдаемая температурная неоднородность однозначно является единственной причиной происходящих в обсуждаемом регионе землетрясений. Накопление термоупругих напряжений в земной коре блока III может рассматриваться в качестве одной из причин произошедшей здесь сейсмической активизации. В данном исследовании выполнена весьма грубая оценка термоупругих напряжений. В дальнейшем необходимо рассмотреть более реальную термомеханическую модель.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке проекта 4.1. Президиума РАН «Сейсмические активизации в индустриальных кластерах юга Сибири: особенности развития и сейсмическая опасность».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. - М.: Недра, 1965. - 379 с.

2. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. Часть 1. - М.: Мир, 1985. - 374 с.

3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Массальский О.К. Тувинские землетрясения 2011-2012 гг.: эпицентральные наблюдения, модель развития тектонического процесса // 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием (21-25 октября 2013 г., г. Новосибирск). – Новосибирск: Изд-во Полиграфика, 2013. – С. 54-58.

4. Соколова Л.С., Дучков А.Д. Новые данные о тепловом потоке Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 2008. - Том 49. - №12. - С. 1248-1261.

5. Дучков А.Д., К.М. Рычкова, В.И. Лебедев, И.Л. Каменский, Л.С. Соколова/ Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках // Геология и геофизика, 2010. - Том 51. - №2. –С. 264-276.

6. Тепловое поле недр Сибири. - Новосибирск: Наука, 1987. - 185 с.

7. Райс Дж. Механика очага землетрясения. - М.: Мир, 1982. - 217 с.

8. Крылов С.В., Тен Е.Н. Оценка прочности кристаллических пород по данным глубинного сейсмического зондирования на Р- и S-волнах // Геология и геофизика, 1994. – Том . - №5. – С. 20-30.

© А. Д. Дучков, Л. С. Соколова, 2014

О ПРИРОДЕ МАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПУНКТЕ СТВОЛОВАЯ НА ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ В ПЕРИОД СТОЯНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Петр Георгиевич Дядьков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, З, зав. лабораторий естественных геофизических полей ИНГГ СО РАН, доцент кафедры геофизики геологогеофизического факультета Новосибирского государственного университета, кандидат геологого-минералогических наук, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Александра Аглямовна Дучкова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, тел. +7(383)333-03-99, e-mail: IbatullinaAA@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Александрович Кулешов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. +7(383)333-29-05, e-mail: KuleshovDA@ipgg.sbras.

Александра Викторовна Левичева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. +7(383)333-29-05, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Дарья Михайловна Павлова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ), 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент геологогеофизического факультета НГУ, e-mail: PavlovaDasha94@mail.ru

Специальные экспериментальные исследования и теоретические оценки позволили установить, что некоторые из наблюдаемых в феврале-марте в пункте Стволовая магнитных эффектов могут иметь магнитоупругую природу и быть связаны с воздействием ледового покрова на прибрежные массивы горных пород при тепловом расширении. Интерпретация этих аномалий в рамках магнитоупругого механизма позволила оценить механические напряжения, которые оказались равными ~ 0.1 – 0.2 МПа.

Ключевые слова: тектономагнитный мониторинг, озеро Байкал, воздействие ледового покрова, магнитоупругий эффект.

ON THE NATURE OF MAGNETIC EFFECTS AT STVOLOVAYA STATION ON THE EAST COAST OF LAKE BAIKAL DURING THE PERIOD OF ICE COVERAGE

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyuga 3, head of laboratory of natural geophysical fields, docent of geophysics department of Novosibirsk State University, Ph.D., tel. +7(383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Alexandra A. Duchkova

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug 3, engineer, tel. +7(383)333-29-05, e-mail: IbatullinaAA@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Kuleshov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug 3, postgraduate, tel. +7(383)333-29-05, e-mail: KuleshovDA@ipgg.sbras.ru

Alexandra V. Levicheva

trofimuk institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug 3, postgraduate IPGG SB RAS, tel. +7(383)333-29-05, e-mail: Leviche-vaAV@ipgg.sbras.ru

Darja M. Pavlova

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Pirogova 2, student, e-mail: Pav-lovadasha94@mail.ru

Special experimental studies and theoretical estimates allowed to establish that some from observed in February-March in the Stvolovay station magnetic effects can have the piezomagnetic nature and to be connected with impact of an ice cover on coastal massifs of rocks at temperature changes. Interpretation of these anomalies within the piezomagnetic mechanism allowed to estimate the mechanical stresses which equal $\sim 0.1 - 0.2$ MPa.

Key words: tectonomagnetic monitoring, Lake Baikal, effect of ice cover, piezomagnetic effect.

На Байкальском геодинамическом полигоне в пределах Зареченской магнитной аномалии детально исследуются геомагнитные эффекты различной природы, выявляемые при проведении непрерывных синхронных наблюдений на стационарном пункте «Стволовая» в районе Зареченской магнитной аномалии и в 15 км от нее на базовом пункте «Энхалук». Разработанные методические приемы учета и исключения ряда геомагнитных эффектов, таких как индуктивный и ориентационный эффекты геомагнитных вариаций, вековая вариация, значительно повысили чувствительность и информативность тектономагнитного метода [1, 2]. Благодаря этому в пункте Стволовая удалось выявить магнитные эффекты с амплитудой до 0.7 нТл в феврале - марте 2008 года (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что долговременный температурный тренд с середины февраля до конца марта не сопровождается трендом в данных магнитных на-

блюдений, что имело бы место в случае значимого температурного коэффициента у используемой аппаратуры либо каких-либо природных источников с такого же типа зависимостью. В то же время, на более коротких периодах, при достаточно быстрых изменениях температуры, такая зависимость хорошо прослеживается с 20-х чисел февраля по середину марта, что является основанием для предположения о другом типе механизма взаимосвязи между температурой и эффектами в магнитном поле, например, о магнитоупругом, вызванным эпизодическими воздействиями ледового покрова на береговые массивы горных пород при тепловом расширении. В этом случае на длинных периодах за счет развития дислокаций в ледовом покрове, льдотрясений и подвижек по имеющимся трещинам значительного накопления упругих деформаций в ледовом покрове не происходит.



Рис. 1. Пример аномального изменения ежедневных значений модуля вектора магнитной индукции dTck.cp. в пункте Стволовая относительно базовой станции Энхалук (скользящие средние из 3-х значений) и изменение среднесуточной температуры с 14 февраля по 31 марта 2008 года. Прямыми линиями обозначены тренды соответствующих кривых

Для определения роли возможных источников изменений в аномальном магнитном поле в п. Стволовая, проведены специальные экспериментальные исследования пространственных градиентов магнитного поля в местах расположения датчиков магнитных станций, определена магнитная восприимчивость почв и подлежащих осадочных пород в этих местах.

Получено, что величины вертикального градиента на высоте датчика (120 - 130 см) на 2-х станциях не превышают 0.02 нТл/см и только для одной из станций он составляет 0.35 нТл/см. При таких градиентах значительные изменения магнитного поля за счет изменения высоты расположения датчиков при промерзании и оттаивании почвы маловероятны.

Определена магнитная восприимчивость почвы и подстилающих ее песков около станции «Бункер». Для измерений использовался каппа-мост КLY-2. Значение магнитной восприимчивости почвы (χ) составило 13 х 10⁻⁵ ед.СИ, а песка - 79,0·10⁻⁵ ед.СИ. Породы с такими значениями χ не могут генерировать значительные аномалии, тем более при близком к горизонтальному залегании осадочных слоев горных пород. Соответственно, вертикальный градиент поля на высоте около 130 см меняется слабо, что и подтвердили результаты измерения градиента, изложенные выше.

На основе полученных экспериментальных данных была оценена величина механических напряжений, которые могли быть источником регистрируемых в феврале – марте магнитных аномалий в предположении магнитоупругого механизма. Амплитуда зарегистрированных магнитных аномалий достигала 0,4 – 0,8 нТл (например, в 2008 году). Магнитоупругий коэффициент был принят равным 10⁻³ 1/МПа. Значение магнитной восприимчивости коренных пород измерялось нами в полевых условиях на скальных обнажениях вблизи магнитных станций и составило для разных пород (как правило, гранодиориты и граносиениты) от 5 x 10^{-3} до 2 x 10^{-2} ед. СИ. Для расчетов было взято значение 10^{-2} ед. СИ. Поскольку источник силовых воздействий и коренные породы находились близко к земной поверхности, в качестве аномального магнитного тела было принято однородно намагниченное полупространство. Получилось, что необходимые для генерации наблюдаемых изменений в магнитном поле механические напряжения должны быть равны 0.1 – 0.2 МПа. Эти значения приблизительно на один - полтора порядка ниже предела прочности льда (максимальные значения - около 5 МПа).

Выполнены оценки напряжений в ледовом покрове оз. Байкал, обусловленные потеплением воздуха на 20°С для размеров ледовой пластины 40 км и модуля Юнга льда = $3 \cdot 10^9$ Па. Эти напряжения получились равными 0.42 МПа, что составляет четверть или половину от значений напряжений (0.1 – 0.2 МПа), полученных выше в результате интерпретации зарегистрированных магнитных эффектов в пункте Стволовая. При этом следует учитывать эффект ослабления поля напряжений с удалением от берега, поскольку ближайшие пункты регистрации магнитного поля расположены в 200-300 м от береговой линии.

Полученные результаты значительно сузили количество потенциальных источников, которые могут быть причиной наблюдаемых в феврале-марте магнитных аномалий, и существенно повысили вероятность их магнитоупругой природы.

Отдельные разделы данного исследования поддержаны проектами МИП СО РАН 73, ПФНИ VIII.70.2.3, партнерского 54, Президиума РАН 4.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дядьков П.Г., М.М. Мандельбаум, Татьков Г. И. и др. Особенности развития сейсмотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика, 1999, т. 40, №3, с. 346 – 359.

2. Кулешов Д.А., Дядьков П.Г. Проблемы и методы учёта вековой вариации при проведении геомагнитных наблюдений и съемок в Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. мат. в 3 томах (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2.- С. 171-175.

© П. Г. Дядьков, А. А. Дучкова, Д. А. Кулешов, А. В. Левичева, Д. М. Павлова, 2014

АНОМАЛИЯ ВЕКОВОГО ХОДА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО БАЙКАЛА В ПЕРИОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ 2008–2011 гг.

Петр Георгиевич Дядьков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, З, зав. лабораторий естественных геофизических полей ИНГГ СО РАН, доцент кафедры геофизики геологогеофизического факультета Новосибирского государственного университета, кандидат геологого-минералогических наук, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Александрович Кулешов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант ИНГГ СО РАН, тел. (383)333-29-05, e-mail: KuleshovDA@ipgg.sbras

Александра Аглямовна Дучкова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского Отделения Российской Академии наук (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, тел. (383)333-03-99, e-mail: IbatullinaAA@ipgg.sbras.ru.

Анализ результатов ежегодных магнитных наблюдений на пунктах Байкальской тектономагнитной сети позволил выделить аномалию векового хода геомагнитного поля на восточном побережье оз. Байкал. Учет вековой вариации производился с использованием модели IGRF-11. Пространственная неоднородность выявленной аномалии на масштабах ~ 25 - 50 км и временах ~ 1 – 3 года может указывать на ее тектономагнитную природу и возможную связь с сейсмической активизацией 2008 – 2011 гг. в районе Байкальской впадины.

Ключевые слова: тектономагнитный мониторинг, вековая вариация геомагнитного поля, землетрясения, Байкальская рифтовая система.

THE ANOMALY OF SECULAR MAGNETIC VARIATION IN THE CENTRAL PART OF BAIKAL REGION DURING THE 2008–2011 SEISMIC ACTIVITY PERIOD

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyuga 3, head of laboratory of natural geophysical fields, docent of geophysics department of Novosibirsk State University, Ph.D., tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Kuleshov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug 3, postgraduate IPGG SB RAS, tel. (383)333-29-05, e-mail: KuleshovDA@ipgg.sbras.ru

Alexandra A. Duchkova

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, ave. Academician Koptyug 3, postgraduate IPGG SB RAS, tel. (383)333-29-05, e-mail: Ibatulli-naAA@ipgg.sbras.ru

Magnetic anomaly for the 2008-2011 was found on the Baikal eastern coast on the base of annual magnetic observations data from the Baikal tectonomagnetic network. Secular variation was took account by the IGRF-11 model. Spatial inhomogeneity of the found anomaly for scale ~ 25-50 km and time interval ~ 1-3 years can point to its tectonomagnetic nature and to the possible interrelation with the 2008-2011 seismic activity period in the Baikal depression region.

Key words: tectonomagnetic monitoring, secular geomagnetic variation, strong earthquake, Baikal rift system.

На сети пунктов Байкальского геодинамического полигона выполняются регулярные ежегодные наблюдения модуля вектора геомагнитной индукции с целью выявления и изучения тектономагнитных аномалий, источниками которых являются геодинамические и сейсмические процессы [1].

В данной работе рассматриваются результаты наблюдений на пунктах региональной тектономагнитной сети вдоль условного профиля, простирающегося по восточному побережью оз. Байкал в северо-восточном направлении от стационарного пункта Энхалук (район залива Провал близ дельты р. Селенги) до пункта 3а МК, который расположен рядом с полуостровом Святой Нос в Баргузинском заливе (рис. 1). Соседние пункты расположены на расстоянии 20-30 км друг от друга, расстояние между стационарным пунктом Энхалук и ближайшим к нему пунктом Черемушка составляет 80 км.

В качестве базового пункта, относительно которого рассматривались как изменения модуля вектора геомагнитной индукции, так и вековой вариации, использовался стационарный пункт Энхалук, на котором в непрерывном режиме производится регистрация модуля и компонент вектора геомагнитной индукции. Аппаратурная точность наблюдений, выполняемых как на рядовых, так и на базовом пунктах с помощью протонных магнитометров и магнитовариационных станций, как правило, составляет 0.1 - 0.2 нТл.

При выделении тектономагнитных аномалий необходимо учитывать различные типы геомагнитных вариаций, в том числе и вековую. В работе [2] получены оценки точности учета вековой вариации с использованием модели IGRF-11(International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation) [3] для территории Сибири. Таким образом, мы можем воспользоваться данной моделью для исключения вековой вариации на Байкальском геодинамическом полигоне. Расчет этой вариации для каждого из пунктов региональной сети производился по модели IGRF-11 с использованием интернет ресурса [4].

Результаты выполненных наблюдений и расчетов вековой вариации по модели IGRF-11показаны на рис. 2А и 2В. На рис. 2С представлены изменения модуля вектора геомагнитной индукции за вычетом вековой вариации.



Рис. 1. Схема пунктов региональной сети тектономагнитных наблюдений н а Байкальском геодинамическом полигоне (кружки), эпицентры землетрясений с магнитудой M = 2 и более (белые точки) за период 2006-2012 гг. Звездочками обозначены эпицентры сильных землетрясений: 20 мая 2008 г. с M=5.6 близ мыса Горевой и Туркинское землетрясение 16 июля 2011 года с M=5.7

Анализ результатов на рис. 2 позволяет отметить следующие особенности поведения магнитного поля в пунктах Черемушка, Горячинск, Горевой утес, Духовое и 3а МК:

1. Наличие положительной бухты интенсивностью от 3 до 7 нТл на всех рассматриваемых пунктах.

2. Подобие характера изменений поля на северной группе пунктов (Духовое, Горевой Утес, и, в какой-то мере, 3а МК).

3. Существенное отличие (от 2 до 6 нТл) характера изменений во времени магнитного поля на соседних, близких по расстоянию (~ 25 км) пунктах Горячинск и Горевой Утес.

4. Тенденция пространственного продвижения со временем положительного экстремума бухты от группы северных пунктов (2008-2009 гг) к южным (2009-2011 гг).

Анализируя приведенные выше характерные особенности в изменениях магнитного поля, можно сделать следующие выводы:

- несмотря на возможность недоучета моделью IGRF-11 реальной вековой вариации, наблюдаемая пространственная неоднородность изменений магнитного поля на относительно малых масштабах ~ 25-50 км (например, между пунктами Горевой Утес и Горячинск) указывает на тектономагнитный характер зарегистрированных аномальных изменений;

- однотипность поведения поля на пунктах Духовое и Горевой Утес может быть обусловлена сходными геодинамическими условиями в пределах единой консолидированной структуры в земной коре, сложившейся на этот период времени в районе расположения этих пунктов;

результаты сравнения изменений в магнитном поле с сейсмической активностью указывают на тенденцию пространственной и временной приуроченности сильных землетрясений к положительному экстремуму бухты (рис. 2С): в 2008 г. сильное землетрясение случилось у пункта Горевой Утес, а в 2011 г. – в районе пунктов Горячинск и Черемушка.





Рис. 2. Изменение модуля вектора индукции геомагнитного поля на пунктах региональной тектономагнитной сети Байкальского геодинамического

полигона (рис. 1) относительно пункта Энхалук за период с 2006 по 2012 гг.: А - по данным тектономагнитного мониторинга, В - по данным модели IGRF– 11, С – изменение магнитного поля после учета вековой вариации (из данных на рис. 2А вычтены значения, показанные на рис. 2В). Отмеченные корреляции требуют дальнейшего экспериментального подтверждения, прежде чем они будут рассматриваться в качестве закономерностей взаимосвязи аномалий векового хода и сейсмических активизаций для этого региона.

Отдельные разделы данного исследования поддержаны проектами ПФНИ VIII.70.2.3, ОНЗ 7.1, Президиума РАН 4.1, МИП 96.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дядьков П.Г., М.М. Мандельбаум, Татьков Г. И. и др. Особенности развития сейсмотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика, 1999, т. 40, №3, с. 346 – 359.

2. Кулешов Д.А., Дядьков П.Г. Проблемы и методы учёта вековой вариации при проведении геомагнитных наблюдений и съемок в Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. мат. в 3 томах (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2.- С. 171-175.

3. Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D., Bondar T.N. *et al.* International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // Geophys.J. Int. (2010) 183, 1216 – 1230.

4. British geological survey. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.geomag.bgs.ac.uk /data_service/data/annual_means.shtml.

© П. Г. Дядьков, Д. А. Кулешов, А. А. Дучкова, 2014

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ И ОБЪЕМНЫХ ДОЛЕЙ КОМПОНЕНТ СРЕДЫ, НАСЫЩЕННОЙ ВОДОНЕФТЯНОЙ СМЕСЬЮ

Тимофей Игоревич Ельцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Коптюга, 3, магистр геологии, аспирант, тел. +7952-903-89-90, e-mail: tim.eltsov@gmail.com

Виталий Николаевич Доровский

Baker Hughes, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физикоматематических наук, технический советник, тел. (383)332-94-43, e-mail: vitaly.dorovsky@bakerhughes.com

Представляется принципиально новая схема определения водонефтяного соотношения в пористой насыщенной среде посредством диэлектрической спектроскопии. По анализу экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости устанавливается, что в водонасыщенных средах, диэлектрический спектр килогерцового и мегагерцового диапазона имеет вид характерной симметричной кривой, симметрия которой нарушается с введением в рассматриваемую среду нефти. Характер симметрии, мера нарушения, а также физические механизмы поляризации, позволяют определить пористость и водонефтяное соотношение.

Ключевые слова: диэлектрический спектр, килогерцовый диапазон, пористая среда

DETERMINATION OF VOLUME FRACTIONS OF SYSTEM SATURATED WITH OIL WATER MIXTURE

Timofey I. Eltsov

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Kaptuga str., 3, MSc in geology, Ph. D. student, tel. +7952-903-89-90 e-mail: tim.eltsov@gmail.com

Vitaly N. Dorovsky

Baker Hughes, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze str., 4a, Ph. D., Technical Adviser, tel. (383)332-94-43, e-mail: vitaly.dorovsky@bakerhughes.com

A novel procedure of finding the water-oil ratio in a saturated porous medium by means of dielectric spectroscopy is presented. Based on the study of experimental measurements of complex permittivity, it has been established that the dielectric spectrum in the kHz and MHz frequency range in a porous medium saturated with fresh water is a characteristic symmetrical curve whose symmetry may be distorted when oil is introduced into the system. The type of symmetry, degree of distortion, and corresponding physical mechanisms of polarization enable one to find the water-oil ratio.

Key words: dielectric spectra, kHz domain, porous medium.

Определение водонефтяного соотношения в пористом насыщенном коллекторе методом скважинного электромагнитного зондирования затрагивает самый широкий круг вопросов диэлектрической спектроскопии. Решение проблемы связано, прежде всего, с возможностью отображения диэлектрических спектров скважинным индукционным электромагнитным зондом (см, например, [Глинских и др., 2013], [Hizem, et. al.,2008]), идентификацией составляющих компонент пористого насыщенного коллектора по диэлектрическим спектрам (см, например, [Ревизский, 2002]), также возможностью определения водонефтяного соотношения по основным релаксационным характеристикам диэлектрических спектров [Hizem et. al., 2008], [Seleznev, et. al., 2004]).

Для определения пористости, процентного соотношения воды и нефти в коллекторе методом диэлектрической спектроскопии часто привлекают ту, либо иную формулу смешения, выражающую комплексное значение диэлектрической проницаемости через комплексные значения диэлектрической проницаемости подсистем. При этом, исследования, как правило, затрагивают вопрос о соответствии экспериментальным данным той, либо иной формулы смешения [Seleznev, et. al., 2004]. Проводя измерения диэлектрического спектра в области частот электромагнитного поля, в которой заведомо выполняется поляризация Максвелла-Вагнера, можно получить выражения релаксационных поляризационных характеристик композиционной среды через проводимости и диэлектрические проницаемости подсистем [Духин, Шилов, 1972]. Релаксационные характеристики Максвелл-Вагнеровской поляризации для пористых водонасыщенных систем, реально могут находиться вне области выполнения самой поляризации и, как следствие, вне справедливости той либо иной формулы «смешения», а число релаксационных параметров пористой насыщенной среды, как правило, меньше числа диэлектрических степеней свободы подсистем. Подобного рода проблемы заставляют обратиться к поиску альтернативных методов вычисления объемных долей присутствующих подсистем, а также, пористости формации. В настоящей статье обсуждается попытка ответить на вопрос о возможности измерения пористости формации, насыщенной водонефтяной смесью, а также водонефтяного соотношения, по спектру диэлектрической проницаемости, не привлекая формулы смешения.

Поляризационная кривая Гаврильяка-Негами позволяет получить, в качестве следствия, формулу, связывающую степени поляризации α, β с поляризационными характеристиками кривой Коул-Коула [Деревянко, Куриленко, 1971]

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{[1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}]^{\beta}}$$
(1)

$$\frac{2\varepsilon''_{max}}{\Delta\varepsilon} = tg\left(\frac{1-\alpha}{4}\pi\right) \cdot \chi(\beta), \quad \chi(\beta) = 2\left[\sin\frac{\beta\pi}{2(1+\beta)}\right]^{1+\beta}$$
(2)

В формулах (1) и (2): ε - комплексное значение диэлектрической проницаемости, ε_{∞} - высокочастотный предел реальной части диэлектрической проницаемости, ε_0 - значение диэлектрической проницаемости при $\omega=0$, τ характерное время релаксации.

Параметр β изменяется, в общем случае, в интервале [0, 1], значение β =1 соответствует ситуации без нефти. Параметр, α также, меняется в интервале

[0, 1], но значению α =0 соответствует ситуация с 100% нефтенасыщением. Последнюю формулу разрешим относительно поляризационного параметра α (рис. 1) и обратим внимание на важный экспериментальный факт. На рис. 2 [Левицкая, Пальвелева, 1990] представлены две поляризационные кривые образца песчаника: одна кривая соответствует водонасыщенному песчанику, вторая кривая, соответствует песчанику, насыщенному водой и трансформаторным маслом (54% -масло, 46% -вода, пористость 14.1%).

$$\alpha = 1 - \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{2\varepsilon''_{max} / \Delta\varepsilon}{\chi(\beta)} \right]$$
(3)



Рис. 1. График формулы (3) для двух значений $\nu = 2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon$



Рис. 2. Поляризационная кривая образца песчаника, насыщенного минерализованной водой(β=1, Δε=154.5, ε"_{max} =61.2), и образца песчаника насыщенного минерализованной водой с трансформаторным маслом (β=0.718, Δε=124.5, ε"_{max} =50.8)

кривых Для имеем то двух этих одно же значение И ра $2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon = 0.8$, как это следует из зависимости на рис.2, а также данных работы [Левицкая, Пальвелева, 1990]. Можно утверждать, что величина $2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon$ является характеристикой порового пространства, насыщенного водой. При этом, параметр В можно интерпретировать, как параметр характеризующий содержание нефти. Всякому значению в, отличному от единицы, соответствует значение $\alpha_{v}(\beta)$ определяемому согласно (3). Справедливо утверждение: при всяком заданном значении $2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon$ параметр, характеризующий нефтенасыщенность β, как следует из рис.1, может меняться только в пределах значений из интервала [β_* , 1] при этом значение $\beta=1$ соответствует отсутствию нефти. Значение β=β∗ соответствует 100% нефтенасыщению. Одновременно с этим, поляризационный параметр α будет меняться в пределах значений [0, α_*]. Значения величин α_* , β_* при фиксированном отношении $2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon$ будет определяться из уравнений

$$\chi(\beta) = \nu \tag{4}$$

$$\alpha_* = 1 - \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \nu \tag{5}$$

Очевидно, между значениями α_* , β_* существует связь

$$\chi(\beta_*) = tg \frac{1 - \alpha_*}{4}\pi \tag{6}$$

Так как при $\beta=1$ нефти в порах нет, понятно, что α_* определяет предельное водонасыщение или пористость. При v=0,8, согласно диэлектрическому спектру образца песчаника [Левицкая, Пальвелева 1990], насыщенного водой, а также песчаника насыщенного водой и трансформаторным маслом, предельное насыщение водой, по формуле (5) составляет 14 %. С другой стороны, по данным Левицкой, измерившей пористость для этих образцов, получается значение пористости 14.1%.Совпадение в пределах ошибки измерений полное. Для доломита [Левицкая, 1984]имеем значение $2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon = 0,74$, предельное насыщение, согласно формуле (5) дает значение $\approx 18\%$. Эксперимент дает значение 16,9%. Это означает, что пористость *K* в процентном содержании можно вычислить согласно простой формуле

$$K = \alpha_* \cdot 100\% \tag{7}$$

Таким образом, можно предложить технологию определения пористости пласта в скважинных условиях по спектру диэлектрической проницаемости. Располагая характеристиками диэлектрического спектра, вычисляем величину $v = v_0 = 2\varepsilon''_{max}/\Delta\varepsilon$. Для этого надо знать степень поляризации $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}$, а также, максимальное значение мнимой части диэлектрической проницаемости

 ε''_{max} . После чего, формулой (3) определяется связь для данной формации параметров водо и нефти насыщенности, т.е. выбирается кривая из семейства $\alpha_v(\beta)$, характеризующая рассматриваемую формацию при заданном значении $\nu = \nu_0$. Предельное значение $\alpha_* = \alpha_{\nu_0}(\beta = 1)$ определяет состояние для этой среды, когда в порах находится только вода. При этом значение пористости определяем согласно формуле (7).

Процентное содержание воды в поровом пространстве можно определить согласно формуле

$$K_W = \frac{\alpha}{\alpha_*} \cdot 100\%$$

Процентное содержание нефти, в этом случае, можно представить формулой:

$$K_{Oil} = \left[1 - \frac{\alpha(\beta)}{\alpha_*(\beta_*)}\right] \cdot 100\%$$

В результате работы показано, что в акустическом диапазоне электромагнитного поля, в условиях скважинной диэлектрической спектроскопии может быть введен качественный критерий, позволяющий различить водонасыщенные коллекторы от коллекторов насыщенных водой и нефтью: диэлектрические спектры водонасыщенных коллекторов характеризуются поляризационной кривой Коул-Коула, диэлектрические спектры водо-нефте насыщенных коллекторов характеризуются поляризационными кривыми Гаврильяка-Негами. На основании этого критерия и основных свойств поляризационных характеристик Гаврильяка-Негами предлагается принципиально новый метод определения пористости и водонефтяного соотношения. Предлагаемый метод является альтернативным методом (по отношению к методу, использующему формулы смешения) измерения пористости и водонефтяного соотношения для пористых формаций, насыщенных водонефтяной смесью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в пластах конечной мощности, вскрытых на биополимерных и нефтяных буровых растворах // Геология и Геофизика, 2013, № 11, с. 1803-1813.

2. Деревянко А.И., Куриленко О.Д. Анализ диэлектрической релаксации в плоскости комплексной диэлектрической проницаемости // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Киев.Наукова думка, 1971, в.2, с.141-147.

3. Духин, С. С., Шилов В. Н.Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах, Киев: Наукова думка, 1972, 206 с.

4. Левицкая, Ц. М.Диэлектрическая релаксация в горных породах // Физика Земли (Известия АН СССР) 10 (1984): 82-87.

5. Левицкая, Ц. М., Пальвелева И. И.Влияние углеводородов на диэлектрический спектр песчаников // Физика Земли, 1990, (Известия АН СССР) 6: 106-110.
6. Ревизский, Ю. В., Дыбленко В. П. Исследование и обоснование механизма нефтеотдачи пластов с применением физических методов, М. : ООО Недра-Бизнесцентр, 2002, 317 с.

7. Hanai T. Kolloid. Z.1961, 171, 23.

8. Hizem M., Budan H., Deville B., Faiver O., Mosse L., Simon M.DielectricDispersion: A new wirelinePetrophysical Measurement // SPE 116130 (2008).

9. Seleznev N., Boyd A., Habashy T.,LuthiS.M. Dielectric mixing laws for fully and partially saturated carbonate rocks // SPWLA45th Annual Logging Symposium, June 6-9, 2004.

© Т. И. Ельцов, В. Н. Доровский, 2014

ТУВИНСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 27.12.2011 Г. (ML=6.7) И 26.02.2012 Г. (ML=6.8). РАЗВИТИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ АКТИВИЗАЦИИ

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Алексей Александрович Еманов

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.nsc.ru

Екатерина Викторовна Лескова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-60-14, e-mail: katya@gs.nsc.ru

Александр Владимирович Фатеев

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-52-66, е-mail: fateev@gs.nsc.ru

Валентина Григорьевна Подкорытова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-16-37, podk@gs.nsc.ru

Рассматриваются Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. с ML = 6.7 и 26.02.2012 г. с ML = 6.8, произошедшие на Каахемском разломе в хребте Академика Обручева. Эпицентральная зона этих землетрясений за почти полувековой период инструментальных сейсмологических наблюдений была асейсмичной. Исследование выполнено на основе сейсмологических данных региональной сети станций Алтае-Саянского региона и временных станций, установленных в эпицентральной области в промежутке между Тувинским-I и Тувинским-II землетрясениями.

Ключевые слова: Тувинские землетрясения, Каахемский разлом, эпицентральные наблюдения.

TUVA EARTHQUAKES 27.12.2011 (ML=6.7) AND 26.02.2012 (ML=6.8). THE DEVELOPMENT OF AN INTERRELATED ACTIVATION

Alexandr F. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, Ph. D., director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Alexey A. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, Ph. D., laboratory head; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher, tel. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.nsc.ru

Ekaterina V. Leskova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, researcher, tel. (383)330-60-14, e-mail: katya@gs.nsc.ru

Alexander V. Fateev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior engineer, tel. (383)330-52-66, e-mail: fateev@gs.nsc.ru

Valentina G. Podkorytova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, researcher, tel. (383)333-16-37, podk@gs.nsc.ru

Tuva earthquakes 27.12.2011, ML = 6.7 and 26.02.2012, ML = 6.8 occurred on the Kaahem fault in the Academician Obruchev ridge are considered. The epicental area of these earthquakes was aseismic during the period of instrumental observations (last 50 years). In our investigation we used seismological data of Altay-Sayan regional seismic network and temporary stations installed in epicental area between the Tuva-I and Tuva-II earthquakes.

Key words: Tuva earthquakes, Kaahem fault, epicentral observations.

27 декабря 2011 г. в 15 ч. 21 мин. по UTC на территории Республики Тыва в районе хребта Академика Обручева в 94 километрах к северо-востоку от г. Кызыла произошло землетрясение с магнитудой ML = 6.7 (Ms = 6.5 по IDC; координаты эпицентра: 51.82° с.ш., 95.93° в.д., глубина гипоцентра 17 км). Его эпицентр находился в районе хребта Час-Тайга, вдоль которого протянулся Каахемский разлом.

Спустя два месяца, 26 февраля 2012 г. в 06 ч. 17 мин. по UTC на южном окончании афтершоковой области, сформировавшейся после декабрьского землетрясения, произошло новое сильное землетрясение с магнитудой ML = 6.8 (Ms = 6.5 по IDC; координаты эпицентра 51.74° с.ш., 95.99° в.д., глубина гипоцентра 9 км), изменившее как энергетические, так и пространственные характеристики общего афтершокового процесса для данной пары крупнейших землетрясений.

Данные сейсмические события получили названия «Тувинское-I» и «Тувинское-II» соответственно. Афтершоковые процессы двух крупнейших землетрясений перекрывают друг друга в пространстве и времени, что указывает на единство тектонического процесса для них.

Результаты предварительного исследования были сформулированы в работе [1], где ведущая роль в создании критического напряжённого состояния в эпицентральной зоне Тувинских землетрясений 2011-2012 гг. отдается процессу медленного выдавливания клинообразного хребта Ыдык с юга на север. В данной работе представлены результаты обработки данных временной сети из шести станций, действовавшей в эпицентральной области Тувинских землетрясений с 9 февраля по 15 марта 2012 г. [2].

На рис. 1 представлены карты эпицентров (а-г) и плотности событий (д-з) в эпицентральной области Тувинских землетрясений для разных временных интервалов. Карты на рис. 1а и 1д соответствуют длительному периоду за афтершоками (около двух лет) с магнитудой более трёх. Полученная картина более всего соответствуют модели сейсмического процесса, описанной в работе [1], объясняющей роль выдвижения к северу блока хребта Ыдык в создании напряжённого состояния и протекании сейсмического процесса в эпицентральной зоне.

Как видно из рис. 16, 1е в период между Тувинскими землетрясениями афтершоковый процесс развивался вдоль линейной зоны по Каахемскому разлому. После Тувинского-II землетрясения, как следует из рис. 1в, 1ж, развитие определяется разветвляющейся структурой Каахемского разлома [3] и представляет из себя расширенный участок афтершокового процесса. На карте эпицентров землетрясений (рис. 1в) мы видим двойственность облака афтершоков с одним направлением вдоль Каахемского разлома и другим, уходящим в сторону на юго-восток вместе с хребтом Час-Тайга, из чего создаётся впечатление, что мы имеем дело с вполне равнозначным развитием афтершокового процесса в двух отмеченных направлениях. Но карта плотности событий для этого же интервала времени (рис. 1ж) показывает ярко выраженное направление развития афтершокового процесса вдоль хребта Час-Тайга. Данное доминирование выявлено по большому количеству землетрясений малых энергий.

Для периода после окончания работы временной сети, распределение наиболее сильных афтершоков в пределах структуры Каахемского разлома (рис. 1г) и карта их плотности (рис. 1з) напоминают аналогичную для всего двухлетнего периода наблюдений, построенную по крупным землетрясениям (рис. 1а, 1д), но с меньшей контрастностью.

Надёжное определение глубин землетрясений возможно для периода работы сети временных станций. На рис. 2 представлены разрезы по глубине по линии вдоль активизации и простирания Каахемского разлома (линия А-В на рис. 16 и 1в) для событий до Тувинского-II землетрясения с 9 по 26 февраля (рис. 2а) и после него с 26 февраля по 14 марта (рис. 2б). Ясно, что рис. 2а характеризует разрез структуры афтершокового процесса перед Тувинским-II землетрясением, а не структуру афтершокового процесса после Тувинского-I землетрясения.



Рис. 1. Карты эпицентров (а-г) и плотности событий (д-з) в эпицентральной области Тувинских землетрясений



Рис. 2. Распределение афтершоков, зарегистрированных временной сетью станций, с глубиной по линии вдоль активизации:

а) До Тувинского-II (период 9 февраля – 26 февраля 06h16m), б) после Тувинского-II (период 26 февраля 06h17m – 14 марта). Звездочками показаны гипоцентры Тувинского-I (красный цвет) и Тувинского-II (синий цвет) землетрясений

В соответствии с рис. 1е, к северу от эпицентра Тувинского-I землетрясения наблюдалась наибольшая афтершоковая активность, а на разрезе рис. 2а зафиксированы только остатки этой активности в виде вытянутой от очага к дневной поверхности наклонной полосы, заполненной гипоцентрами событий. Наибольшее число событий перед Тувинским-II землетрясением происходит на двух участках: один накрывает эпицентр главного события афтершоками на глубинах от 10 до 17 км, а другой представлен полосой в разрезе на глубинах до 10 км с медленным уменьшением глубин афтершоков к югу (рис. 2а).

Другая особенность, которую можно отметить из рис. 2, это то, что до Тувинского-II землетрясения основная масса событий происходит до глубин 20 км, а после него – до глубин 30 км, в то время как Тувинское-II землетрясение имеет меньшую глубину (9 км), чем Тувинское-I (17 км).

Тувинское-II землетрясение (рис. 26) в значительной степени изменило пространственную структуру афтершокового процесса. Во-первых, очаг февральского землетрясения произошел за краем наиболее активного участка афтершоков декабрьского события; во-вторых, очаг Тувинского-I землетрясения локализуется с краю от наиболее активизированной области после Тувинского-II землетрясения, в-третьих, полоса (в разрезе) событий с глубинами менее десяти км ослабла с севера и продвинулась к югу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Масальский О.К., Лебедев В.И. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. с М=6.6 и 26.02.2012 г. с М=6.7 // Землетрясения России в 2011 году. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С.88-93.

2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса // Землетрясения России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – в печати.

3. Аржанников С.Г. Основные активные разломы, кинематика и сильные палеоземлетрясения восточной части Алтае-Саянской горной области// Напряжённо-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал "Гео", 2003.-С.241-244

© А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, Е. В. Лескова, А. В. Фатеев, В. Г. Подкорытова, 2014

КРУПНЕЙШИЙ ТЕХНОГЕННЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НА ЗЕМЛЕ. БАЧАТСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 18.06.2013 Г. (ML=6.1, КУЗБАСС)

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Алексей Александрович Еманов

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.nsc.ru

Александр Владимирович Фатеев

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-52-66, е-mail: fateev@gs.nsc.ru

Екатерина Викторовна Лескова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник; Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-60-14, е-mail: katya@gs.nsc.ru

Елена Викторовна Шевкунова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-16-37, e-mail: elsh@ngs.ru

Валентина Григорьевна Подкорытова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-16-37, podk@gs.nsc.ru

Представлены данные о крупнейшем техногенном землетрясении при добыче твёрдых полезных ископаемых на Земле – Бачатском землетрясении с ML = 6.1, произошедшем 18 июня 2013 г. в Кузбассе. Сейсмическая активизация в районе разреза «Бачатский» в 2012-2013 гг. трижды сопровождалась крупными землетрясениями, создавшими ощутимые воздействия на населенные пункты Кузбасса. В статье анализируются материалы экспериментов с временными сейсмологических станций в 2012 г. и при регистрации афтершокового процесса Бачатского землетрясения в 2013 г.

Ключевые слова: техногенная сейсмичность, Бачатское землетрясение, углеразрез «Бачатский», сеть временных станций, эпицентральные наблюдения.

THE LARGEST MAN-CAUSED SEISMIC PROCESS ON THE EARTH. BACHATSKOE EARTHQUAKE 18.06.2013 (ML=6.1, KUZBASS)

Alexandr F. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, Ph. D., director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Alexey A. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, Ph. D., laboratory head; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher, tel. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.nsc.ru

Alexander V. Fateev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior engineer, tel. (383)330-52-66, e-mail: fateev@gs.nsc.ru

Ekaterina V. Leskova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, senior researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, researcher, tel. (383)330-60-14, e-mail: katya@gs.nsc.ru

Elena V. Shevkunova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, researcher, tel. (383)333-16-37, e-mail: elsh@ngs.ru

Valentina G. Podkorytova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Ak. Koptuga, 3, researcher, tel. (383)333-16-37, podk@gs.nsc.ru

Data on the largest man-caused earthquake through the extraction of solid minerals on the Earth - Bachatskoe earthquake (ML = 6.1), which took place on 18 June 2013 in Kuzbass are presented. Seismic activity in the area of a coal cut «Bachatskij» was accompanied three times in 2012-2013 by major earthquakes created appreciable impact on the locality of Kuzbass. In the article it is analysed the experiments with temporary networks of seismic stations in 2012 and at registration of aftershocks Bachatskoe earthquake in 2013.

Key words: man-caused seismicity, Bachatskoe earthquake, coal cut «Bachatskij», temporary networks of seismic stations, epicentral observations.

Углеразрез «Бачатский», заложенный в 1948 году, является одним из крупнейших в Кузбассе: его размеры достигают 10 км в длину, 2.2 км в ширину и 320 м в глубину. Угледобыча составляет более 9 млн. тонн угля в год (по данным на 2008 г.).

18 июня 2013 г. в 23:02 по UTC (19 июня в 06:02 местного времени) произошло землетрясение (MLh = 6.1, mb = 5.5), эпицентр которого (54.29° с.ш., 86.17° в.д., глубина 4 км) был приурочен к борту углеразреза «Бачатский». По названию разреза сейсмособытие было названо Бачатским. Бачатское землетрясение является крупнейшим на сегодняшний момент техногенным землетрясением в истории Земли.

Выполненные макросейсмические обследования, проведенные в эпицентральной области отрядом сотрудников АСФ ГС СО РАН, показали, что землетрясение ощущалось на значительной территории: в ближайших к эпицентру посёлках сотрясаемость достигла семи баллов, были разрушения зданий; в пятибалльную зону попали некоторые города Кузбасса (Ленинск-Кузнецкий, Полысаево и др.), ощущалось землетрясение и за пределами Кемеровской области (Новосибирск – 4 балла, Кемерово – 3 балла, Тайга – 2 балла) [1].

За полтора года до Бачатского землетрясения в районе углеразреза «Бачаткий» проводились исследования существования наведённой сейсмичности, основанием для которых послужило сейсмическое событие с ML = 4.3, произошедшее 9 февраля 2012 г. в 13:24 по UTC (в 20:24 местного времени) с координатами эпицентра (54.28° с.ш., 86.15° в.д.), попадающими на борт этого разреза [1]. Данное событие также породило ощутимые колебания в большинстве городов Кемеровской области и вызвало сильный общественный резонанс и расследование властей и сотрудников МЧС на предмет взрывной природы этого события. За период работы временной сети из 25 сейсмических станций (2 марта – 14 мая 2012 г.) было зарегистрировано около 120 сейсмических событий в районе углеразреза, треть из которых, согласно актам взрывных работ, не являлась промышленными взрывами. На основании совпадения сейсмособытий с районом активной добычи полезных ископаемых и графика их распределения в зависимости от времени суток был установлен техногенный характер исследуемых активизаций [1].

Помимо отмеченных сильных событий, в 2012–2013 гг. в районе разреза «Бачатский» происходили ощутимые землетрясения, наиболее крупное из которых 4 мая 2013 г. 17:30 (UTC) имело локальную магнитуду ML = 3.9.

Таким образом, сейсмические активизации постоянно регистрируются в районе разреза в виде непрерывно протекающего процесса с событиями малых энергий и кратковременных мощных активизаций, самым сильным из которых стало Бачатское землетрясение 2013 г.

Временная сеть из десяти автономных сейсмостанций для регистрации афтершоков Бачатского землетрясения, установленная в первый же день после главного события в окрестности разреза, позволила зарегистрировать мощный афтершоковый процесс: за период 19 июня – 8 октября 2013 г. рассчитаны гипоцентры 956 землетрясений в диапазоне магнитуд $0 \le ML \le 4.2$. В первые дни после главного события происходило 30-70 землетрясений ежедневно, а через полтора месяца уровень активности спал до единиц в день. Тем не менее, афтершоковый процесс на уровне умеренных землетрясений продолжается. Так за период октябрь – декабрь 2013 г. стационарной сетью Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН зарегистрировано до нескольких ощутимых событий в месяц с магнитудой более двух, одно из сильных землетрясений произошло 21 октября 2013 г. в 17:24 по UTC с ML = 3.2.

На рис. 1 представлена карта эпицентров афтершоков Бачатского землетрясения. Афтершоки распределились в пределах разреза, но также отмечаются и отдельные события вне его. При этом мелкие землетрясения, главным образом, локализуются в центральной части разреза, в то время как наиболее крупные – около его бортов. На южном окончании разреза облако эпицентров раздваивается, выходя за границы выработки (рис. 1).



Рис. 1. Карта эпицентров афтершоков Бачатского землетрясения за период 18 июня – 8 октября 2013 г.

Рассчитанный механизм очага Бачатского землетрясения (рис. 1) представляет собой практически чистый взброс; нодальные плоскости, одна из которых является плоскостью разрыва, расположены вдоль простирания разреза, что может быть одним из доказательств техногенной природы этого землетрясения. Для большей части событий рассчитана глубина с приемлемой точностью – ошибка локации составляет менее 1 км. На вертикальном разрезе по линии AB (см. рис. 1) видно, что очаги концентрируются, главным образом, на глубине около 4 км (рис. 2).



Рис. 2. Вертикальный разрез вдоль линии АВ (см. рис. 1) для гипоцентров афтершоков Бачатского землетрясения

Кузнецкая котловина по геотектоническим представлениям является напряжённым блоком, более прочным, чем горные хребты, окружающие впадину. Для котловины, как и для всех структур Алтае-Саянской горной области характерно развитие сейсмического процесса в горном обрамлении впадин. За счёт мощного техногенного воздействия на земную кору в районе разреза «Бачатский» создана ослабленная зона, в которой инициируется процесс наведённой сейсмичности. Более ранними экспериментами с временными сетями станций наведённая сейсмичность была обнаружена в районе шахт при добыче угля лавами [2-4], а в данном случае зафиксирована крупнейшая сейсмическая активизация в районе открытой горной выработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса // Землетрясения России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – в печати.

2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Сёмин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т.12, №1. – С.37-43.

3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Манушина О.А., Демидова А.А., Ворона У.И., Смоглюк А.С. Наблюдения с временными сетями: Экспериментальные исследования триггерных эффектов в развитии наведенной сейсмичности в Кузбассе // Землетрясения России в 2009 году. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С.92-102.

4. Опарин В.Н., Еманов А.Ф., Востриков В.И., Цибизов Л.В. О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 4. – С.3-22.

© А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев, Е. В. Лескова, Е. В. Шевкунова, В. Г. Подкорытова, 2014

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК И РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аркадий Владимирович Злобинский

«Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, д. 26/1, оф. 56, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (903)935-22-87, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Владимир Сергеевич Могилатов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, ФГБУН, 630090, Новосибирск, просп. Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru

Роман Алексеевич Шишмарев

"Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие (НИГП) АК «АЛРОСА» (ОАО)", 678174, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Чернышевское шоссе, 16, заместитель заведующего отделом опытно-методических геолого-геофизических исследований (ООМГГИ), тел. +7(411-36)-9-10-29, e-mail: ShishmarevRA@alrosa.ru

В докладе обсуждается опыт применения площадной импульсной электроразведки с фиксированным источником электромагнитного поля – круговым электрическим диполем для изучения рудных объектов и кимберлитовых трубок. В работах на рудных объектах площадной сигнал ЗВТ-М хорошо описывается влиянием локального проводника. Измерения различных компонент электромагнитного поля хорошо дополняют друг друга. Имеющиеся у нас средства трехмерного (по проводимости) моделирования позволяют качественно и количественно объяснить результаты измерений.

Ключевые слова: переходные процессы, электроразведка, поиски руды.

USING VERTICAL ELECTRIC CURRENT SOUNDING FOR KIMBERLITE PIPE AND ORE SURVEYS

Arkadiy V. Zlobinskiy

«STC ZaVeT-GEO», 630102, Russia, Novosibirsk, 26/1 Voskhod st. of. 56, PhD in techn, General Manager, tel. (903)935-22-87, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Vladimir S. Mogilatov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp. PhD in techn, professor of geophysics Novosibirsk State University principal scientist officer, Laboratory of geoelectrics, tel. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru

Roman A. Shishmarev.

"Specialised Geo-Scientific Research Interprise (NIGP) OJSC «ALROSA», 678174, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, 16 Chernyshevskoe shosse, Assistant manager department of geophysical research, tel. +7(411-36)-9-10-29, ShishmarevRA@alrosa.ru

Field work by the Vertical Electric Current Soundings (VECS) showed the possibility of detection and delineation of ore and kimberlite pipe deposits. In ore-targeted works VECS areal signal is well described by the influence of a local conductor.

Key words: electrical prospecting, VECS, TEM, kimberlite pipe surveys, ore surveys.

Физические предпосылки

Традиционно при работах методами электроразведки в качестве источника электромагнитного поля используют незаземленную петлю или заземленную электрическую линию. Незаземленная петля, заземленная линия и круговой электрический диполь возбуждают совершенно разные системы электрических токов в изучаемой среде. Знаменитое «токовое кольцо» (Nabighian, 1979), возбуждаемое петлей, образуется только горизонтальными токами и характеризуется широким латеральным распространением. На дневной поверхности мы имеем отклик, определяемый всей вмещающей толщей.

Возможность регистрировать отклик только от локального трехмерного объекта предоставляет электромагнитное поле, возбуждаемое круговым электрическим диполем - КЭД (Могилатов, 1992). Правильная тороидальная система токов, образующаяся в горизонтально-слоистой среде, не имеет магнитного поля вне себя (т.е. на дневной поверхности и выше). Магнитный отклик появляется только в связи с латеральными нарушениями геоэлектрических параметров среды (не только удельного сопротивления, но и любых других). Именно такова идея метода зондирований вертикальными токами (ЗВТ).

При проведении работ методом ЗВТ наиболее часто применяются хорошие возможности восстановления параметров среды по измеренным магнитным данным. Эта методика используется на рудных месторождениях и при экологических работах (Злобинский и др., 2010).



Рис. 1. Общая схема работ зондированиями вертикальными токами

Описание методики полевых работ.

В пределах участка работ устраивается источник электромагнитного поля – круговой электрический диполь с радиусом, соответствующим глубине и площади исследований. Круговой электрический диполь состоит из 8 заземленных электрических линий, сходящихся к центру под углом 45 градусов. В работах при исследовании рудных месторождений радиус (или длина каждой из 8 радиальных линий) составлял от 200 до 750 м. Идея такого источника подразумевает, что геометрия его правильная, а токи в лучах выровнены. Использование мощного источника тока (до 160 А) позволяет регистрировать сигналы с высоким соотношением полезный сигнал/помеха.

Измерительный комплекс включает один или несколько компактных индукционных датчиков и измерителей, а также одну или несколько приемных линий и измерителей. Оператор (один или несколько) с измерительным комплексом свободно перемещается по площади исследований.

Синхронизация между генераторной установкой и измерителями выполняется с использованием сигналов спутников GPS. Удаление пикетов от центра установки может составлять до 5 радиусов источника. Таким образом, при одном закрепленном источнике радиусом 1000 м оперативно исследуется площадь до 75 км².

Применение метода ЗВТ около города Мирный (республика Саха-Якутия, Россия).

Работы проводились в рамах договора с НИГП АК «АЛРОСА» (ОАО). В рамках этих работ по плотной сети 50*50 м измерялись вертикальная компонента $\partial B_z / \partial t$, горизонтальная компонента $\partial B_{\varphi} / \partial t$, электрическая компонента E_r . В результате этих работ мы смогли локализовать трубку, которая является слабоконтрастным объектом и плохо выделяется другими методами электроразведки.

До времени 0.5 мс сильно влияние рельефа местности. Но начиная со времени 0.5 мс в измеренных компонентах электромагнитного поля $\partial B_z/\partial t$ и $\partial B_{\phi}/\partial t$ преобладал сигнал от трехмерного объекта находящегося под точками измерений. Сигнал от объекта уверенно регистрировался в диапазоне времен от 0.5 до 2.5 мс. Сигнал регистрируемый от трехмерного объекта хорошо локализуется. Используя контур максимальных значений сигнала можно задавать начальное положение объекта для последующего уточнения в процессе трехмерной инверсии. В измеренном сигнале мы выделили две зоны с наибольшими амплитудами сигналов. 1-ая зона максимальных сигналов выявляется на временах 0.545 мс, 0.780 мс, 1.058 мс и соответствует объекту находящемуся ближе к поверхности земли. 2-ая зона максимальных сигналов выявляется на временах 1.965 мс, 2.429 мс и соответствует объекту находящемуся глубже. Мы также учли, что при увеличении времени максимум сигнала будет не над центром объекта, а несколько дальше от центра КЭД. Мы пред-положили, что сигнал на времени 1.431 мс соответствует промежуточному положению между зонами 1 и 2. В соответствии с этими зонами мы задали два объекта соответствующие 1-ой и 2-ой зонам. После проведения предварительных расчетов мы расположили 1-ый объект на глубинах от 10 до 60 метров, 2-ой объект расположили на глубине с 60 до 500 м. Объекты которые мы выделили вынесены на рис. 2.



Рис. 2. Площадные (нормированные) измерения компоненты ∂B_φ / ∂t с учетом поправки за рельеф местности.
Времена 0.545 мс, 0.780 мс, 1.058 мс, 1.431 мс, 1.965 мс, 2.429 мс.
Зеленым цветом на план нанесены контуры 1-го и 2-го объектов выбранных в качестве начального приближения

На рис. 3 приведено распределение рассчитанного сигнала для подобранной модели объекта, компоненты $\partial B_{\varphi} / \partial t$ на различных временах. На рис. 3 выведены также планы объектов из которых состоит модель объекта. Расчеты показали, что мы имеем информацию о среде до глубины примерно в 300 м. Как мы видим в подобранной модели немного изменились как глубины объектов так расположение объектов. Тем не менее, начальное расположение объектов заданное по полевому материалу до подбора моделей, оказалось хорошим в качестве первоначального приближения, а трехмерная инверсия уточнила расположение и глубину объектов.



Рис. 3. Площадные (нормированные) результаты расчетов для подобранной модели компоненты $\partial B_{\varphi} / \partial t$ на временах 0.531 мс, 0.795 мс, 1.073 мс, 1.444 мс,

1.943 мс, 2.365 мс. Голубым цветом объект с глубины 10 м до 30 м, желтым цветом с глубины 30 м до 60 м, красным цветом с глубины 60 м до 140 м, синим цветом с глубины 140 м до 500 м



Рис. 4. Трехмерная визуализация сигнала $\partial B_{\varphi} / \partial t$ полевого и полученного в результате расчетов для подобранной модели. Полевой сигнал $\partial B_{\varphi} / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности представлен голубым цветом, сигнал $\partial B_{\varphi} / \partial t$ рассчитанный для подобранной модели отрисован желтым цветом, подобранная модель набрана из оранжевых точек

Выводы

1) По компонентам $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_{\varphi} / \partial t$ нам удалось выделить два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг от друга (расстояние между центрами около 300 м) и даже частично перекрывают друг друга. Сигналы различных компонент хорошо дополняют друг друга и уменьшают эквивалентность. Мы провели полноценную трехмерную инверсию с использованием прямых задач трехмерного моделирования.

2) Несмотря на слабый контраст в удельном сопротивлении вмещающей среды и исследуемого объекта, что не позволяет качественно выделять объект при проведении работ с классическими источниками электромагнитного поля, при работе методом ЗВТ объект хорошо проявился. Хорошая визуализация объекта связана, в том числе и с большей контрастностью вертикального удельного сопротивления между объектом и вмещающей средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Злобинский А.В., Квашнин К.А., Могилатов В.С. [2010] Электроразведка методом зондирования вертикальными токами применительно к рудной геофизике. Геофизика, 6, 53-57.

2. Могилатов В.С. [1992], Круговой электрический диполь новый источник для электроразведки. Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 6, 97-105.

3. Могилатов В.С., Балашов Б.П., [2005] Зондирования вертикальными токами. Новосибирск, Издательство СО РАН, филиал «Гео».

4. Nabighian M.N., [1979] Quasi-static transient response of a conducting half-space – An approximate representation. Geophysics, 44. 1700-1705.

© А. В. Злобинский, В. С. Могилатов, Р. А. Шишмарев, 2014

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОКОНТУРИВАНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Аркадий Владимирович Злобинский

«Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, д. 26/1, оф. 56, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (903)935-22-87, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Владимир Сергеевич Могилатов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, ФГБУН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru

Борис Петрович Балашов

«Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, д. 26/1, оф. 56, доктор технических наук, начальник отдела НИОКР, тел. (962)828-37-29, e-mail: boris@geozvt.ru

В докладе обсуждается опыт применения комплекса электроразведочных методов, основным из которых является метод зондирования вертикальными токами. При работе методом ЗВТ на нефтяных объектах в пределах нефтяного поля регистрируются положительные значения сигнала. Дополнительно изучается вызванная поляризация одним из методов ВП, например ЗВЛ, и удельное сопротивление слоев с помощью зондирования становлением.

Ключевые слова: переходные процессы, электроразведка, оконтуривание нефтяных месторождений, вызванная поляризация.

COMPLEX OF ELECTROMAGNETIC SURVEYING METHODS WITH THE AIM OF DELINEATION OF OIL ACCUMULATION

Arkadiy V. Zlobinskiy

«STC ZaVeT-GEO», 630102, Russia, Novosibirsk, 26/1 Voskhod st. of. 56, PhD in techn., General Manager, tel. (903)935-22-87, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Vladimir S. Mogilatov

Trofimuk Institute Of Petroleum Geology And Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., PhD in techn, professor of geophysics Novosibirsk State University, principal scientist officer, Laboratory of geoelectrics, tel. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru

Boris P. Balashov

«STC ZaVeT-GEO», 630102, Russia, Novosibirsk, 26/1 Voskhod st. of. 56, PhD in techn., head of R&D department, tel. (962)828-37-29, e-mail: boris@geozvt.ru

Field work by the Vertical Electric Current Soundings (VECS) showed the possibility of detection and delineation of special zones in oil deposits. Results VECS can refine the outline of deposit, and in general, adjust the plan of drilling.

Key words: electrical prospecting, VECS, TEM, oil surveys.

Предпосылки для создания электроразведочного комплекса

В традиционных методах электроразведки изучают такой электродинамический параметр как удельное электрическое сопротивление (УЭС), который, как правило, мало информативен для углеводородных объектов. В качестве эффективного дополнения электроразведка предлагает изучение вызванной поляризации (ВП) пород, при этом считается доказанным, что над залежами углеводородов поляризация возрастает. Метод ЗВТ дополняет к изучению УЭС и ВП среды изучение еще одного параметра, который проявляется над залежами углеводородов и является на сегодняшний день очень информативным, более того он характеризует именно месторождения углеводородов. Мы предлагаем использовать комплекс электроразведочных работ направленных на изучение (УЭС), (ВП) и параметра проявляемого в работах ЗВТ. Комплексных подход позволяет существенно повысить достоверность оконтуривания месторождений, особенно если в комплекс включен метод ЗВТ. Метод ЗВТ широко опробован на нефтегазовых объектах, что позволяет нам делать утверждение о его высокой эффективности.



Рис. 1. Общая схема работ зондированиями вертикальными токами

Описание методики полевых работ.

Методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ) называют такие геоэлектрические исследования, при проведении которых используется в качестве источника электромагнитного поля круговой электрический диполь. Конфигурация КЭД образуется несколькими радиально расположенными заземленными горизонтальными линиями (обычно 8), в которые одновременно подается импульсный ток одинаковой формы и амплитуды. Измерения проводятся по произвольной сети вокруг источника поля (при большом радиусе КЭД и внутри источника) с целью регистрации плотного площадного переходного сигнала (трехмерного куба данных). Источник, состоящий из двух горизонтальных линий с одинаковым током, включенным навстречу друг другу, мы назвали встречной электрической линией. А метод, соответственно назвали, зондирования встречными линиями (ЗВЛ). Встречная линия замечательна тем, что при сохранении (до некоторой степени) компенсирующих свойств поля, возникающего в среде при возбуждении его КЭД, позволяет проводить профильные работы. По сравнению с классической установкой *ABMN*, установка со встречной линией гораздо чувствительней к параметрам поляризации. Для интерпретации полевых данных ЗВЛ можно использовать одномерные модели поляризующейся среды, например на основе формулы Cole-Cole.

Южно-Цыганское поднятие (Республика Татарстан, Россия).

Работы проводились по заказу ООО «ТНГ-Казаньгеофизика» на территории Татарстана. Целью работ была оценка наличия углеводородов в выявленной сейсморазведкой положительной структуре, и оконтуривание нефтяной залежи, если углеводороды будут выявлены.

Работы проводились недалеко от известного нефтяного месторождения, мы воспользовались этим обстоятельством для сравнения сигналов над нефтяным месторождением и над изучаемым сейсмоподнятием. Были проведены работы следующими методами:

1) Зондирование становлением от горизонтальной линии, установка типа AB-q.

2) Методом зондирований встречными линиями. Точки измерений от встречных линий совпадали с точками измерений установкой AB-q. Точки, в которых проводились измерения, находились на разном удалении от центров встречных линий. После проведения измерений была проведена 1D интерпретация параметров среды с учетом параметров поляризации по формуле Cole-Cole. Модель по удельным сопротивлениям строилась на основе результатов 1-го этапа работ установкой AB-q.

3) Методом ЗВТ-М. Измерения проводились с разной сеткой наблюдений. Были построены карты сигналов на различных временах измерений от 10 мс до 100 мс.

Площадные результаты работ ЗВТ-М на времени 32.2 мс и полоса изолиний параметра поляризации отстроенная вдоль профиля измерения сигнала ЗВЛ.

На рисунке 2 отражены результаты работ ЗВТ-М в виде изолиний сигнала на времени 55.7мс. Зелеными точками обозначен профиль, вдоль которого проводились измерения ЗС(*AB-q*) и ЗВЛ. На рисунке 3 совмещены площадные результаты работ ЗВТ-М на времени 32.2 мс и полоса изолиний параметра поляризации, отстроенная вдоль профиля измерения ЗВЛ. Координаты точек по измерениям ЗВЛ смещены от точки измерения к центру установки ABAMN на 1/3 расстояния между точкой измерения и центром соответствующей установки. Этот рисунок демонстрирует, что граница залежи, полученная двумя принципиально разными методами электроразведки – ЗВТ-М и ЗВЛ хорошо совпадают при проведении этих работ.



Рис. 2. Результаты работ ЗВТ-М на времени 55.7 мс. Зелеными точками обозначен профиль, вдоль которого с шагом 375 м проводились измерения *АВ-q* и *АВАМ АВ-q* и *АВАМ АВ-q АВАМ АВ-A А АВ-A АВ-A АВ-A А АВ-A АВ-A АВ-A АВ-A АВ-A АВ-*



Рис. 3. Площадные результаты работ ЗВТ-М на времени 32.2 мс и полоса изолиний параметра поляризации отстроенная вдоль профиля измерения сигнала ЗВЛ

Выводы

Комплекс работ различными методами электроразведки позволяет изучить различные электродинамические параметры среды, не только изменение удельного сопротивления в среде.

Работы методом ЗВТ-М дают контур нефтепроявлений. Этот контур определяется не только и не столько непосредственно контуром самой залежи, а контуром ореольных изменений геосреды над залежью. Эта информация очень ценна, но дальнейшая интерпретация (распределение по глубине) затруднена из-за неясности природы сигнала. Обратим внимание, в отличии от других методов электроразведки, ЗВТ-М дает информацию, в основном, о среде, находящейся под точкой измерения. Увеличение плотности сети наблюдений в ЗВТ-М имеет смысл, т.к. сигнал почти свободен от информации об усредненной среде между точкой наблюдения и КЭД.

Привлечение традиционных параметров ВП повышает достоверность интерпретации электроразведочных данных при поисках углеводородов, поэтому мы предлагаем метод ЗВЛ в дополнение к ЗВТ-М. Для интерпретации данных ЗВЛ применяется модель Cole-Cole частотной дисперсии сопротивления среды. Мы выбираем метод ЗВЛ на основании его гораздо большей чувствительности к параметрам поляризации, чем традиционные методы электроразведки ВП. ЗВЛ дают теоретически обоснованные и понятные сообществу геофизиков результаты. Однако сигнал ЗВЛ, как и в большинстве методов электроразведки, усредняет информацию о среде между точкой измерения и генератором и не способен дать такую детальную площадную информацию, как это возможно в ЗВТ-М. Имеет смысл проводить предварительные профильные работы ЗВЛ и по их результатам ставить ЗВТ-М.

Для интерпретационного процесса с использованием и ЗВТ-М и ЗВЛ необходимы сведения о распределении удельного сопротивления среды. Необходимо использовать данные традиционных ЗС, ранее проведенных, либо включить работы ЗС в текущий комплекс работ. Мы предлагаем использовать различные варианты установок AB-q с использованием текущих установок КЭД и ABA.

Очень важным моментом при проведении этих работ явилось то, что сходные геофизические результаты по месторождению нефти были получены на основании двух различных методов электроразведки – ЗВТ-М и ЗВЛ, и на основании распределения различных параметров среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Могилатов В.С., Злобинский А.В. [2013] Комплексное исследование электродинамических параметров среды над сейсмическим поднятием с целью оконтуривания нефтяного месторождения. Геофизика, 2, 51-57.

2. Балашов Б.П., Мухамадиев Р.С., Могилатов В.С., Андреев Д.С., Злобинский А.В., Шишкин В.К., Стогний В.В. [2011] Оконтуривание залежей углеводородов зондированиями вертикальными токами. Геофизика, 2, 61-66.

3. Могилатов В.С. [1992], Круговой электрический диполь новый источник для электроразведки. Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 6, 97-105.

4. Могилатов В.С., Балашов Б.П., [2005] Зондирования вертикальными токами. Новосибирск, Издательство СО РАН, филиал «Гео».

5. Nabighian M.N., [1979] Quasi-static transient response of a conducting half-space – An approximate representation. Geophysics, 44. 1700-1705.

© А. В. Злобинский, В. С. Могилатов, Б. П. Балашов, 2014

ДАТЧИКИ В ГЕОТЕРМИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Сергей Алексеевич Казанцев

ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, тел. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

В докладе приводится сравнительный анализ различных первичных датчиков температуры. Оцениваются точность измерений, достоверность и возможные области их применения.

Ключевые слова: цифровые и аналоговые датчики температуры, геотермический мониторинг, калибровка датчиков, высокоточные измерения температуры.

SENSORS IN GEOTHERMY, COMPARANIVE ANALYSIS

Sergey A. Kazantsev

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect akad. Koptug, 3, Senior research scientist, Candidate of science, tel. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

Comparative analysis of various primary temperature sensors is conducted in the report. Measurement accuracy, reliability and possible areas of application are evaluated.

Key words: Digital and analog temperature sensors, geothermal monitoring, sensor calibration, high accuracy temperature measurement.

Основой полевых геотермических исследований являются высокоточные измерения температуры, как в скважинах, так и на других геологических объектах. На этих натурных измерениях температуры в дальнейшем строится все здание геотермических исследований. Потому так важна достоверность и точность полученной первичной температурной информации.

При геотермических исследованиях наибольшее распространение получили три типа датчиков: цифровые, аналоговые (термометры сопротивления) и частотные (кварцевые) датчики температуры.

Из семейства цифровых, к наиболее известным и широко применяемым на территории России можно отнести датчики фирмы Dallas Semiconductor DS18B20. Выходные температурные данные датчика DS18B20 калиброваны в градусах Цельсия. В геотермических исследованиях применение DS18B20 ограничено их сравнительно низкой точностью измерения. Производитель установил её на уровне 0,5°C. Однако максимальная разрешающая способность температурного преобразователя DS18B20 в 12-битном режиме составляет 0,0625°C. Такое разрешение в можно использовать, применив дополнительную высокоточную калибровку приборов в специализированном термостате. Такой двухконтурный термостат разработан и изготовлен в ИНГГ СО РАН. Этот термостат позволяет длительное время поддерживать в рабочем объеме заданную

температуру с точностью до 0,01°С. Контроль температуры ведется по ртутным термометрам ТР-1 с делениями шкалы в 0,01°С.

Наряду с дешевизной и доступностью одним из достоинств датчика DS18B20 является то, что прибор использует исключительно 1-Wire интерфейс обмена, разработанный корпорацией Dallas Semiconductor. Преимуществом 1-Wire интерфейса является то, что для связи с устройством необходимо лишь два провода на данные и заземление, а так же большое расстояние передачи -до 300 метров. Такой интерфейс позволяет собирать датчики в трехпроводные гирлянды, косы, где датчики включаются параллельно. Поскольку каждый прибор имеет уникальный 64-битовый код, число приборов, к которым можно обратиться на одной шине, фактически неограниченно.

Фирма Analog Devices выпустила цифровой датчик температуры -ADT7410, с погрешность измерений температуры ±0.4°С. Для такой точности не требуется пользовательской калибровки температуры, не требуется коррекции линейности. Датчик ADT7410 имеет режим микропотребления, содержит внутренний источник опорного напряжения и, по умолчанию, 13-разрядный AЦП с разрешением 0.0625°С. Разрядность АЦП может быть программно изменена на 16 бит. Тогда разрешающая способность датчика увеличивается до 0.0078°С.

ADT7410 работают с внешними устройствами по интерфейсу I2C, последовательной шине данных для связи интегральных схем, использующая две двунаправленные линии связи. Этот интерфейс нуждается в 4-х проводах связи, к тому же в отличии от DS18B20, они не имеет своего уникального имени и могут быть смонтированы в виде гирлянды не более 4-х, приборов, имеются и существенные ограничения на длину кабеля. Поэтому, чтобы использовать датчики повышенной точности ADT7410 в длинных косах надо привести их протокол связи к совместимому с протоколом 1-Wire. С этой целью вместе с каждым из датчиков температуры монтируется микроконтроллер STM8, преобразующий интерфейс I2C в 1-Wire. После такой доработки и дополнительной калибровки температурные датчики могут быть использованы в геотермических исследованиях. Такие датчики используются нами для мониторинга температуры в скважине на Семипалатинском исследовательском ядерном полигоне. Широкому применению ADT7410 в геотермии препятствует необходимость дополнительного микроконтроллера, его программирования и сложность их монтажа.

Аналоговые датчики сопротивления можно разделить на два класса – полупроводниковые и металлические датчики. Из металлических датчиков наибольшее распространение получили платиновые датчики сопротивления, как проволочные, а в последние годы и пленочные в интегральном исполнении [1]. Платиновые датчики имеют несколько положительных качеств, среди которых: практически линейная характеристика, долговременные стабильные электрические свойства, точность и повторяемость, малые габариты (только для датчиков в интегральном исполнении), долговечность. Эти качества предопределяют платину в качестве базового материала для металлических датчиков температуры. Наряду с этим платиновые датчики имеют значительно меньшую крутизну характеристики преобразования (около 0,4% на 1 градус от номинала) по сравнению полупроводниковыми термисторами,

Из-за низкого омического сопротивления платиновых датчиков на практике применяются двух или четырех проводные схемы их подключения к измерительной схеме. Двухпроводная схема подключения датчика обладает достаточной точностью только в том случае, если длина подводящих проводов очень малая, иначе сопротивление проводов вносит существенную ошибку в измерения. Четырехпроводная схема рекомендуется для получения наилучших результатов измерения. Она компенсирует влияние подводящих проводов. Необходимость четырехпроводной схемы для точных измерений существенно ограничивает применение платиновых датчиков для построения длинных геотермических кос с большим числом датчиков.

Наибольшее распространение в геотермических исследованиях получили датчики на основе полупроводниковых терморезисторов (термисторов). В зависимости от применяемого полупроводникового материала терморезисторы разделяют на кобальто-марганцевые (КМТ и СТ1), медно-марганцевые (ММТ и СТ2) [2]. Важным преимуществом термисторов является их большое номинальное сопротивление, что устраняет проблему искажений связанных с подводящими проводами. Еще одним из преимуществ термисторов является разнообразие форм и миниатюрность. Главным достоинством термисторов является их очень высокая температурная чувствительность по сравнению с другими типами датчиков температуры. Типовое значение температурного коэффициента сопротивления для термисторов составляет 5% на градус от номинала, в то время как для платинового термопреобразователя он составляет 0,4% на градус. К недостаткам можно отнести то, что термисторы имеют нелинейную и строго индивидуальную характеристику зависимости сопротивления от температуры. Эта зависимость в диапазоне нескольких десятков градусов удовлетворительно описывается функцией:

$$R_T = A \cdot T^{-C} \cdot \exp \frac{B}{T}$$

где A, B и C – постоянные, зависящие от свойств материала и геометрических параметров термистора. Нелинейность характеристики диктует необходимость индивидуальной калибровки.

Значительное сопротивление термисторов и большая чувствительность позволяют использовать при измерении схему омметра. Регистрирующая аппаратура представляет собой электронный усилитель, АЦП (амплитудно-цифровой преобразователь), микропроцессор и энергонезависимую память. Данные измерений выводятся на ПК или ноутбук [3,4]. Такие схемы обеспечивают разрешение по температуре до 0,002°С. При включении термистора в мостовую схему разрешение ограничивается только тепловыми шумами датчика. Это дает возможность с большой точностью проводить измерения относительных изменений температуры. Однако измерение абсолютных значений температуры целиком определяется качеством и тщательностью калибровки термисторов. В нашем случае калибровка позволяет измерять температуру с точностью до 0,01-0,02°С. Особенности калибровки, выбор измерительного и градуировочного токов подробно описан в работе [5].

Особняком стоят кварцевые термометры – это автогенераторные преобразователи с частотным выходом, использующие в качестве чувствительного элемента пьезоэлектрический резонатор с сильной зависимостью частоты от температуры. У высокочастотных кварцевых термодатчиков (26 Мгц) чувствительность достигает 1000 гц/град. Высокой чувствительности и конструктивной простоте датчика противопоставляется довольно сложная система регистрации температуры. Для точных измерений частотного сдвига необходимы прецизионные генераторы опорной частоты. Это обстоятельство значительно усложняет применение кварцевых термометров в полевой геотермической практике.

Таким образом, полупроводниковые термисторы, благодаря своей исключительной чувствительности, высокому номинальному сопротивлению и современным методам калибровки, являются наиболее предпочтительными датчиками для полевых геотермических исследований. Применение цифровых датчиков ADT7410 может быть оправдано для специальных задач длительного высокоточного температурного мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционным проектом СО РАН № 45.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гутников В.С., Ядевич А.И. Платиновые тонкоплёночные датчики температуры фирмы Heraeus Sensor Technology GmbH. Электронные компоненты. 2005, № 5.

2. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973.

3. Казанцев С.А., Пермяков М.Е., Дучков А.Д. Устройство для оперативного температурного мониторинга. В кн.: ГЕО-Сибирь-2013. Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1: Сб. матер. IX Междунар. научн. конгресса. Новосибирск: СГГА.- 2013.- С. 203-207.

4. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород // Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». - Тюмень: ИКЗ СО РАН.- 2008.- С. 236-239.

5. Казанцев С.А. Измерение температуры илов автономными приборами. В кн. "Методика и результаты геотермических исследований". Новосибирск. -1979.- С. 32-41.

© С. А. Казанцев, 2014

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОВЯЗКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Ярослав Константинович Камнев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)330-79-08, e-mail: KamnevYK@ipgg.nsc.ru

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)333-28-16, e-mail: Kozhevnikov-NO@ipgg.nsc.ru

Сергей Михайлович Стефаненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-79-08, e-mail: StefanenkoSM@ipgg.nsc.ru

Приводятся и обсуждаются результаты моделирования магнитной вязкости геологических сред во временной области.

Ключевые слова: переходные процессы, магнитная вязкость, суперпарамагнетизм.

MATHEMATICAL MODELING OF INDUCTIVE TRANSIENT RESPONSE OF MAGNETICALLY VISCOUS GEOLOGOCAL MATERIALS:FIRST RESULTS

Yaroslav K. Kamnev

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 690090, Russia, Novosibirsk, 3 Prosp. Koptyuga, Ph.D. student, tel. (383) 330-79-08, e-mail: KamnevYK@ipgg.nsc.ru

Nikolai O. Kozhevnikov

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 690090, Russia, Novosibirsk, 3 Prosp. Koptyuga, Dr. Sci. (Geol.–Min.), Professor, general researcher, Ph.D., tel. (383)333-28-16, e-mail: Kozhevnikov-NO@ipgg.nsc.ru

Sergey M. Stefanenko

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 690090, Russia, Novosibirsk, 3 Prosp. Koptyuga, leading engineer, tel. (383)330-79-08, e-mail: StefanenkoSM@ipgg.nsc.ru

The paper discuses first results of modelling time domain magnetic viscosity response of geological materials.

Key words: transient response, magnetic viscosity, superparamagnetism.

Магнитная вязкость, или магнитное последействие, является одним из фундаментальных свойств ферромагнитных минералов.Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков (намагниченности, магнитной проницаемости и др.) по отношению к изменениям напряжённости внешнего магнитного поля. Магнитная вязкость может иметь различную природу. Например, мельчайшие однодоменные ферромагнитные частицы могут менять направление своего магнитного момента под действием тепловой энергии даже в отсутствии внешнего магнитного поля. Это обстоятельство позволяет намагничиваться ансамблю однодоменных частиц даже под действием полей, много меньших чем критические. После выключения магнитного поля, под действием тепловых флуктуаций, намагниченность релаксирует. Намагничивание и релаксация намагниченности в таком случае имеет временной характер, и описывается экспоненциальной зависимостью $J = J_0 \exp(-t/\tau)$.Здесь J_0 – намагниченность в момент выключения внешнего поля, t – время после выключения поля, t – постоянная времени релаксации намагниченности: $\tau = \tau_0 \exp(KV/kT)$, где K – постоянная магнитной анизотропии, V – объем частицы, T – температура, k – постоянная Больцмана, $\tau_0 \approx 10^{-9} c$. Обычно, в геологических средах присутствуют однодоменные частицы разного размера, поэтому становлениенамагниченности характеризуются спектром времен релаксации.

Несмотря на то, что магнитная вязкость отражает важные особенности о генезисе и строении природных и антропогенных сред и объектов, в большинстве случаев проявление магнитного последействия рассматривают как геологическую помеху. В палеомагнитных исследованиях присутствие вязкой намагниченности препятствует определению первичной естественной остаточной намагниченности, поэтому измерение магнитной вязкости образцов является важной частью исследований. Магнитная вязкость так же проявляется и при разведке методом переходных процессов, причём сигнал от релаксации намагниченности может быть сравнимым, или даже превышать исследуемый сигнал от вихревых токов в среде.

С развитием измерительной аппаратуры в последние десятилетия, магнитная вязкость стала проявляться всё чаще, и её уже невозможно игнорировать. В настоящее время магнитную вязкость в лабораторных условиях путём измерения магнитной восприимчивости образца на двух-трёх частотах переменного намагничивающего поля. Различие магнитной восприимчивости на различных частотах характеризует вязкую компоненту намагниченности.

Реальные геологические среды включают частицы разного объёма, поэтому магнитная вязкость представляет собой суперпозицию релаксации намагниченности частиц различных размеров и форм. Функция распределения частиц по размерам является важной характеристикой магнитной вязкости. В настоящее время для описания магнитной вязкости чаще всего используют два вида распределения частиц по размерам. Например, распределение частиц функцией Фрёлиха описывает распределение времён релаксации ансамбля однодоменных частиц, у которых энергетические барьеры между соседними состояниями намагниченности распределены равномерно []. Для такой функции логарифмы времён релаксации распределены равномерно $G(\ln \tau) = 1/\ln (\tau_1/\tau_2)$ внутри интервала $\tau_2 < \tau < \tau_1$, вне этого интервала функция равна нулю. Использование такого распределения частиц в моделировании даёт релаксацию намагниченности по логарифмическому закону $J(t) = a \cdot \ln(t)$. Подобное поведение намагниченности часто наблюдается при разведке методом переходных процессов на магнитовязких объектах. Релаксация суперпарамагнитных частиц индуцирует в приёмной петле медленно убывающую ЭДСвида $U/I = a \cdot t^{-1}$. Поэтому распределение частиц функцией Фрёлиха стало распространённым при описании переходных процессов, связанных с магнитной вязкостью.

Однако многиеисследователи, занимающиеся проблемами магнитной гранулометрии считают, что распределение суперпарамагнитных частиц по размерам имеет логнормальную форму $f(V, V_m, \sigma) = (1/\sqrt{2\pi\sigma}V)\exp(-(\ln V - \ln V_m)^2/2\sigma^2)$. Здесь V_m – математическое ожидание, σ – стандартное отклонение объёма частицы V. Для определения параметров распределения частиц измерения магнитной вязкости проводятся преимущественно в частотной области. При этом двух-трёх измерений на различных частотах переменного поля, которыми ограниченны измерительные приборы недостаточно, поэтомудля оценки параметров распределения, такие измерения проводятся при различных температурах исследуемого образца. Подобные обстоятельства делают исследования даже одного образца задачей, затратной по времени и ресурсам.

С другой стороны, при измерении магнитной вязкости во временной области удаётся зарегистрировать релаксацию намагниченности в диапазоне от микросекунд до секунд, поведение которойзависит от функции распределения суперпарамагнитных частиц по размерам. Поэтому исследование магнитной вязкости во временной области может оказаться эффективным средством для решения задач магнитной гранулометрии.

Для исследования магнитной вязкости во временной области на основе полевой станции FastSnapaвторами была разработана лабораторная установка. Для измерения небольших образцов в лабораторных условиях изготовлены генераторная и приёмная катушки. Установка позволяет получать переходные процессы во временном интервале от 100мкс – 400мс, в диапазоне от долей микровольта до 1В. Измеренные переходные процессы аппроксимировались степенной функцией $U/I = a \cdot t^{-b}$. Типичные переходные процессы, а так же аппроксимирующие их степенные функции (с указанием ошибки аппроксимации) магнитовзких образцов представлены на рис. 1.

Экспериментальные данныесвидетельствуют о том, что показатель *a* степенной функции, аппроксимирующей переходные процессы хотя и близок к единице, но не равен ей. Отличие превышает ошибку определения параметров аппроксимации, вычисленную с учётом погрешности измерений. Более того, на различных временных участках переходный процесс необходимо аппроксимировать степенными функциями, отличающимися как амплитудой *a*, так и показателем степени *b*. Поэтому можно предположить, что использование функции Фрёлиха для описания распределения частиц по размерам не всегда даёт удовлетворительные результаты.



Рис. 1. Типичные переходные процессы магнитовязких образцов, измеренные в лабораторных условиях. Показаны временные интервалы, для каждого из которыхприведена аппроксимирующая степенная функция с указанием ошибок определения параметров

Для проверки возможности использовать логнормальное распределение частиц при описании переходных процессов проведено математическое моделирование. ЭДС в приёмной катушкепропорционально производнойнамагниченности по времени: $U(t) \propto dJ_r(t)/dt$.

Намагниченность $J_r = \int_0^\infty J_0 \exp(-t/\tau) \cdot f(V) dV$ рассчитывалась для логнормального распределения частиц с различными значениями σ и V_m . Значения таких параметров как намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, константа анизотропии были взяты из литературы [G3].Результаты моделированияиллюстрирует рис. 2, где видно, что рассчитанные переходные процессыпохожина измеренные в лаборатории. Показатель степени аппроксимирующей степенной функции близок к единице, и зависит от параметров распределения. Рассчитанный переходный процесс не может быть описан одной степенной функцией, так как различные временные участки описываются функциями с разными параметрами.

Примечательным результатом математического моделирования является сильная зависимость амплитуды переходного процесса от параметров распределения. Изменение среднего объёма V_m суперпарамагнитных частицна 10 нанометров приводит к изменению амплитуды почти в 2.5 раза. Показатель степени аппроксимирующей степенной функции тоже изменяется, но не так значительно. Обычно амплитуду переходного процесса связывают с концентрацией суперпарамагнитных частиц, однако – как видно из результатов моделирования – параметры функции распределения тоже сильно влияют на амплитуду.



Рис. 2. Результаты моделирования переходных процессов магнитовязких образцов с различными функциями распределения.
 Параметры функции распределения: σ = 0,8, V_m = 20нм (верхний график); σ = 0,8, V_m = 30нм(нижний график). Показаны временные интервалы, для каждого из которых приведена аппроксимирующая степенная функция

Несмотря на схожесть модельных результатов с экспериментальными, в настоящий момент рано говорить о возможности однозначного решения обратной задачи определения параметров распределения по экспериментальным данным. Для решения этой проблемы предполагается провестиспециальные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камнев Я.К., Кожевников Н.О., Матасова Г.Г. Измерение магнитной вязкости во временной области лабораторной индукционной установкой // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2012. VIIIМеждунар. Научн. конгр., 10 – 20 апреля 2012 г., Новосибирск: VIIIМеждунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2т. Т.1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 38 – 42.

2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Матасова Г.Г., Камнев Я.К. Метод переходных процессов при изучении геологических сред с магнитной вязкостью // Геофизический журнал, №4, Т.34, 2012, с. 137 – 149.

3. Wang, X., R. Løvlie, X. Zhao, Z. Yang, F. Jiang, and S. Wang (2010), Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism, Geochem. Geophys. Geosyst., 11, Q10008, doi:10.1029/2010GC003194. ISSN 1525-2027. © Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, С. М. Стефаненко, 2014

УДК 550.837

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИОЛЬХОНЬЯ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Потапов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Юрий Александрович Агафонов

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2a, кандидат технических наук, директор, тел. (3952)780-184, e-mail: aua@ierp.ru

Представлены и обсуждаются первые результаты аудиомагнитотеллурических зондирований (АМТЗ) в Приольхонье. Хотя эти результаты во многом носят предварительный характер, они со всей определенностью свидетельствуют о высокой информативности метода АМТЗ при решении задач геологического картирования и изучении тектоники Приольхонья.

Ключевые слова: Приольхонье, тектоника, аудиомагнитотеллурические зондирования.

FIRST ATTEMPT TO USE AUDIOMAGNETOTELLURIC METHOD IN LARGE SCALE TECTONIC STUDIES OF OLKHON REGION

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Ph. D., Prof., Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Potapov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Yury A. Agafonov

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, 2a, Rabochaya st., Ph. D., Director, tel. (3952)780-184, e-mail: aua@ierp.ru

The paper discusses the first results of application of the audiomagnetotellurics (AMT) sounding method in large scale studies of Olkhon region tectonics. Although these results are largely tentative they indicate convincingly that AMT sounding method is informative in studying geology and tectonics of the Olkhon region.

Key words: Olkhon region, tectonics, audiomagnetotellurics sounding method.

Электроразведочные исследования методами естественного электрического поля (ЕП) и зондированием становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), выполненные в Приольхонье, выявили некоторые особенности тектонического строения этого региона в интервале глубин от первых десятков до первых сотен метров [Кожевников и др., 2004]. Согласно результатам этих работ региональная структура Приольхонья носит двумерный характер и определяется наличием северо-западного и юго-восточного тектонических блоков, граница между которыми проходит по Кучулгинскому разлому (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения региональных геофизических профилей и важнейшие элементы структуры Приольхонья

Северо-западный блок представлен Чернорудской зоной, в рельефе выраженной в виде грабена [Кожевников, 2010]. В пределах Чернорудской зоны породы ольхонской серии подверглись максимальной тектонической проработке. Съемки методом ЕП показали, что зона выделяется отрицательной аномалией потенциала шириной 0.5 – 2 км и амплитудой от 0.4 до 1В. Это свидетельствует о том, что ЕП генерируется геобатареей, неотъемлемыми элементами которой являются крутопадающие проводящие пласты. С другой стороны, согласно одномерной инверсии данных ЗСБ здесь присутствуют пологая проводящая зона, кровля которой залегает на глубинах 100 – 400 м. По данным ЗСБ вертикальная мощность зоны изменяется в пределах 250 – 900 м, а суммарная продольная проводимость – от 25 до 300 См [Кожевников и др., 2004, 2008]. Таким образом, результаты ЗСБ не согласуются с данными съемок методом ЕП и тому факту, что геологические структуры Приольхонья характеризуются крутым падением.

Юго-восточный блок включает широкую полосу пород между Кучулгинским разломом и побережьем о. Байкал. По сравнению с Чернорудской зоной этот блок «спокоен» в тектоническом отношении. Здесь нет аномалий ЕП большой амплитуды, а субгоризонтальные проводники, подобные тем, которые выделены в Чернорудской зоне, в интервале глубин, который может быть изучен методом ЗСБ с использованием имеющихся на сегодняшний день технических возможностей, не обнаружены.

В этой ситуации обращает на себя внимание метод аудиомагнитотеллурических зондирований – АМТЗ. В отличие от ЗСБ метод АМТЗ основан на тензорных измерениях электромагнитного поля, что, в частности, позволяет сравнительно легко выполнять инверсию данных, полученных при изучении геологических объектов, геоэлектрическая модель которых может быть описана двумерным (2D) распределением удельного электрического сопротивления. Другое важное достоинство метода АМТЗ заключается в том, что при его использовании не нужен контролируемый источник и громоздкие установки, что удешевляет производство и повышает производительность работ.

Работы методом АМТЗ проведены в Приольхонье летом 2013 г. сотрудниками ИНГГ СО РАН при поддержке Иркутского электроразведочного предприятия (ИЭРП). Использовалась аппаратура МТU-5А канадской фирмы Phoenix Geophysics. Диапазон измеряемых частот – от 0.1 Гц до 10 кГц. Измерения выполнены по региональным профилям 3 и 6, ориентированным в направлении C3 – ЮВ, вкрест простирания основных структур Приольхонья. Всего на профиле 3 выполнено 17, на профиле 6 – 18 зондирований. В пределах Чернорудской зоны расстояние между пунктами зондирований составляло 0.2 – 0.7 км, а при изучении юго-восточного блока – от 0.8 до 1.3 км.

На рис. 2 показаны типичные продольные ($\rho_{T\parallel}$) и попречные ($\rho_{T\perp}$) кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные в пределах северозападного (рис. 2а) и юго-всточного (рис. 2 б) тектонических блоков. Как можно видеть кривые, измеренные над северо-западным и юго-восточным блоками, отличаются по форме и уровню. Средний уровень кривых для Чернорудской зоны в среднем на два порядка ниже по сравнению с измеренными в пределах юго-восточного тектонического блока. Это свидетельствует о том, что породы в пределах Чернорудской зоны намного более проводящие по сравнению с те-
ми, которые образуют юго-восточный блок. Так, в Чернорудской зоне, на периодах T порядка одной секунды кажущееся сопротивление $\rho_{T\parallel}$ падает до уровня порядка 1 Ом·м, а – $\rho_{T\perp}$ до уровня 10 Ом·м, в то время как в юго-восточном блоке, до 100 и 1000 Ом·м, соответственно. Также обращает на себя внимание различие по уровню между продольными и поперечными кривыми на каждом пункте зондирований. Для юго-восточного блока отличия между $\rho_{T\parallel}$ и $\rho_{T\perp}$ в среднем больше, чем для северо-западного, при этом практически зависит от времени. Для Чернорудской зоны отличие между $\rho_{T\parallel}$ и $\rho_{T\perp}$ в среднем меньше, особенно на малых периодах, однако прогрессивно возрастает по мере увеличения периода. Это свидетельствует о том, что с увеличением глубины продольная – по отношению к простиранию основных геологических структур – проводимость все значительнее превосходит поперечную.



Рис. 2. Типичные продольные ($\rho_{T\parallel}$) и поперечные ($\rho_{T\perp}$) кривые кажущегося удельного сопротивления АМТЗ, измеренные в пределах Чернорудской зоны (а) и юго-восточного блока (б)

Необходимо отметить, что на рис. 2 приведены кривые кажущегося удельного сопротивления, качество которых во всем диапазоне периодов (от 0.1 мс до единиц секунд) оценивается как «высокое». К сожалению, не все кривые удалось зарегистрировать с таким же хорошим качеством. Если рассматривать всю совокупность кривых, то для уверенной интерпретации можно использовать их средние участки во временном диапазоне от 1мс до 100мс. Если обозначить минимальную глубину исследований $h_{\rm min}$, максимальную – $h_{\rm max}$, то – с учетом того, что $T_{\rm max}$ =100 $T_{\rm min}$ – отношение $h_{\rm max}$ к $h_{\rm min}$ примерно равно 10. Ины-

ми словами, диапазон периодов, перекрывающий два порядка, обеспечивает десятикратное изменение глубины зондирований.

На рис. 3 приведены графики сопротивлений $\rho_{T\parallel}$ и $\rho_{T\perp}$, измеренных при *T*=0.01с вдоль профиля 6 (см. рис. 1). Как нетрудно видеть, основные тектонические блоки Приольхонья находят четкое отражение в результатах профилирования.



Рис. 3. Графики $\rho_{T\parallel}$ и $\rho_{T\perp}$ для периода *T*=0.01с по региональному профилю 6 (см. рис. 1)

Работа выполнена в рамках проекта «Геофизические поля Приольхонья и их тектоническая интерпретация» в составе программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 7 «Физические поля и внутреннее строение Земли».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н.О. Геоэлектрическая модель Приольхонья и ее связь со структурой Маломорского рифта // Кайнозойский континентальный рифтогенез: Материалы Всерос. симпозиума с международным участием, посвященного памяти Н.А. Логачева в связи с 80-летием со дня рождения / Под редакцией Е.В. Склярова, С.В. Рассказова. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. – В 2-х томах. – Т.1., с. 167 – 170.

2. Кожевников Н.О., Бигалке Ю., Кожевников О.К. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // Геология и геофизика. – 2004. – т. 45. – №2 – с. 253–265.

3. Кожевников Н.О., Агафонов Ю.А., Антонов Е.Ю. Структура Приольхонья и Приморского разлома по геофизическим данным // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. Т.2. – М.: ИФЗ. 2008, с. 40 – 42.

© Н. О. Кожевников, В. В. Потапов, Ю. А. Агафонов, 2014

ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Потапов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Рассматривается процесс выключения тока в горизонтальной незаземленной петле, используемой в качестве источника первичного магнитного поля в методе переходных процессов. Показано, что петля в совокупности с подстилающей ее верхней частью геологического разреза образует сложную систему с распределенными параметрами. Поэтому переходный процесс тока в петле отличается от предсказывемого традиционной теорией импульсной индуктивной электроразведки на основе модели петли в виде эквивалентного контура с сосредоточенными параметрами. Эти отличия (в первую очередь, эффекты запаздывания) необходимо учитывать при измерениях на ранних временах.

Ключевые слова: метод переходных процессов, горизонтальная петля, выключение тока, длинная линия.

CURRENT TURN-OFF IN A HORIZONTAL UNGROUNDED LOOP: THEORY AND EXPERIMENT

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Ph. D., Prof., Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Potapov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the current turn-off in a horizontal ungrounded loop using as primary magnetic field source in the TEM sounding method. As indicated by theoretical and experimental studies a loop and underlying it near-surface make up a complicated system with distributed parameters. Because of this, the current turn-off in a loop differs from that predicted by the conventional theory of the TEM method on the basis of representing a loop as an equivalent lumped circuit. These dissimilarities (time delay effects first of all) have to be taken into consideration when measuring a TEM response at early times.

Key words: TEM method, horizontal loop, current turn-off, transmission line.

Незаземленная горизонтальная петля, используемая для возбуждения индукционных переходных процессов в земле, является одним из основных элементов системы для импульсной индуктивной электроразведки. При выключении тока в петле в окружающем ее пространстве возникает вихревое электрическое поле, под действием которого в земле возникают вихревые токи, после чего, в отсутствии первичного поля источника, измеряется создаваемое этими токами вторичное магнитное поле.

На низких частотах и/или поздних временах для моделирования собственного отклика незаземленной горизонтальной петли допустимо использовать эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами. Однако реальная петля является системой с распределенными параметрами. Провод петли в совокупности с подстилающей его землей образуют длинную линию, поведение тока в которой на высоких частотах и/или ранних временах описывается волновым уравнением. Параметры линии «провод – земля» сложным образом зависят от удельной электропроводности земли и частоты или времени.

На первый взгляд, длинная линия, образованная землей и расположенным на ней проводом, имеет мало общего с незаземленной горизонтальной петлей. Однако благодаря симметрии петля может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, которые включены последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена. Источник тока/напряжения также можно представить в виде комбинации двух идентичных последовательно соединенных источников, общая точка которых заземлена [Кожевников, 2009].

После отключения от батареи или генератора в петле возникают собственные колебания тока. Период этих высокочастотных колебаний определяет минимальное время, в течение которого может быть выключен ток в петле. Оно ограничивает начальное время измерений и, соответственно, минимальную глубину зондирований.

Способом, позволяющим «увидеть», что происходит в различных точках провода петли после ее отключения от батареи, является представление процесса выключения тока в виде суперпозиции волн, распространяющихся в противоположных направлениях в длинной линии, образованной проводом петли и подстилающей ее землей.

Процесс возникновения в петле собственных колебаний тока рассмотрен в [Кожевников, 2009]. На основе теории длинных линий предложена модель, с помощью которой удалось объяснить связь периода колебаний и постоянной времени затухания с параметрами провода, размерами петли и удельным электрическим сопротивлением подстилающих пород.

Если на входе петли обеспечить условия согласования, бегущие от центральной точки волны тока не отразятся на зажимах петли, и процесс выключения тока закончится. Этого можно достичь, если подключить к зажимам петли внешнее сопротивление, равное удвоенному характеристическому сопротивлению Z₀ линии «провод – земля», которое для расположенного на поверхности земли провода ГПМП, как показали специальные измерения, составляет около 350 - 400 Ом. На рис. 1а приведены мгновенные «снимки» распределения тока по периметру петли в фиксированные моменты времени. Как нетрудно видеть, в отличие от постулируемого в традиционной теории импульсной индуктивной электроразведки одновременного выключения тока во всех точках провода, на ранних временах имеет место запаздывание. Дополнительную информацию дают графики зависимости тока от времени, построенные для различных участков петли (рис. 1б). Из представленных на рис. 16 графиков видно, что время выключения тока в петле не может быть меньше полупериода собственных колебаний T/2.



Рис. 1. Процесс выключения тока в режиме согласования, когда к зажимам петли подключен резистор с сопротивлением, равным удвоенному характеристическому сопротивлению линии «провод петли – земля»:
а – распределение тока по периметру петли для фиксированных моментов времени *t*; б – графики тока в зависимости от времени в некоторых точках периметра петли. *T* – период колебаний; *P* – общая длина провода; *x* – расстояние, отсчитываемое вдоль провода от одного из зажимов петли. Отключение источника тока от петли происходит в момент времени *t* = 0

Рис. 1 иллюстрирует пространственно-временное распределение тока в идеальной петле, образованной линиями без потерь,. Однако, как показано в [Кожевников, 2009], при моделировании выключения тока в реальной петле расчет первичных параметров системы «провод петли – земля» должен проводиться с учетом: 1) взаимодействия каждой из двух линий, образующих петлю, с собственным током-изображением; 2) взаимного индукционного влияния линий; 3) скин-эффекта в проводе. Взаимное влияние линий приводит к зависимости их первичных параметров, и, соответственно, параметров петли в целом, от удельного электрического сопротивления земли.

Относительный вклад, вносимый в полное сопротивление провода за счет индуктивной связи между двумя линиями, меньше по сравнению с вкладом за счет скин-эффекта в земле. Однако именно эта составляющая зависит от удельного электрического сопротивления подстилающей среды, что делает возможной оценку удельного сопротивления и, возможно, поляризуемости ВЧР путем инверсии колебаний тока в петле. При измерениях в частотной области зависимость параметров петли от ВЧР ограничивает возможности контролировать ток в источнике.

Сопоставление результатов измерений и моделирования процесса выключения тока в режиме свободных колебаний для петли размером 200м х 200м показало хорошее соответствие между экспериментальными и модельными данными [Кожевников, 2009]. Ниже (рис. 2) приводятся результаты подобного сопоставления для петли размером 100м х 100м. Измерения выполнены на полигоне Института геофизики и метеорологии Кельнского университета [Helwig, Kozhevnikov, 2003]. Петля находилась в согласованном режиме (к ее зажимам был подключен резистор с сопротивлением 490 Ом) в точках с координатами x=0, 100 и 200м.

Эффекты запаздывания, которые для идеальной петли, образованной линиями без потерь, иллюстрирует рис. 1б, наблюдаются и в эксперименте. Вместе с тем в деталях имеются отличия, заключающиеся в том, что экспериментальные графики процесса выключения тока в разных точках периметра петли имеют более сложную форму. Вследствие частотной дисперсии первичных параметров реальной петли выключение тока в каждой точке ее периметра – за исключением зажимов – растянуто или «сглажено» по сравнению с таковым для идеальной петли. Кроме этого, в реальной петле в точках, близких к ее зажимам, наблюдаются кратковременные выбросы тока, однозначное объяснение которых на данном этапе исследований затруднено. Пока можно лишь предположить, что отмеченные выбросы появляются вследствие емкостной связи между близкими к зажимам петли участками провода и входом регистратора (в данном случае цифрового осциллографа с автономным питанием). Подобные явления или «эффекты» относятся к разряду системных помех; их изучение представляет собой самостоятельную проблему.



Рис. 2. Экспериментальные и модельные графики тока в квадратной петле с длиной стороны 100м, к зажимам которой подключен резистор
с сопротивлением 490 Ом (согласованный режим): *x*= 0 (а), 100м (б) и 200м (в). В момент *t*=0 с помощью быстродействующего электронного ключа зажимы петли отключаются от внешнего источника (батареи)

Приведенные на рис. 2 модельные графики тока получены путем ручного подбора. Отыскивались «наилучшие» значения параметров исследуемой системы, в том числе, удельное электрическое сопротивление нижнего полупространства, которое в данном случае оценивается величиной порядка 5 – 10 Ом·м, что по данным геоэлектрических исследований на участке работ соответствует удельному сопротивлению подстилающей геологической среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 13-05-00122 а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н.О. Применение теории длинных линий для исследования собственной переходной характеристики незаземленной горизонтальной петли // Геология и геофизика, 2009, т.50, №3, с. 300 – 316.

2. Stefan L. Helwig, Nicolai O. Kozhevnikov, 2003, Schwingungen in TEM Sendesignalen zu frühen Zeiten // 20 Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, 29.09.-3.10.2003, Hrsg.: A. Hördt und J.B. Stoll, 11 – 20. ISSN 0946-7467

© Н. О. Кожевников, В. В. Потапов, 2014

СОВОКУПНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО И ЛАТЕРАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ТОКСИЧНЫХ РАСТВОРОВ (Г. КАРАБАШ)

Татьяна Владимировна Корнеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, тел. (383)363-91-94, e-mail: KorneevaTV@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Олегович Кучер

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)363-91-94, e-mail: dmitriykucher89@gmail.com

Данная работа посвящена изучению и определению механизмов формирования, миграции и рассеяния токсичных элементов с водными потоками в латеральном и вертикальном масштабе в природно-техногенных системах современными геофизическими методами электротомографии в сочетании с данными геохимического анализа.

Ключевые слова: сульфидные хвостохранилища, кислый дренаж, электротомография, тяжелые металлы.

COMPLEX OF GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL APPROACHES USING FOR INVESTIGATION OF THE VERTICAL AND LATERAL DISTRIBUTION OF HIGHLY TOXIC SOLUTIONS (KARABASH DISTRICT)

Tatyana V. Korneeva

Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Academica Koptyga, 3, PhD of geology-mineralogical science, researcher, tel. (383)363-91-94, e-mail: korneevatv@ipgg.sbras.ru

Dmitry O. Kucher

Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Academica Koptyga, 3, PhD student, tel. (383)363-91-94, e-mail: dmitriykucher89@gmail.com

This research work is devoted to the investigation and determination of the mechanisms of formation, migration and dispersion of toxic elements in water in the lateral and vertical scale in the natural and technogenic systems by geophysical methods combined with geochemical analysis data.

Key words: mine wastes, acid mine drainage, deep electrical resistivity tomography, heavy metals.

В горнодобывающем производстве, цветной металлургии России накоплены десятки миллиардов тонн вскрышных пород, миллиарды тонн хвостов обогащения и сотни миллионов тонн металлургических шлаков. Негативное воздействие сточных вод хвостохранилищ обогатительных фабрик обусловлено загрязнением природных вод продуктами окисления минералов тяжелых металлов меди, свинца, цинка и железа. Примером города с катастрофической экологической ситуацией является г. Карабаш (Челябинская область), еще в 1989 г. признанный ООН «черной дырой планеты». Извлеченная на поверхность и складированная рудно - породная ассоциация с одной стороны неизбежно испытывает влияние природных факторов, трансформируясь под их воздействием, а с другой - сама оказывает активное влияние на окружающие ее природные компоненты.

Наибольшие концентрации тяжелых металлов содержатся в грунтовых и приповерхностных водах в основании хвостохранилища, в которые проникают значительные объемы фильтратов. В этой связи проблема оценки воздействия невостребованной части минерального сырья в процессе отработки месторождений на окружающую среду и здоровье человека весьма актуальна, так как рудные месторождения представляют собой природные геохимические аномалии, являющиеся потенциальными и реальными источниками токсичных элементов.

Объем и уровень минерализации поровых вод и растворов в грунте влияют на его удельное электрическое сопротивление, которое может быть быстро и достоверно измерено методами электротомографии. Основываясь на публикациях иностранных геофизиков можно сделать заключение о том, что различные геофизические методы применяются в Европе и США [1-3] для мониторинга загрязнений грунтовых вод жидкими отходами, контроля состояния насыпных дамб и других гидротехнических сооружений, обеспечивающих производственные процессы горнорудной и обогатительной промышленности уже более двадцати лет. Единичные работы по тему исследования опубликованы и в России [4,5]. Таким образом, сочетание комплекса геохимических и геофизических методов пока еще недостаточно распространено в области изучения и мониторинга техногенных процессов, и на этом пути работы нашего коллектива могут внести серьезный вклад в проблему определения масштабов и путей миграции кислого дренажа.

Конкретная цель в рамках сформулированной проблемы заключается в определении механизмов формирования, миграции и рассеяния токсичных элементов с водными потоками в латеральном и вертикальном масштабе в природно-техногенных системах современными геофизическими методами электротомографии в сочетании с данными геохимического анализа.

В скоплениях твердых отходов (шлакоотвалах, хвостохранилищах и т.д.), занимающих значительную часть городской территории Карабаша, сосредоточено до 27,7 млн. тонн дисперсного минерального вещества, главным образом, шлаков медеплавильного производства. Кроме того, в долине р. Сак-Елга сосредоточено скопление пиритсодержащих хвостов горнообогатительного производства общей площадью около 2,5 км². Кроме этого одним из основных источников загрязнения р. Сак-Елга является кислый дренажный ручей «Рыжий» (левый приток), собирающий загрязненные поверхностные и подземные воды с территории медеплавильного комбината и отработанных хвостохранилищ (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб на территории г. Карабаша

Кислый дренажный ручей на техногенном участке относится к сульфатнохлоридному классу с высоким содержанием типоморфных для Карабашской геотехнической системы металлов – Fe (180 мг/л), Al (65 мг/л), Zn (65 мг/л), Mn (40 мг/л), Cu (30 мг/л):

$$M_{4.5} \frac{SO_4^{2-}73 \text{ Cl}^{-}27}{Mg^{2+}38 \text{ Ca}^{2+}29 \text{ Fe}11 \text{ Al}^{3+}9 (\text{Zn}^{2+} + \text{Mn}^{2+} + \text{Cu}^{2+})7 \text{ Na}^{+}6} \text{ pH2.54}$$

Для водной пробы из фонового участка (р. Сак-Елга до Богородского пруда) характерен гидрокарбонатный класс кальций-натрий-магниевый тип вод, слабая минерализация и общая сумма тяжелых металлов в растворе 0.9 мг/л, что ниже, чем в техногенном ручье в 420 раз.

$$M_{0.08} = \frac{HCO_3^-74}{Ca^{2+}41} \frac{Cl^-13.5}{Na^+27} \frac{SO_4^{2-}12.5}{Mg^{2+}26K^+6}$$
рH7.2 Фон

$$M_{0.28} = \frac{Cl^{-}66 HCO_{3}^{-}20 SO_{4}^{2-}14}{Ca^{2+}45 Mg^{2+}29 Na^{+}22 K^{+}4}$$
рН6.45 р. Сак-Елга до впадения ручья

$$M_{1.5} = \frac{SO_4^{2-}64 \text{ Cl}^- 34 \text{ HCO}_3^- 2}{Ca^{2+} 43 \text{ Mg}^{2+} 41 \text{ Na}^+ 14 \text{ K}^+ 2} \text{ pH5.25}$$
 р. Сак-Елга после впадения ручья

Благодаря щелочному барьеру, значения pH воды на участке смешения с рекой Сак-Елга возрастают (pH=5.25), хотя сохраняется повышенное содержание тяжелых металлов, превышающие ПДК для водных объектов хозяйственно - питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК, ГН 2.1.5.1315-03) на 2-3 порядка.

При повышении pH в зоне смешения происходит гидролиз Fe и Al, начинают выпадать многочисленные гидроксидно-железистые охры и гидроксиды Al, что наблюдается на участках замедленного течения. Значительная часть металлов сорбируется новообразованными гидроксидами, вследствие чего они выводятся из миграционного цикла. Содержание Al уменьшается в 1500 раз, Fe – в 3 раза, Cu – в 7 раз и Zn – в 5 раз. Часть металлов (Cu, Zn, Ni, Mn, Cd) продолжает мигрировать преимущественно в свободной ионной форме (50-70 %) и в виде нейтральных сульфатных комплексов CuSO₄⁰, ZnSO₄⁰ (до 30 %). В результате сорбции подвижность металлов при переходе из донных осадков в раствор существенно снижается:

1) Рыжий ручей (pH=2.54): (Cd,Zn)_{1.2}>Cu_{1.4}>Mn_{1.6}>Ni_{1.8}>Fe_{3.4};

2) Зона смешения (pH=5.25): Cd₂>Mn_{2.1}>Zn_{2.2}>Cu₃>Fe_{3.3}>Ni₄.

Зоны с пониженным сопротивлением указывают на участки, поровое пространство которых заполнены высокоминерализованными растворами. Эти низкоомные зоны распространяются до глубины 1-15 метров (рис. 2).



Рис. 2. Вертикальный геоэлектрический разрез в зоне распространения дренажного потока

Учитывая, что это хвостохранилище расположено в пойме реки, можно заключить, что токсичные растворы, образующиеся при взаимодействии поверхностных вод с сульфидным веществом, проникают в грунтовые воды, просачиваясь сквозь вещество отвалов. В подтверждение этому были взяты пробы воды из скважины до глубины 15 метров. Анализ показал, что концентрации тяжелых металлов увеличиваются с глубиной (табл. 1).

Согласно полученным анализам, концентрации токсичных металлов превышают значения ПДК для водных объектов в десятки и сотни раз. Химические формы нахождения тяжелых металлов в грунтовых водах на хвостохранилище вблизи г. Карабаш, находятся преимущественно в сульфатной и акваионной формах, что свидетельствует о возможности их последующей активной миграции.

Таблица 1

Глубина	5 м	10 м	15 м
pН	6.15	4.5	4.2
Fe	190	220	220
Cd	0.07	0.1	0.2
Со	<0.2	1.3	1.8
Cu	<0.3	1.4	6.0
Ni	<0.3	7.7	12.2
Pb	<0.5	0.8	1.0
Zn	<0.2	5.8	10.4

Результаты химического анализа вод из скважины на территории неорганизованного хвостохранилища «Пиритовые пески» Карабашской ГТС

Таким образом, совокупность данных электроразведки и геохимического опробования свидетельствуют о распространении высокоминерализованных растворов на глубину около 15 метров, несмотря на то, что мощность самих пиритовых песков составляет порядка 1 м. В результате загрязняются грунтовые воды, концентрации химических элементов в подвижных формах превышают предельно-допустимые в десятки и сотни раз.

Геоэлектрические разрезы на пиритовых песках демонстрируют, наряду с прониканием в грунтовые воды, латеральное распространение низкоомных зон, а, следовательно,- и обводнённого вещества, которое в данном случае может быть названо «кислотной волной». Действие «кислотной волны» можно зафиксировать, делая ежегодные наблюдения за изменением ландшафта на территории, прилегающей к хранилищу: частичное, затем полное исчезновение растительности всё дальше и дальше от хвостохранилища

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-05-33019 мол_а_вед и № 12-05-31137 мол_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // Journal of Geochemical Exploration. – 1995. - V. 52. - P. 5-23.

2. Lottermoser B.G. Mine Wastes: Characterization, Treatment, Environmental Impacts // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 304 p.

3. Leybourne, M.I.; Goodfellow, W.D. Geochemistry of surface waters associated with an undisturbed Zn-Pb massive sulfide deposit: Water-rock reactions, solute sources and the role of trace carbonate // Chemical Geology. - V. 279 issue 1-2 December 3, 2010. - P. 40-54.

4. 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, the handbook of environmental chemistry // Springer Berlin Heidelberg, ISSN: 1867-979X (Print) 1616-864X (Online), DOI: 10.1007/698_2013_234, 2013.

5. Юркевич Н. В., Саева О. П., Карин Ю. Г. Хвостохранилища горнорудного производства: построение связи между данными геофизической съемки и химическим составом (на примере отходов Салаирского горнообогатительного комбината, г. Салаир) // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». – Томск, 2012. – С. 283–287.

© Т. В. Корнеева, Д. О. Кучер, 2014

УДК 550.4.07; 543.067.5; 543.064

СИСТЕМА ОБОГАЩЕНИЯ / РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОГО ВНЕЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЛЕДОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТИЛМЕРКАПТАНА И ДИМЕТИЛСУЛЬФИДА В ВОЗДУХЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНОГОМАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ХИМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Андрей Сергеевич Кудрявцев

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории спектрометрии, тел. (383)333-30-32, e-mail: kudryavcevas@ipgg.sbras.ru

Алексей Леонидович Макась

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, заведующий лабораторией спектрометрии, тел. (383)333-30-32, e-mail: ma-kasal@ipgg.sbras.ru

Сергей Павлович Подъячев

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории спектрометрии, тел. (383)333-30-32, e-mail: podyachevsp@ipgg.sbras.ru

Михаил Львович Трошков

ИНГГ СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории спектрометрии, тел. (383)333-30-32, e-mail: troshkovml@ipgg.sbras.ru

Разработан метод для быстрого одновременного определения метилмеркаптана и диметилсульфида в воздухе. Метод включает улавливание аналита на концентратор с силикагелем с последующей прямой флэш термодесорбцией, быстроехроматографическое разделение и детектирование масс-спектрометром с химической ионизацией при атмосферном давлении. При пробоотборе воздуха пары воды из пробы удаляются с помощью мембраны Nafion. Время одиночного цикла анализа составляет 3 минуты. Порог обнаружения при объеме пробы 0,6 л – 1 ррвдля метилмеркаптана и 0,2ррв для диметилсульфида.

Ключевые слова: внелабораторный анализ, мобильный масс-спектрометр, метилмеркаптан, диметилсульфид, химическая ионизация при атмосферном давлении.

ENRICHMENT / SEPARATION SYSTEM FOR FAST ON-SITE DETERMINATION OF METHYL MERCAPTANAND DIMETHYL SULPHIDE IN AIR BY MOBILE MASS SPECTROMETER WITH ATMOSPHERIC PRESSURE CHEMICAL IONIZATION

Andrey S. Kudryavtsev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., junior scientist, Laboratory of spectrometry, tel. (383)333-30-32, e-mail: kudryavcevas@ipgg.sbras.ru

Alexey L. Makas

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., PhD, the Head of Laboratory of spectrometry, tel. (383)333-30-32, e-mail: makasal@ipgg.sbras.ru

Sergey P. Podyachev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., PhD, junior scientist, Laboratory of spectrometry, tel. (383)333-30-32, e-mail: podyachevsp@ipgg.sbras.ru

Mikhail L. Troshkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., scientist, Laboratory of spectrometry, tel. (383)333-30-32, e-mail: troshkovml@ipgg.sbras.ru

A method for fast simultaneous on-site determination of methyl mercaptan and dimethyl sulfide in air was developed. The target compounds were actively collected on silica gel, followed by direct flash thermal desorption, fast separation on a short chromatographic column and detection by means of mass spectrometer with atmospheric pressure chemical ionization. During the sampling of ambient air, water vapour was removed with a Nafion selective membrane. The measurement cycle is about 3 min. Detection limits in a 0.6 L sample are 1 ppb for methyl mercaptan and 0.2 ppb for dimethyl sulfide.

Key words: on-site analysis, mobile mass-spectrometer, methyl mercaptane, dimethyl sulphide, atmospheric pressure chemical ionization.

Восстановленные соединения серы (ВСС) оказывают сильное влияние на глобальную химию атмосферы, играют важную роль в образовании атмосферных аэрозолей, и, в конечном счете, в процессах изменения климата. В связи с этим активно изучается распространение в природной среде диметилсульфида (Me₂S). Установлено, что он вырабатывается морским фитопланктоном и водорослями и является одним из основных каналов цикла серы [1]. Эмиссия метилмеркаптана (MeSH) из океана менее изучена, однако KettleJ.A. с соавторами [2], проведя массивные измерения, установил, что его поток из океана в атмосферу на разных территориях составляет долю от 0,1 до 1 от потока Me₂S. Из чего предположено, что MeSH является вторым по значимости поставщиком из океана в атмосферу биогенной серы и в дальнейших исследованиях должен изучаться более тщательно.

Источники эмиссии ВСС могут быть как природными, так и антропогенными. Естественная концентрация их находится на уровне ниже ppb. Однако небольшое превышение этого уровня в воздухе населенных пунктов из-за выбросов предприятий переработки отходов и животноводческих комплексов может вызывать проблемы для местных жителей, поскольку эти вещества являются дурнопахнущими и характеризуются крайне низким порогом восприятия их запаха. MeSH и Me₂S также являются основными компонентами выбросов в атмосферу целлюлозно-бумажного производства. Уровень концентраций ВСС регулируется в развитых странах. ПДК MeSH в атмосферном воздухе населенных мест в Российской Федерации, согласно Государственным гигиеническим нормативам, составляет 0,006 мг/м³ (около 3 ppb). Помимо упомянутых аспектов определение низких концентраций ВСС актуально при контроле примесей в природном газе и качества аромата многих напитков и пищевых продуктов, связанного с наличием Me₂S и MeSH.

Количественное определение низких концентраций ВСС в воздухе затрудняется из-за их высокой реакционной способности, адсорбционных и фотоокислительных свойств, осложняющих корректную пробоподготовку. Вследствие этого применение полевых методов "on-site" анализа становится необходимостью, а разработка соответствующих методов и аппаратуры являются актуальными.

Определение следовых концентраций ВСС в воздухе выполняется преимущественно с применением газовой хроматографии [3]. К.Тода с коллегамиразработали устройство для автоматического определения концентрации ВСС в воздухе на основе газовой хроматографии с детектором с озон-индуцированной хемилюминесценцией, которое было апробировано в полевых условиях при размещении на судне и в автомобиле в районе озера Байкал, Восточная Сибирь [4]. Описанный метод и устройство позволяют выполнять в автоматическом режиме циклическое определение Me_2S и MeSH с периодичностью 15 минут и линейным откликом в диапазоне 1 - 25 ppb.Однако в ходе его апробации выявлено влияние сероводорода на точность измерения метилмеркаптана, что требует предварительного удаления этого вещества из пробы.

Применение масс-спектрометрического детектирования при определении примесей в воздухе повышает достоверность и специфичность аналитического метода, особенно в случае сложной матрицы, а также, позволяет расширять перечень контролируемых веществ.

Целью данной работы явилась разработка метода одновременного определения Me₂S и MeSH в воздухе на уровне 1ppb на базе мобильного массспектрометра с химической ионизацией при атмосферном давлении ХИАД, разработанного нами ранее [5].

В ходе предварительных масс-спектрометрических исследований былоустановлено, что: 1) эффективность ионизации MeSH в воздухе сильно зависит от влажности газа-носителя; 2) исследуемые аналитыпри ионизации методом ХИАД в результате процессов фрагментации и катионизацииобразуют подобные по массе ионы, что при одновременном их определении приводит к ошибкам в определении концентрации.

Для устранения эффектов взаимного влияния и для обеспечения оптимальных условий для ионизации была применена стадия предварительного хроматографического разделения с короткой кварцевой капиллярной колонкой (PoraplotQ, 2 м х 0,32 мм) и осушенным воздухом в качестве газа-носителя. Для обеспечения необходимого порога обнаружения была использована предварительно разработанная система обогащения с прямой флэш термодесорбцией[6]. Основной особенностью данной системы является то, чтовследствие быстрого баллистического нагрева концентратора происходит десорбция и полный перенос летучих компонент пробы в хроматографическую колонку за время порядка 1 секунды, что устраняет необходимость дополнительной фокусировки. В качестве сорбента был выбран силикагель. Большое количество воды, неизбежно уловленное сорбентом из воздуха вместе с аналитами, негативно влияет на характеристики анализа: при быстрой десорбции воды перегружается хроматографическая колонка. Для устранения этого применялось предварительное удаление большей части паров воды из пробы с помощью модуля осушки на основе мембраны Nafion (PermaPure).

Схема предложенного метода, включающегопредварительную осушку пробы, систему обогащения/разделения и масс-спектрометрическое детектирование, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема определения метилмеркаптана и диметилсульфида

Вход ГХ колонки, подсоединенный к устройству ввода, находится при атмосферном давлении, ее выход герметично присоединен к области разряда источника ионов, и поток через нее обеспечивается разрежением этой области. В область разряда источника ионов через дроссель подается дополнительный поток газа-носителя. Газовое сопротивление этого дросселя регулирует разрежение и определяет поток через колонку.

Для определения оптимального объема пробы был экспериментально исследован проскок более летучего MeSH при отборе воздушной пробы через концентратор, содержащий 10 мг сорбента. При объеме пробы 600 см³ при температуре окружающего воздуха 20°С теряется не более 1,5% аналита. При входном потоке 20 см³/мин и ширине хроматографического пика MeSH - 5с коэффициент обогащения составляет 360. Насыщение концентратора достигается при объеме пробы около 2 л, при этом коэффициент обогащения составляет 700. Типичноевремяудерживанияпритемпературеколонки 40°C составляло 25 с для MeSH и 120 с для Me₂S. С помощью аттестованных источников микропотокаотклик был прокалиброван в диапазонах для Me₂S 0,1 ÷ 10,4 ppb и для MeSH 1,1 ÷ 112 ppb. Калибровочные кривые в диапазоне 1 – 12 ppb приведены на рис. 2. Линейность отклика наблюдалась во всем исследуемом диапазоне концентраций. Поскольку используется изотермический режим разделения, к моменту завершения хроматографического цикла ГХ система и концентратор с новой пробой готовы для следующего анализа.Время цикла анализа составило 3 минуты. Пример периодического анализа смеси Me₂S и MeSH в воздухеприведен на рис. 3.







Рис. 3. Пример периодического анализа модельной смеси метилмеркаптана и диметилсульфида в воздухе с временем цикла 3 минуты. Масс-хроматограмма по ионамадуктам [М+Н]⁺и результаты определения концентрации

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. T.S. Bates, B. K. Lamb, A. Guenther, J. Dignon, R. E. J. Stoiber Sulfuremissionstotheatmosphere from natural sources // J. Atmos. Chem. – 1992. – 14. – p. 315–337.

2. A.J. Kettle, T.S. Rhee, M. von Hobe, A. Poulton, J. Aiken, M.O. Andreae Assessing the flux of different volatile sulfur gases from the oceanto the atmosphere // Journal of Geophysical Research : Atmospheres. - 2001. - 106. - p. 12193-12209.

3. S.K. Pandey, K.H. Kim A review of methods for the determination of reduced sulfur compounds (RSCs) in air // Environ. Sci. Technol. -2009. -43. - p.3020-3029.

4. K. Toda, T. Obata, V.A. Obolkin, V.L. Potemkin, K. Hirota, M. Takeuchi, S. Arita , T.V. Khodzher, M.A. Grachev, Atmospheric methanethiol emitted from a pulp and paper plant on the shore of Lake Baikal // Atmospheric Environment. – 2010. - 44. p. 2427-2433.

5. A.L. Makas, M.L. Troshkov, A.S. Kudryavtsev, V.M. Lunin, Miniaturized mass-selective detector with atmospheric pressure chemical ionization // Journal of Chromatography B. - 2004. – 800. – p.63-67.

6. A.L. Makas, M.L.Troshkov, Field gas chromatography – mass spectrometry for fast analysis // Journal of Chromatography B. –2004. – 800. - p.55-61.

© А. С. Кудрявцев, А. Л. Макась, С. П. Подъячев, М. Л. Трошков, 2014

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ АМУРСКОЙ ПЛИТЫ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Ольга Анатольевна Кучай

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-8705, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Мария Евгеньевна Козина

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка 4 курса, тел. (383)330-8705, e-mail: kozinamaria@gmail.com

Особенности сейсмотектонических деформаций Азии, полученные по данным механизмов очагов сильных землетрясений (М>4.9), позволили выделить Амурскую плиту. Земная кора Амурской плиты испытывает деформации преимущественно меридионального удлинения и широтного укорочения. Условная граница проходит по 103 меридиану, на северовостоке – южнее Станового хребта. Максимальные значения диагональных компонент тензора деформаций Амурской плиты отличаются от значений для западных территорий.

Ключевые слова: сейсмотектонические деформации, механизм очага, Амурская плита.

DETERMINATION OF THE BOUNDARY OF THE AMUR PLATE BY SEISMOLOGICAL DATA

Olga A. Kuchai

Institute of Petroleum Geology and Geophysics. A. A. Trofimuk SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptyuga, 3, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, tel. (383)330-8705, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Maria E. Kozina

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, ul. Pirogova, 2, student 4 kursa, tel. (383)330-8705, e-mail: kozinamaria@gmail.com

Particularities of the seismotectonic deformations of Asia which were received based on focal mechanisms of the earthquakes (M> 4.9), allowed to distinguish the Amur plate. The crust of the Amur plate undergoes deformation predominantly meridional lengthenings and latitudinal shortenings. Conventional boundary runs along the meridian of 103, in the north - south Stanovoy range. Maximum values of the diagonal components of the strain tensor of the Amur plate different from the western territories

Key words: seismotectonic deformation, focal mechanisms of the earthquakes, Amur plate.

Азия давно привлекает внимание геофизиков и геологов разнообразием геодинамических условий и возникновением сильнейших землетрясений. Многочисленные работы как у нас, так и за рубежом свидетельствуют о неослабевающем интересе к проблеме напряженно-деформированного состояния земной коры и мантии [Гущенко и др., 1977; Петров и др. 2008; Ризниченко и др. 1982; Zoback, 1992; Трифонов и др., 2002; Актуальные..,2005, Ребецкий, 2007; Sloan and al., 2011;]. Известны работы китайских и зарубежных авторов, получивших обширные данные по смещению пунктов наблюдения GPS [Guoyu, 1997; Calais et al, 2002; Huang Liren et al, 2003; Han Zhujun et al, 2003; Li Q et al, 2012]. Набольший интерес вызвали статьи, связанные с выделением Амурской плиты [Steblov et al, 2003; Petit and Fournier, 2005; Apel et al, 2006] и вычислением полюса её вращения [Ашурков и др., 2011; Тимофеев и др., 2007]. Существует целый ряд статей, где граница по 105 меридиану между западной и восточной частями Китая трассируется по повышенной зоне сейсмичности, а также выделяется по геологическим критериям. Одним из первых в нашей стране на данную проблему обратил внимание А.Ф.Грачев [Грачев и др., 1993].

В данной работе мы несколько по иному подойдем к анализу деформированного состояния земной коры Азии. Обычно рассматривается ориентация главных осей напряжений и деформаций. Мы же исследуем поля вертикальных, меридиональных и широтных компонент сейсмотектонических деформаций, рассчитанных в географической системе координат по методу Ризниченко Ю.В.. [Ризниченко, 1985]. Такой подход позволит по-новому взглянуть на особенности деформирования объемов горных масс Азии.

Представленные в этой статье сейсмотектонические деформации рассчитаны по данным о 1480 механизмах очагов землетрясений с М=4.6-8.0, происшедших в Азии за период с 1976 по 2012гг. Использовались только данные полученные из каталога СМТ [http://www.globalcmt.org/CMTsearch.htm] и для Якутии [Имаев и др., 2009]. Размер площадок осреднения соответствовал по широте и долготе 1° и глубине 30км. Расчеты компонент деформаций для ячеек осреднения проводились методом скользящего окна с шагом 0,5°. В нашем случае при построении карт для нас важным были не сами величины деформаций, а их знак, т.е. положительные значения деформаций соответствовали относительному удлинению, отрицательные значения деформаций – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов земной коры в соответствующих направлениях. Построены карты полей широтной, меридиональной и вертикальной компонент сейсмотектонических деформаций, а также карта максимальных значений деформаций. Выполнение последней карты состояло в следующем. Из диагональных компонент тензора сейсмотектонических деформаций в каждом окне осреднения выбирались наибольшие значения по абсолютной величине. Строилась карта с учетом знака деформации.

Анализ результатов расчета диагональных компонент тензора сейсмотектонических деформаций, полученных по данным механизмов очагов сильных землетрясений, показывает, что земная кора западной части района испытывает деформации преимущественно широтного удлинения и меридионального укорочения (рис.1А, В). В западную часть зоны входит территория Тянь-Шаня, Таримского массива, Тибета, Памиро-Каракорума, Кунь-Луня. Земная кора восточной части района характеризуется деформациями преимущественно широтного укорочения и меридионального удлинения. Восточная часть включает Северо-Китайскую равнину и прилегающие к ней с запада, севера и юга территории. В поле широтной компоненты, границу удается провести по 95 мери-

диану и далее она огибает Нань Шань и восточный Кунь Лунь (рис.1А). В поле меридиональной компоненты граница, разделяющая восточную и западную части Азии проходит по 103 меридиану, образуя петлю, вклинивающуюся в юго-восточную территорию Тибета, и отторгая ее в восточную часть, что четко прослеживается на рисунке 1В. Таким образом, получается, что территория между 95 и 103 меридианами находится в условиях широтного и меридионального укорочения. В многочисленных статьях [Steblov et al, 2003; Apel et al, 2006; Ашурков и др., 2011; Тимофеев и др., 2007] граница трассируется по 105 меридиану, определяя западную границу Амурской плиты. По нашим данным эта граница располагается по 103 меридиану. На северо-западе граница Амурской плиты проходит по Байкальской рифтовой зоне, с чем согласны все исследователи. По нашим материалам на северо-востоке граница прослеживается южнее Станового хребта (рис. 1 А, В). Выделить южную границу Амурской плиты при данном исследовании затруднительно, возможно, она может проходить значительно южнее, чем это предполагается на карте геологической службы США [http://www.globalcmt.org/CMTsearch.htm].



Рис. 1. Поле широтной (А) и меридиональной (В) компонент сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений: А - Темным цветом показаны области относительного удлинения в широтном направлении, светлым – относительного укорочения также в широтном направлении. В - Темным цветом показаны области относительного удлинения в меридиональном направлении, светлым – относительного укорочения в том же направлении. Штриховкой отделены области с разным характером деформаций.

Данные, полученные по расчету сейсмотектонических деформаций, сопоставлялись с широтными и меридиональными компонентами, определенными по материалам космической геодезии и приведенными в статье [Li Yanxing и др., 2001]. Авторы статьи разделили район исследования на блоки, оконтуренные крупными разломами. В пределах каждого блока рассчитывались компоненты плоского тензора деформаций [Li Yanxing и др., 2001]. Предварительно было снято жесткотельное вращение плиты. Результаты по данным космической геодезии показывают, что приповерхностные территории западной части района характеризуются широтным удлинением и меридиональным сокращением, и согласуются с сейсмологическими материалами. Для восточной части исследуемой области также обнаруживается совпадение в деформировании поверхностных и глубинных объемов земной коры: широтного укорочения и меридиональное удлинение.

Карты максимальных и минимальных значений сейсмотектонических деформаций, получены в географической системе координат. В Тянь-Шане характерным является чередование областей максимального меридионального укорочения и максимального вертикального удлинения, на западном Тибете преимущественного максимального широтного удлинения и небольших районов максимального вертикального укорочения. В восточном Тибете преобладают максимальные меридиональные удлинения и широтные укорочения. Далее от 103 меридиана вся восточная часть зоны характеризуется чередованием областей с максимальным широтным укорочением и максимальным меридиональным удлинением вплоть до Станового хребта на севере. Территория Станового хребта и северо-восточные районы характеризуется максимальным меридиональным укорочением, Байкал - максимальным вертикальным укорочением. Получается, что западная и восточная часть отличаются и по характеру максимальных значений диагональных компонент деформаций.

Таким образом, рассчитанные компоненты тензора сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений показывают меридиональные укорочения и широтные удлинения объемов земной коры в западной части Азии и меридиональные удлинения и широтные укорочение в восточной части. Выделенная по сейсмологическим данным условная граница подтверждается и на материалах, рассчитанных по GPS. Между этими зонами выделяется условная граница, проходящая в пределах 95 и 103 меридианов и, повидимому, связанная с давлением Индийской плиты с юга в северном направлении и Охотоморской и Филиппинской плит с востока в западном направлении. Эта условная граница является зоной контакта двух основных направлений горизонтального давления на Азиатский континент [Грачев и др., 1993]. В тоже время эта граница по 103 градусу может свидетельствовать о предельной зоне влияния Индийской плиты и ее положение согласуется с границей Амурской плиты,

Работа выполнена в рамках Интеграционных проектов СО РАН №76 и № 90.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии /под ред. К.Г.Леви, С.И.Шерман, Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005, 297 с.

2. Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS геодезии //Геология и геофизика, 2011, №2, С. 299-311.

3. Гущенко О.И., Степанов В.В., Сим Л.А. направление действия современных мегорегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей юга Евразии //Докл. АН СССР, 1977. Т. 234. № 3. С.556-559.

4. В.С. Имаев, Л.П. Имаева, К. Маккей, Б.М. Козьмин Геодинамика отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии // Геофизические исследования, 2009, том 10, № 1, с.44-63

5. Петров В.А., Niu Anfu, Смирнов В.Б., Мострюков А.О., Li Zhixiong, Jiang Zaisen, Shen Xuhui Поле тектонических напряжений по механизмам очагов землетрясений

6. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов // М. : Академкнига, 2007. 406 с.

7. Ризниченко Ю.В., Соболева О.В., Кучай О.А., Михайлова Р., Васильева О.Н. Сейсмотектоническая деформация земной коры юга Средней Азии. // Физика земли. 1982, № 10, с. 90-102.

8. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М. Наука, 1985, 407с.

9. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.А., Горнов П.Ю., Шевченко Б.Ф., Бойко Е.В. Внутриплитные современные движения по GPS данным //Материалы совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса», 2008, Выпуск 5, Т.2, Иркутск: ИЗК СО РАН, С. 121-122.

10. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М: ГЕОС.2002. 220 с.

11. E. V. Apel, R. Bu[¬]rgmann, G. Steblov, N. Vasilenko, R. King, and A. Prytkov Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geo-phys. Research Letters, vol. 33, 111303, 2006

12. Calais, E., M. Vergnolle, V. San'kov, A. Luknev, A. Miroshnitchenko, S. Amarjargal, and

J. De'verche're, GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994 –2002): Implications for current kinematics of Asia //J. Geophys. Res., 108, doi:10.1029/2002JB002373

13. Ding Guoyu Seismotectonic research in China //Episodes, June 1997, Vol. 20, No 2, p.79-

14. Huang Liren, Fu Yang, Duan Wuxing, Ma Qing, Ma Xin Active tectonic boundaries of the China mainland inferred from GPS observations chinese //J. of Geophysics Vol.46, No.5, 2003, pp: 874-882

15. Li Yanxing, Hu Xikang, Shui Ping, Ge Liangquan, Hudng Cheng, Zhu Wenyao, Hu Xiaogong The Current Strain Fields in the Continent of China and its Adjacent Areas from GPS Measurement Results//Proceeding of the Fourth Workshop, 14-19 May 2001, p.113-123, ISBN 7-5323-6674-x

16. Li Q, You X Z, Yang S M, et al. A precise velocity field of tectonic deformation in China as inferred from intensive GPS observations. Sci China Earth Sci, 2012, 55: 695–698, doi: 10.1007/s11430-012-4412-5

17. C. Petit and M. Fournier Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling *//Geophys. J. Int.*, 2005 V. 160, p. 357-369

18.G. M. Steblov, M. G. Kogan, R. W. King, C. H. Scholz, R. Burgmann and D. I. Frolov5 Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // Geophys. Research Letters, vol. 30, N 18, doi:10.1029/2003GL017805 2003

19.Mary Zoback First- and second-order patterns of stress in the lithosphere' the world stress map project //J. of Geoph. Research, vol. 97, no. b8, pages 11,703-11,728, july 30, 1992

20.Han Zhujun, Xu Jie , Ran Yongkang, Chen Lichun, Yang Xiaoping Active blocks and strong seismic activity in North China region//Science in China (Series D), Vol. 46, October 2003 p.153-167, doi: 10.1360/03dz0012

© О. А. Кучай, М. Е. Козина, 2014

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД НА ЮЖНОМ СКЛОНЕ КУРАЙСКОГО ХРЕБТА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Анастасия Александровна Лапковская

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: lapkovskaya.a.a@gmail.com

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Приведены результаты площадных геофизических исследований в высотномпоясе распространения многолетнемерзлых пород. Выявлены особенности строения мёрзлой толщи в зоне тектонического нарушения. Показано, что зона разлома является азональным фактором, нарушающим высотную поясность в строении ММП.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые породы, электротомография, магниторазведка-Горный Алтай, Курайский хребет, тектонические нарушения, талик.

PARTICULAR OF DISTRIBUTION MOUNTAIN PERMAFROST ON THE SOUTHERN SLOPE OF THE KURAI RIDGE (GORNY ALTAI) FROM GEOPHYSICAL DATA

Anastasia A. Lapkovskaya

Novosibirsk State University, National Research, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogov, 2, e-mail: lapkovskaya.a.a@gmail.com

Vladimir V. Olenchenko

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., senior staff scientist, tel. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

The results of areal geophysical studies in high-altitude permafrost zone. Shows peculiarities of the structure permafrost in zone tectonic dislocations. It is shown that the fault zone is azonal factor break altitude zonation in the structure of permafrost.

Key words: permafrost, geophysics, electric resistivity tomography, magnetometry, Altai Mountains, Kurai ridge, tectonic faults, talik.

Многолетнемёрзлыетолщи занимают огромные (более 65%) территории в России и являются одним из факторов природной среды, усложняющих условия строительства и эксплуатации зданий и инженерных сооружений. Поэтому изучение строения и особенностей распространения многолетнемерзлых пород актуально как при инженерных изысканиях под строительство, так и при фундаментальных геокриологических исследованиях.

Многолетнемёрзлые породы (ММП) характерны для высоких широт, но встречаются в низких широтах в высокогорных районах (выше 500 м над уровнем моря)[3].На территории России горная мерзлота широко проявлена в Горном Алтае. В этом районе понижение среднегодовых температур, увеличение мощности и сплошности мерзлоты происходит в соответствии с основными географическими закономерностями – широтной зональностью и меридиональной секторностью изменения природно-климатических условий в современный период, т.е. с юго-запада на северо-восток [7]. Однако на строение мерзлой толщи существенное влияние оказывают активный гидрогеологический режим и повышенный тепловой поток в зонах тектонических нарушений[4]. Также строение ММП зависит от величины снежного покрова и экспозиции склона[4]. Горный Алтай относится к сейсмически активной территории с большим количеством активных тектонических нарушений [7]. Несомненно, активный тектонический режим должен оказывать влияние на строение ММП в данном регионе.

Изучение особенностей строения ММП в зоне тектонических нарушений было проведено на южном склоне Курайского хребта, в 8 км к северо-западу от п. Курай.

Изучаемая территория относится к высотному поясу прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Хребет сложен метаморфическими породами протерозоя и ордовика, на южном склоне выходят континентальные рыхлые осадки палеогена и неогена[2]. Максимальная глубина промерзания 4-5м, глубина максимального протаивания - 4,6м. Мощность многолетнемёрзлых толщ в районе рудника Акташ на высоте 2400-2800 м достигает 150-160м, в то время как в Курайской степи на высоте 1500 м мощность ММП составляет 22 м[7].

В ходе проведения работ решались следующие задачи: выделение границ распространения мёрзлых пород, картирование тектонических нарушений, изучение влияния тектонических нарушений на распределения горной мерзлоты, определение мощности мёрзлых пород, определение мощности слоя сезонного оттаивания.

Для решения поставленных задач применялся комплекс методов, состоящий из вертикального электрического зондирования в модификации электротомографии (ЭТ) и магниторазведки.

С помощью магниторазведки изучались структурно-геологические особенности участка и выделялись тектонические нарушения. Измерения магнитного поля выполнены магнитометром GSM-19 с одновременной регистрацией вариаций магнитометром GSM-19T.

Технология электротомографии применялась для определения морфологии многолетнемёрзлой толщи. Для работы методом электротомографии использовалась многоэлектродная электроразведочная станция «СКАЛА-48»[1]. Измерения проводились установкой Шлюмберже с максимальными разносами 235 м.

Сеть наблюдений для магниторазведки состояла из пяти профилей длиной 700 м, расположенных на расстоянии 200 м друг от друга. По четырем из этих профилей выполнены зондирования ЭТ. Длина профилей ЭТ составила 835 м.

Ещё один профиль ЭТ протяжённостью 835м проходил на постоянной высоте по изогипсе 2200 м для исключения влияния фактора высотной поясности на распространение мёрзлых пород.

По результатам площадных исследований были построены карта изодинам магнитного поля и погоризонтные планы изоом.

По геоморфологическим и геофизическим признакам на участке исследований было выделенонесколько разнопорядковых тектонических нарушений и проанализировано поведение слоя высокого сопротивления, интепретируемого как многолетнемёрзлые породы.

Влияние тектоники на распространение мерзлоты наглядно проявляется на поперечном профиле. Профиль пересекает первопорядковое тектоническое нарушение вкрест простирания. Зона разлома выделяется на графике магнитного поля интенсивным минимумом шириной около 200 м (1 а).





 а) график приращения полного вектора магнитной индукции; б) геоэлектрический разрезв) интерпретация: 1-многолетнемёрзлые породы; 2 – рыхлые склоновые отложения; 3 – разломная зона

В области магнитного минимума горные породы в геоэлектрическом разрезе характеризуются пониженными (< 500 Ом·м)УЭС (1 б), что дает основание интерпретировать их как зону дробления (1 в). Для рыхлых отложений склона в приповерхностной части разреза характерны низкие значения сопротивлений (<300 Ом·м). Это грунты сезонноталого слоя.

Ярко выраженная высокоомная область(>1500 Ом⋅м) на первых 200 м профиля соответствует сплошной толще многолетнемерзлых пород, мощность которых оценивается в 15-20 м. Далее по профилю высокоомная толща становится прерывистой, что говорит обостровном характере распространения ММП.

Изменение характера распространения ММП со сплошного на островной объясняется деструкцией ММП в зоне разлома и образованием талика в результате воздействия активногогидрогеологического режима. Кроме того, зона дробления выражена в рельефе отрицательной формой, где происходит накопление снежного покрова в зимний период, который препятствует промерзанию среды.

Таким образом, особенностью строения мёрзлой толщи на склоне Курайского хребта является смена типа ММП со сплошного на островной в зонах тектонических нарушений. Этот локальный фактор является азональным и нарушает высотную поясностьв строении ММП. То есть, не смотря на то, что профиль наблюдения находится на высоте 2200 м, где ожидается сплошная толща ММП, здесь присутствут участки с островным типом распространения или полным отсутсвием мёрзлых пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., БелобородовВ. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nemfis.ru/pdf/etom.pdf.

2. Мерзлотно-гидрогеологическая карта м-ба 1:200 000. Новосибирск, Отдел фондов Зап.-Сиб. геол. управления; Инв. № 18195, 1977.

3. Геокриология СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. Т. V. Горные страны юга СССР. М., Недра, 1989, 359 с.

4. Григорьев Н.Ф.Влияние подземных вод и экзогенных факторов на формирование азональных мерзлотных условий в районах Приенисейского севера //Сборник статей Института мерзлотоведения СО АН СССР «Гидрогеологические условия мерзлой зоны». – Якутское книжное издание, 1976. – С. 97-102.

5. Мерзлотоведение (краткий курс). Под ред. В. А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981 г.– 240 с.

6. Чуйское землетрясение и динамика сейсмической активизации эпицентральной области/А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, С.В. Гольдин, А.А. Еманов, А.Г. Филина, Ю.И. Колесников, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова, М.А. [Электронный ресурс]-Режим доступа- http://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R_1.html.

7. ШацМ.М. Геокриологические условия Алтае - Саянской горной страны. Новосибирск: изд-во «Наука» Сибирское отделение - 1978. 103 с.

© А. А. Лапковская, В. В. Оленченко, 2014

НОВЫЙ ПОДХОД К СТРУКТУРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МОГТ НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Владимир Валентинович Лапковский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга 3, заведующий лабораторией, e-mail: lapkovskii@ipgg.sbras.ru

На основе оптимальных интервальных сопоставлений трасс МОГТ реализован алгоритм построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей, учитывающий формы разрывных нарушений и реперных отражающих горизонтов, позволяющий выполнять структурную интерпретацию сейсмических разрезов и кубов. Предложенный метод дает возможность генерировать любое число дискретных сейсмических горизонтов, проводить качественную оценку распределения геологических и физических свойств среды, выполнять непрерывные палеоструктурные построения.

Ключевые слова: сейсмическая стратиграфия, структурная интерпретация, МОГТ, трассировка отражающих горизонтов, оптимизация.

A NEW APPROACH TO STRUCTURAL INTERPRETATION OF CDP DATA BASED ON INTERVAL CDP OPTIMIZATION TRANSFORMATION

Vlalimir V. Lapkovsky

Trofimuk's Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Chief of laboratory, e-mail: lapkovskiivv@ipgg.sbras.ru

Based on optimal interval transformation CDP tracks is realized an algorithm for constructing continuous seismo-stratigraphic models, taking into account faults and form of benchmark reflectors, that allows to perform structural interpretation of seismic sections. The proposed method makes it possible to generate any number of discrete seismic horizons, to conduct a qualitative assessment of the distribution of geological and physical properties, and to construct paleo structural states of sections.

Key words: Seismic stratigraphy, structural interpretation, CDP, trace reflectors, optimization.

Стратиграфические модели, получаемые для разрезов и кубов МОГТ путем трассировки сейсмических горизонтов, имеют дискретный характер, в том смысле, что точки области интерпретации отображаются на порядковую шкалу, связанную с конечным числом горизонтов. Прослеживание отдельного горизонта является задачей выбора пространственно устойчивой особенности волнового поля и ее распознавание в пределах максимально возможной области. Трассировка горизонтов представляется как идентификация отдельных точек на основе сходства волнового поля в их окрестностях.

В последнее время были созданы технологии, направленные на извлечение максимально полной структурной информации из 2D-3D сейсмических данных. К их числу относится вычисление в скользящих окнах атрибутов волнового поля, связанных со структурными свойствами изучаемых объектов и созданием

непрерывных сейсмостратиграфических моделей. В этом ряду лежат технологии построения многолистной поверхности в пакете DV-SeisGeo ЦГЭ [1], а также способы сейсмической интерпретации, разрабатываемые компанией dGB Earth Science. Последние были успешно применены при структурной и фациальной интерпретации рифовых построек Ближнего Востока и песчаных тел формации МакМуррэй (McMurray) в Канаде [2]. Решение, предложенное автором, также направлено на получение непрерывных стратиграфических моделей сейсмических разрезов, его существенной особенностью является то, что модель получается не путём вычисления локальных атрибутов, а результатом сопоставления временных (или глубинных) сейсмических трасс во всем диапазоне интерпретируемой области.

В реализованной технологии на двух этапах решается задача оптимизации в постановке вычисления оптимального пути:

1. при создании вычислительных сеток, учитывающих априорно заданную геометрию границ области интерпретации и положение разрывных нарушений;

2. в процессе получения набора оптимальных сопоставлений множества пар сейсмических трасс.

Кровлю и подошву двумерного сечения слоя или верхнюю и нижнюю границу области моделирования - $S_t S_b$ можно представить в виде параметризованных кривых:

$$S_t = S_t(p_t), \ 0 \le p_t \le 1;$$

 $S_b = S_b(p_b), \ 0 \le p_b \le 1.$

Любой точке на верхней и нижней поверхности можно приписать значение параметра в диапазоне [0,1], которое вычисляется как отношение длины пути от начала этой границы к общей длине границы. При этом переходы через разрывные нарушения не изменяют длину пути и не влияют на общую длину границы. Взаимно однозначное отображение подошвы и кровли друг на друга можно представить линией в двумерной области параметров (p_b , p_t) или двумя функциями:

$$p_t = F_t(x)$$
 и $p_b = F_b(x)$, $0 \le x \le 1$

Для любой точки в области (*p_b*, *p_t*) вычисляем функцию расстояния следующего вида:

$$r(p_b, p_t) = \begin{cases} d(p_b, p_t), &$$
если отрезок, соединяющий точки на подошве и кровле, не пересекается ни с одним из разрывов, $G-$ иначе.

Здесь $d(p_b, p_t)$ – Эвклидово расстояние между точками на поверхности кровли и подошвы, соответствующее паре значений параметров (p_b, p_t) , а G – достаточно большое число.

На рис. 1 показаны сечения кровли и подошвы слоя в сложной складке, поле функции $r(p_b, p_t)$ для этой ситуации и линия оптимального сопоставления кровли и подошвы слоя.



Рис. 1. Параметризация поверхностей слоев и их оптимальное сопоставление.

Условные обозначения: 1. – кровля слоя и значения параметра p_t в отдельных точках, 2 – подошва слоя и значения параметра p_b в отдельных точках, 3 – оптимальная линия сопоставления кровли и подошвы слоя в поле расстояний

Линия, показанная на графике красным цветом, неубывающая, она соединяет две угловые точки единичного квадрата поля параметров и является оптимальной траекторией в смысле задач поиска наилучшего пути. Данная линия минимизирует интеграл функции $r(p_b, p_t)$.

Задача вычисления траектории, оптимальной в смысле минимизации некоторого вида затрат при движении по ней, первоначально решалась с помощью алгоритмов муравьиной колонии, но большую эффективность показал волновой алгоритм Ли.

Представленный на рис. 1 результат является промежуточным при построении сеточных моделей, зависимых от геометрии поверхностей слоев и разрывных нарушений. Пример такого рода адаптивных гридов, в которых и происходит вычисление собственно сейсмостратиграфических функций, показан на рис. 2.



Рис. 2. Сеточная модель, полученная путем оптимального сопоставления ограничивающих поверхностей его кровли и подошвы с учетом разрывов

Уже в процессе построения непрерывной сейсмостратиграфической модели для всех пар сейсмических трасс t_i, t_{i+k} , с некоторым шагом k отстоящих друг от друга, вычисляется двумерная функция $f(t_i, t_{i+k})$, характеризующая различие волнового поля в окрестностях сравниваемых точек этих трасс.

В поле этой функции ищется неубывающая линия (условие, которое возникает из невозможности пересечения сейсмостратиграфических горизонтов) L_i^k , соединяющая точки min, t_{i+k}^{min} и max, t_{i+k}^{max} и оптимизирующая сопоставление сейсмических трасс по критерию их минимального интегрального различия

$$\int_{L_i^k} f(t_i, t_{i+k}) dL_i^k \to \min$$

Получаемое решение аналогично тому, что представлено на рис. 16. Используя набор оптимальных сопоставлений большого числа пар трасс, можно сделать различные оценки соответствия времени или глубины для всего разреза и получить непрерывную характеристическую функцию $S(\Omega)$, значения которой выражают стратиграфическое положение точек разреза или куба. Здесь, Ω пространственная или пространственно-временная область (временной или глубинный разрез), на которой задана функция S. Точки с равными значениями функции S интерпретируются как стратиграфически эквивалентные. Соответственно, горизонтами являются изолинии данной функции. Достаточно подробно конструирование сейсмостратиграфической функции рассмотрено в [3].

На рис. 3 приведен фрагмент сейсмического разреза и наложенные изолинии сейсмостратиграфической модели, полученной для этого разреза.



Рис. 3. Фрагмент сейсмического разреза с наложенными изолиниями сейсмостратиграфической функции

Автор выражает признательность А.А. Власову за реализацию волнового алгоритма и помощь в оптимизации и распараллеливании программы.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований - приоритетное направление VIII.73 СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кириллов С.А. Информационно-аналитическая система для четырехмерного моделирования залежей углеводородов по комплексу сейсмических и скважинных данных. 2011, М., 176 с.

2. Brouwer F., de Groot P., Kumpus M. Maximizing the value of seismic data through increased horizon mapping: applications in the Middle East and Canada/ First Break. March 2011, vol. 29. P. 87-92

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

© В. В. Лапковский, 2014

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СКВАЖИННОГО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Георгий Николаевич Логинов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, e-mail: loginovgeorgy@gmail.com

Сергей Владимирович Яскевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, e-mail: yaskevichsv@gmail.com

Антон Альбертович Дучков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент, e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Микросейсмический мониторинг в настоящее время активно применяется для наблюдений за ходом гидроразрыва пласта (ГРП), который все чаще проводится в средах, обладающих сейсмической анизотропией (например, при разработке сланцевых месторождений). В работе описывается результаты по программной реализации графа обработки данных скважинного микросейсмического мониторинга, приводятся результаты тестирования на реальных данных. В результате поляризационного анализа был выявлен эффект расщепления поперечных волн в реальных данных, что подтверждает наличие упругой анизотропии в блоке среды, изучаемой посредством микросейсмического мониторинга.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, обработка данных, расщепление поперечных волн, выделение интервалов полезных сигналов, графический пользовательский интерфейс.

DEVELOPING SOFTAWERE PACKAGE FOR PRELIMINARY PROCESSING OF BOREHOLE MICROSEISMIC DATA

Georgy N. Loginov

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Ac. Koptyuga ave., e-mail: loginovgeorgy@gmail.com

Sergey V. Yaskevich

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Ac. Koptyuga ave., e-mail: yaskevichsv@gmail.com

Anton A. Duchkov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova str. 2, associate professor, e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Microseismic monitoring is actively used for studying the process of hydrofracturing which is often used for anisotropic layers, e.g. in the case of hydrocarbon recovery in shale. In the paper we present the results on developing a software package for processing borehole microseismic data, and the results of its testing on real data. Polarization analysis of real revealed shear-wave splitting which proves anisotropic properties of rocks illuminated during microseismic monitoring. Key words: microseismic monitoring, data processing, shear-wave splitting, extraction of trigger files, graphical user interface.

Введение

Микросейсмический мониторинг активно используется для контроля качества и характеристики результатов работ по гидроразрыву пласта, который часто применяется при разработке трудно добываемых месторождений сланцевого газа и нефти. При гидроразрыву пласта (ГРП), развитие трещин сопровождается возникновением в среде сейсмических событий, сигнал от которых впоследствии может быть записан сейсмоприемниками, расположенными на поверхности или в близлежащей скважине.

Несмотря на широкую применимость микросейсмического мониторинга, программное обеспечения для обработки данных микросейсмического мониторинга пока не входит в стандартные пакеты обработки. Авторами было реализовано программное обеспечение для обработки данных микросейсмического мониторинга — удобный графический интерфейс, позволяющий осуществлять эффективную обработку реальных данных. Программа рассчитана на обработку данных скважинного микросейсмического мониторинга в одной наблюдательной скважине.

Разработанная программа была использована обработки данных микросейсмического мониторинга, который проводился в вертикальной скважине восемью 3-компонентными приемниками с шагом расстановки 30 м (общая длина косы — 240 м). Наблюдательная скважина находилась на расстоянии около 500 м от скважины ГРП. Общая длительность регистрации составила около 30 часов с нарезкой данных в отдельные файлы по 10 с (шагом дискретизации — 0,25 мс).

Методы

Процедуры предварительной обработки микросейсмических данных включают в себя процедуры:

 полосовая фильтрация и выделение триггер-файлов (интервалов содержащих полезный сигнал);

- снятие времен *P*-волн и их поляризационный анализ (азимут на событие);

- поляризационный анализ S-волн (расщепление S-волн);

- снятие времен *S*-волн (одной или двух в случае расщепления).

Полученные времена прихода *P*- и *S*-волн, а также азимут на событие потом используются для решения обратной кинематической задачи на определение гипоцентров микросейсмических событий. В работе обсуждаются только процедуры предварительной обработки без решения обратной задачи.

Выделение триггер-файлов. При выделении триггер файлов используются следующие процедуры: фильтрация, выделение триггер-файлов, сортировка и экспертный анализ триггер-файлов.

Метод выделения триггер-файлов основывается на анализе уровня энергии сейсмического сигнала, который рассчитывается в скользящем окне (рис. 1):

$$E(i) = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{j=i}^{T} \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} d(j,k)^2 \right]},$$
(1)

где E(i) - энергия в *i*-м окне, T – длина окна, N – число приемников.



Рис. 1. Расчет энергии в скользящем окне, по формуле (1).

К исходным данным применялся полосовой фильтр с параметрами 50-100-200-400 Гц, что позволило увеличить соотношение сигнал/шум в 2-3 раза.

Триггер-файл вырезается (запись длиной 1 с), если E(i) на каком-то шаге превышает критический уровень *E*. Заметим, что для выделения триггерфайлов необходимо определить следующие параметры: длина окна (*T*), шаг окна (Δt), критический уровень энергии (*E*).

Выбор этих параметров производится визуально в ходе анализа тестовых записей исследуемого набора данных. Для записи на рис. 1 были выбраны параметры: T=50 мс (по анализу целевых годографов), $\Delta t = 40$ мс, критический уровень E=0.9. Выбора данных параметров обоснован на рис. 2, где красным показана энергия в бегущем окне.



Рис. 2. Энергия трасс в бегущем окне
После процедуры автоматического выделения, был проведен визуальный анализ для отбраковки триггер-файлов, содержащих шум. Статистика выбора и отбраковки триггер-файлов по пяти наборам данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

N⁰	Непрерывная	Автоматическое	После отбраковки
	Регистрация (с)	выделение (число файлов)	(число файлов)
1	4170	1253	25
2	15800	253	65
3	48290	437	70
4	8680	110	40
5	33020	167	13

Результат выделения и отбраковки триггер-файлов

Поляризационный анализ. Авторами реализован алгоритм поляризационного анализа из [1], который основан на сингулярного разложения (SVD). Поляризационный анализ 3-компонентных сейсмических данных является одной из важнейших процедур, позволяющих определять направление прихода *P*волны (азимут на микросейсмическое событие) и выявлять расщепление *S*волны [2], что является признаком анизотропии исследуемой среды.

Результаты поляризационного анализа могут быть также использованы для поворота 3-компонентных записей. Пример поворота на *P*-волну (*P*-волна видна только на одной компоненте) показан на рис. 3.



Рис. 3. Поворот компонент: вверху — до поворота; внизу — после поворота

Поляризационный анализ *S*-волны позволяет выявлять ее расщепление [3]. В случае расщепления, когда линейно поляризованные «медленная» и «быстрая» *S*-волны расходятся по времени на 1-2 периода, годограмма (траектории движения частицы) имеет «крестообразную» форму по двум линейным поляризациям. На рис. 4 (снизу) представлен пример анализа эффекта расщепления *S*-волны. Длина окна для поляризационного анализа была подобрана таким образом, чтобы включить обе *S*-волны.

На рис. 4 (сверху) представлена траектория движения частиц в выбранном окне для 3С набора данных. На нижнем рисунке представлены отфильтрованные 3С данные. На рисунке можно увидеть условный крест в траектории частицы, после первого вступления горизонтально поляризованной волны.



Рис. 4. Поляризационный анализ в окне программного пакета: вверху— годограммы движения частиц; внизу— соответствующие им участки трасс (3-компоненты), где зеленый— начальное время выделенного окна, синий— конечное время выделенного окна

Выводы

В данной работе описан граф обработки данных микросейсмического мониторинга, представлен результат его программной реализации и применения на реальных данных. Реализация данного пакета включает в себя следующие этапы обработки: полосовую фильтрацию, выделение триггер-файлов (интервалов полезных сигналов), пикирование времен прихода волн, поляризационный анализ. Наиболее важным результатом стало выявление эффекта расщепления поперечных волн. Данное наблюдение доказывает анизотропные свойства пород в объеме, исследуемом микросейсмическим мониторингом. Это также обосновывает важность учета анизотропии при обработки микросейсмические данных.

Благодарности. Работа была частично поддержана МИП СО РАН № 127.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De Meersman K., Van der Baan M., Kendall J.-M., 2006. Signal Extraction and Automated Polarization Analysis of Multicomponent Array Data. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 6, pp. 2415–2430

2. Grechka, V., and S. Yaskevich, 2014. Azimuthal anisotropy in microseismic monitoring: A Bakken case study. Geophysics, 79(1), KS1–KS12.

3. Wuestefeld A., Al-Harrasi O., Verdon J. P., Kendall J.-M. 2010. A strategy for automated analysis of passive Microseismic data to image seismic anisotropy and fracture characteristics. Geophysical Prospecting, 58, 775–773.

© Г. Н. Логинов, С. В. Яскевич, А. А. Дучков, 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛЯНОГО ДИАПИРИЗМА РАСЧЕТОМ 3D ПОЛЗУЩИХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ CUDA НА GPU

Борис Валентинович Лунев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: bobvalmail@mail.ru

Тимофей Владимирович Абрамов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: abramovtv@ipgg.sbras.ru.

Реализован алгоритм параллельных вычислений на GPU с помощью технологии CUDA для 3D моделирования процесса соляного диапиризма, представляемого ползущим течением однородно-вязкой ньютоновской жидкости с переменной плотностью под действием силы тяжести. Высокая эффективность алгоритма обусловлена использованием функции Грина для задачи о полупространстве со свободной поверхностью. Благодаря этому удается значительно сократить количество операций и эффективно организовать параллельные вычисления аналогию с расчетом поля в задаче взаимодействия N тел.

Ключевые слова: численное моделирование, ползущие течения, соляной диапиризм, параллельные вычисления, GPU, CUDA.

MODELING OF SALT DIAPIRISM BY CALCULATION OF 3D CREEPING FLOW WITH PARALLEL COMPUTING ON GPU WITH CUDA

Boris V. Lunev

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Senior Research Fellow, Candidate of Physics and Mathematics, e-mail: bobvalmail@mail.ru

Timofey V. Abramov

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, postgraduate, Junior Researcher, e-mail: abramov@ipgg.sbras.ru

The highly efficient program for three-dimensional numerical modelling of salt diapirism is built due to analytical Green's function for Newtonian fluid in the halfspace with free boundary under the action of gravity. Computing is parallel and uses GPU resources with CUDA. Programming approach for calculating velocity field is the same to calculating acceleration field in N body simulation.

Key words: numerical modeling, creeping flow, salt diapirism, parallel computing, GPU, CUDA.

Процессы соляного диапиризма играют важную структурообразующую роль в большинстве нефтегазовых провинций, в связи с чем давно и интенсивно

изучаются, как в природе, так и методами физического и численного моделирования. Однако, возможности использования численных методов до сих пор были сильно ограничены большим временем, нужным для расчетов ползущих течений, моделирующих этот процесс, несмотря на использование параллельных вычислений. Как правило, расчет таких течений основан на разностных методах. В этом случае, несмотря на действия по приведению системы уравнений к удобному для параллельных вычислений виду, неизбежны частые обмены информацией между вычислительными узлами. В результате ускорение вычислений оказывается ограниченным пропускной способностью памяти, а не пиковой производительностью устройства, как показано на рис. 1 [1, 2].



Рис. 1. Зависимость ускорения параллельных вычислений при решении гидродинамических задач:

 а) от числа процессоров (по [1] – расчет неустойчивости Рэлея-Тейлора с использованием схемы Холесского); б) от пропускной способности памяти (по [2] – расчет неустойчивости в свободном сдвиговом слое с использованием геометрического многосеточного метода – GMG, алгебраического многосеточного метода – AMG и метода редукции – FFT)

Основные вычислительные трудности связаны с решением квазистационарных краевых задач, связанная последовательность которых описывает ползущее течение. Для полупространства однородно-вязкой ньютоновской жидкости со свободной границей решение такой краевой задачи удалось получить аналитически в виде функции Грина [3]. Отыскание квазистационарного течения в этом случае сводится к вычислению интеграла свертки:

$$v_{i(\mathbf{x})} = g \iiint \sigma_{(\xi)} V_{i(\mathbf{x},\xi)} \, d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \tag{1}$$

где $v_{i(x)}$ – скорость течения в точке $\{x\}$, $\sigma_{(\xi)}$ – возмущение плотности в точке $\{\xi\}$ и $V_{i(x,\xi)}$ – функция Грина. В работах [4, 5] обоснована корректность пред-

ставления среды однородно-вязкой ньютоновской жидкостью применительно к моделированию соляного тектогенеза и продемонстрирована эффективность такого подхода для расчета 2D течений, даже на одном процессоре.

Моделирование реальных геологических объектов такого типа, как правило, требует трехмерной реализации. Вычислительная сложность при этом возрастает значительно, т.к. в двумерном случае для сетки $N \times N$ элементов требуется $O(N^4)$ операций, а для трехмерной сетки $N \times N \times N - O(N^6)$ операций. Необходимая оперативность моделирования в этом случае может быть достигнута организацией параллельных вычислений. В этом отношении использование функции Грина особенно эффективно: при вычислении интеграла свертки каждое из вычислительных устройств может рассчитывать значения поля от источников в некотором выделенном для него множестве точек- $\sigma_{(\xi)}$ «приемников» $\{x\}$ без дополнительных обменов данными между устройствами. Таким образом ускорение от применения параллельной архитектуры оказывается пропорциональным пиковой производительности системы, а не пропускной способности памяти.

Дополнительное ускорение вычислений дает и вытекающая из (1) возможность расчета только скорости движения границ тел (слоев) с разной плотностью, вместо расчета поля скорости во всей области, обязательного при использовании разностных методов. Благодаря этому, в некотором смысле, вычисляется влияние трехмерного объекта (распределение плотности) на двумерный (поверхность), что снижает размерность задачи с $O(N^6)$ до $O(N^5)$. При этом явное описание движения границ увеличивает точность общего расчета течения.

Заложенные в методе возможности удалось реализовать в программе параллельных вычислений, ориентированной на использование GPU. В разработанной программе для трехмерного моделирования применяется явное описание границ тел в виде триангулированных поверхностей. Сетка источников при этом на каждом временном шаге восстанавливается из конфигурации границ тел (сетка источников имеет фиксированные размеры и является более грубой аппроксимацией области). Такое описание, понижая сложность задачи, одновременно увеличивает точность расчетов, что позволяет вместо двойной обходиться одинарной точностью (тесты показали, что использование одинарной и двойной точности дает практически идентичные результаты вплоть до глубоких стадий эволюции). Возможность использования одинарной точности позволяет значительно ускорить расчеты при использовании современных GPU, для которых характерна большая разница в производительности вычислений с одинарной и двойной точностью. Для организации параллельных вычислений с производительностью близкой к пиковой для GPU, используется надлежащим образом модифицированный метод решения задачи о взаимодействии многих тел [2].

Явное определение поверхностей, вместе с эффективной параллельной реализацией, показывает отличные результаты моделирования за приемлемое

время. Расчеты производились с помощью устройства Tesla c1060, имеющего 240 вычислительных ядер CUDA с тактовой частотой 1300 МГц и пиковую производительность 933 GFLOPS для вычислений с одинарной точностью и 78 GFLOPS для двойной.

В качестве примеров, ниже представлены рассчитанные зрелые стадии развития плотностной неустойчивости в среде, представленной несколькими слоями с разной плотностью.

Рис. 2 представляет результат эволюции инициированной одиночным начальным возмущением.



Рис. 3. Развитие одиночного возмущения. Вверху 3D изображение поверхностей кровли и подошвы всплывающего слоя («соли»), внизу – разрез структуры через ось симметрии. (Плотности всплывающего, перекрывающего и подстилающего слоев взяты 2.2 г/см³, 2.4 г/см³ и 2.55 г/см³, соответственно)

Результат эволюции более сложной модели, состоящей из 5 слоев с плотностями (снизу вверх) 2.65 г/см³, 2.55 г/см³, 2.2 г/см³ (соль), 2.4 г/см³ и 2.2 г/см³, с хаотичными начальными возмущениями представлен на рис. 4.

Во втором примере для задания источников использовалась сетка 128×128×35 узлов и расстояние между соседними точками, задающими поверхности, составляло величину порядка расстояния между узлами сетки. Расчет в этой модели занял два часа с помощью одного устройства Tesla c1060. Полученные результаты говорят о том, что на более мощных вычислительных системах разработанная программа пригодна для оперативного расчета гораздо более сложных моделей, близко воспроизводящих реальные геологические объекты.



Рис. 4. Множественные возмущения.

Вверху – начальное состояние модели, внизу – конечная стадия эволюции. Изображение поверхности, разделяющей верхние два слоя, снято

Работа выполнена в рамках программы VIII.73.2 фундаментальных научных исследований СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исмаил-заде. А. Т., Цепелев И. А., Тэлбот К., Остер П. Трехмерное моделирование соляного диапиризма: численный подход и алгоритм параллельных вычислений // Вычислительная сейсмология, вып 31. 2000, с. 62-76.

2. Боресков А. В., Харламов А. А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 232 с.

3. Лунёв Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости. // Доклады АН СССР, 1986, т.290, № 1, с.72-76.

4. Лунёв Б.В., Лапковский В.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике// Физическая мезомеханика, 2009, т.12, №1, с.63 – 74.

5. Лунёв Б.В., Лапковский В.В. Механизм развития инверсионной складчатости в подсолевом комплексе // Физика земли, 2014, № 1, с. 59 – 65.

6. GPU Gems 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.nvidia.com/content/gpu-gems-3

© Б. В. Лунев, Т. В. Абрамов, 2014

УДК 550.311, 553.98

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ИНВЕРСИОННЫХ СКЛАДОК В ПОДСОЛЕВЫХ СЛОЯХ

Борис Валентинович Лунев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: bobvalmail@mail.ru

Владимир Валентинович Лапковский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, e-mail: lapk@ngs.ru

Тимофей ВладимировичАбрамов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, аспирант, младший научный сотрудник, e-mail:abramov@ipgg.sbras.ru

Численное моделирование архимедового всплывания соляного пласта позволяет предсказать, что при наличии развитых диапиров (от стадии «палец» и выше), непосредственно под подошвой соляных отложений следует ожидать ~ 2-километровую зону инверсионной складчатости, где диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали, деформации затухают с глубиной. Развитие инверсионной складчатости обусловлено исключительно течением, вызванным всплыванием неустойчивого слоя.

Ключевые слова: численное моделирование, подсолевые слои, инверсионная складчатость.

NUMERICAL MODELING OF INVERSION FOLDING IN THE SUBSALT LAYERS

Boris V. Lunev

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Senior Research Fellow, Candidate of Physics and Mathematics, e-mail: bobval-mail@mail.ru

Vladimir V. Lapkovsky

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Chief of laboratory, Candidate of Geological and Mineralogy, e-mail: lapk@ngs.ru

Timofey V. Abramov

A. A. TrofimukInstitute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, postgraduate, Junior Researcher, e-mail: abramov@ipgg.sbras.ru

The numerical modeling of Archimedean upwelling of a salt bed predicts that, with mature diapirs (from a finger stage and later), an about 2-km-thick zone of inversion (mirror) folding, where the suprasalt diapirs correspond to the subsalt synclines while the suprasalt inter-diapir sags correspond to the anticlines in the subsalt, should be expected immediately below the bottom of the

salt deposits. These deformations decay with depth. The development of the inversion folding is exceptionally due to the flow caused by the rising of the unstable layer.

Key words: numerical modeling, subsalt layers, inversion folding.

До сих пор, при исследовании областей солянокупольной тектоники, основное внимание было сосредоточено на структуре кровли соли и надсолевых слоев. Однако, в последнее время усиливается интерес к изучению подсолевых отложений. Современные методы сейсморазведки позволяют исследовать структуру подсолевых слоев и в ряде случаев обнаруживают выраженный инверсионный характер развитых в них складок, по отношению к надсолевому комплексу – куполам соответствуют синклинали, а межкупольным мульдам антиклинали [1,2, 3, 4].

Для объяснения механизма формирования инверсионной складчатости геологами привлекаются различные гипотезы, включая предположения о специфическом вулканизме, связанном с динамикой астеносферы. Методами моделирования деформации подсолевых слоев до сих пор детально не исследовались. Единственным эффектом, установленным ранее относительно поведения «подсолевого субстрата», было выраженное течение вещества его верхних горизонтов к «корням» растущих диапиров, с последующим втягиванием в диапир на более или менее высокие уровни (физическое моделирование – [5], численное – [6]). Благодаря разработанным нами высокоэффективным методам численного моделирования процессов соляного тектогенеза [7, 8], нам удалось исследовать поведение многослойных моделей и показать, что развитие инверсионной складчатости обусловлено динамикой развития плотностной неустойчивости и непосредственно связано с ростом диапиров.

В 2D постановке рассчитана эволюция нескольких вариантов следующей модели. Километровый слой «соли» плотностью 2200 кг/м³ перекрыт двухкилометровым слоем с плотностью 2400 кг/м³ и, выше, еще одним двухкилометровым слоем с плотностью 2300 кг/м³. «Подсолевой» комплекс состоит из пяти километровых слоев с плотностями, равномерно увеличивающимися от 2500 до 2600 кг/м³. Каждый из двух верхних слоев подсолевого комплекса разделен на пять слоев по 200 м с одинаковыми плотностями: 2500 кг/м³ с 5 до 6 км и 2525 кг/м³ с 6 до 7 км. На кровле «соляного» слоя задано начальное возмущение. Эволюция модели представлена на рис. 1.

В «надсолевой» толще наблюдается обычная картина развития последовательных генераций «соляных» диапиров с длиной волны, определяемой параметрами системы. В «подсолевом» же комплексе наблюдается эффект развития инверсионной складчатости. По сторонам растущего возмущения на кровле легкого слоя становятся заметны депрессии, обусловленные погружением вышележащего плотного вещества – начинают формироваться так называемые «антидиапиры» (рис. 1.с). Одновременно и в связи с этим, «подсолевые» слои, начиная с глубины около 500 м под исходным положением подошвы «соли», деформируются обратным по отношению к вышележащему комплексу образом: под растущим диапиром формируется синклиналь (прогиб), а под его краевыми депрессиями – напротив, слабо выраженные антиклинали. С ростом диапира и краевых депрессий в «надсолевом» комплексе, обратные деформации в «подсолевом» комплексе усиливаются, захватывая наверху и нижнюю часть 200-метрового слоя, непосредственно подстилающего «соль» (рис. 1.d.). По глубине область обратных деформаций ограничивается, в основном, 2,5километровым интервалом. Рост диапиров второй генерации, по бокам первоначального, в целом, повторяет его историю, вызывая под ними развитие аналогичных обратных синклиналей. Максимальные амплитуды обратных синклиналей теперь наблюдаются под этими боковыми диапирами, тогда как деформации под центральным диапиром локализуются в ~2-километровом интервале глубин (границы слоев на глубинах 8 и 9 км под центральным диапиром обнаруживают слабый изгиб вверх). При этом синклиналь в слоях, непосредственно подстилающих «соль» под центральным диапиром становится более контрастной (рис. 1.е.). При дальнейшем росте боковых диапиров, деформации в «подсолевом» комплексе под ними повторяют развитие таковых под первоначальным, становясь все более интенсивными и захватывая нижнюю часть верхнего 200-метрового слоя. Обратная синклиналь под центральным диапиром, увеличивая контрастность, еще несколько уменьшает амплитуду и локализуется в слое мощностью около 1,6 км, тогда как прогибание под боковыми диапирами по-прежнему охватывает ~2,5-километровый интервал (рис. 1.f.).



Рис. 1. Деформация надсолевых и подсолевых слоев в процессе развития плотностной неустойчивости. Последовательность стадий – a, b, c, d, e, f. Линейные размеры в км. Всплывающий низкоплотный слой («соль») – красный

Как показали численные эксперименты, изменения исходных параметров модели, заметно сказываясь на эволюции «соляного» слоя и «надсолевой»

структуры, слабо влияют на картину деформирования «подсолевого» комплекса. Наибольший эффект дает изменение градиента плотности в «подсолевом» комплексе. В случае одинаковой плотности всех «подсолевых» слоев, инверсионная складчатость, не ограничиваясь 2,5-км интервалом, распространяется вниз, плавно затухая с глубиной (рис. 2).В случаях увеличения градиента плотности в «подсолевом» комплексе и увеличения скачка плотности на подошве «соли», интервал глубин развития подсолевых деформаций немного сужается и сами образующиеся складки делаются более контрастными – приобретает коробчатый облик и даже опрокинутые залегания (рис. 3).Устойчивость характера и области развития подсолевой инверсионной складчатости, по-видимому, связана с гравитационной устойчивостью «подсолевого» комплекса.

Те же принципиальные характеристики эволюции обнаруживаются и при расчете 3D моделей, представленных на рис. 2.



Рис. 2. Результаты расчета 3D моделей – вверху объемное изображение, внизу – его разрез:

а) – развитие одиночного начального возмущения (разрез через ось симметрии);
 б) – развитие хаотичных начальных возмущений (линия разреза показана на объемной модели)

Основываясь на результатах настоящей работы, можно считать, что развитие инверсионной складчатости под солью обусловлено просто самой динамикой всплывания неустойчивого слоя. Можно предсказать, что при наличии развитых диапиров (от стадии «палец» и выше), под подошвой соляных отложений следует ожидать ~2-км область инверсионной складчатости, где диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали. Амплитуда складок по верхним подсолевым слоям может достигать 500м и более при длине, совпадающей со складками надсолевого комплекса. Наиболее интенсивно инверсионная складчатость выражена в первом километре под солью, далее с глубиной деформации быстро затухают. Ядра синклиналей под диапирами образуются за счет раздува мощности самого верхнего подсолевого слоя, верхняя часть которого втягивается в диапир.

Учет эффекта, предсказываемого в настоящей работе, может быть полезен при постановке сейсморазведочных и буровых исследований подсолевых отложений в областях развитой соляной тектоники. Помимо коррекции существующих представлений о возможной структуре подсолевого комплекса, при прогнозе его нефтегазоносности, можно принять во внимание расчет сопутствующего эволюции напряженно-деформированного состояния, который обнаруживает интенсивное вертикальное растяжение и относительное разряжение (отрицательное возмущение давления) в «подкорневых» зонах растущих диапиров. Если соль подстилается коллекторами, то можно, по-видимому, говорить о первоочередной перспективности раздувов верхнего подсолевого слоя, так как отрицательная аномалия давления вместе с антиклинальным изгибом подошвы соли должны способствовать притоку углеводородов, а интенсивное вертикальное растяжение может улучшать коллекторские свойства породы и извлекаемость. Иная литология подсолевого разреза может сделать более интересными антиклинали, развивающиеся под междиапировыми мульдами.

Работа выполнена в рамках программы VIII.73.2фундаментальных научных исследований СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимурзиев А.И. Особенности строения и механизм формирования соляных диапиров Астраханского свода // Геофизика, 2007, № 6, с.16 – 29.

2. Hantschel T. &Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and Petroleum Systems modeling.DOI 10.1007/978-3-540-72318-9_1, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 476 p.

3. Чердабаев Ж.М. Структурно-тектоническое районирование подсолевых осадочных комплексов северо-восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины (по материалам сейс-моразведки) // Геофизика, 2010, № 3, с.30 – 35.

4. Thompson L. &Oftebro C. Salt gets in your eyes^ the geological challenges and solutions to sub-salt exploration // First dreak, 2011, v. 5, N_{2} 3, p. 93 – 97.

5. Рамберг Х., Сила тяжести и деформации в земной коре. М., Недра, 1985, 399 с.

6. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г.Численное моделирование формирования соляных диапиров в земной коре. // Математический журнал. Алматы. 2006, т.1 (19), с. 67-73.

7. Лунёв Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости. // Доклады АН СССР, 1986, т.290, № 1, с.72-76.

8. Лунёв Б.В., Лапковский В.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике // Физическая мезомеханика, 2009, т.12, №1, с.63 – 74.

© Б. В. Лунев, В. В. Лапковский, Т. В. Абрамов, 2014

УДК 535.012.2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В СРЕДАХ С НАЧАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Егор Васильевич Лысь

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: lysev@ipgg.sbras.ru

Евгений Игоревич Роменский

Институт математики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 4, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, e-mail: evrom@math.nsc.ru

Владимир Альбертович Чеверда

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: cheverdava@ipgg.sbras.ru

Михаил Иванович Эпов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, академик, директор, тел. (383)333-29-00, e-mail: epovmi@ipgg.sbras.ru

Предложена линейная модель распространения упругих волн в средах с предварительным напряжением, основывающаяся на теории конечных деформаций. Уравнения сформулированы в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, переменными которой выступают скорости смещений, компоненты тензора напряжений и деформаций упругой среды. Рассмотрены кинематические аспекты распространения упругих волн в данной модели и предложен конечно-разностный алгоритм для численного моделирования.

Ключевые слова: конечные деформации, теория упругости, моделирование, анизотропия.

ELASTIC WAVES PROPAGATION IN PRESSTRESSED MEDIA

Egor V. Lys

Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, Kouptug av., 3, Ph. D., researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: lysev@ipgg.sbras.ru

Evgeniy I. Romenski

Sobolev institute of mathematic, 630090, Russia, Novosibirsk, Kouptug av., 4, Ph. D., senior re-searcher, e-mail: evrom@math.nsc.ru

Vladimir A. Cheverda

Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, Kouptug av., 3, Ph. D., head of laboratory, tel. (383)330-42-86, e-mail: cheverdava@ipgg.sbras.ru

Mishail I. Epov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, Kouptug av., 3, Ph. D., academician, head of institute, tel. (383)333-29-00, e-mail: epovmi@ipgg.sbras.ru

Linear model for elastic waves propagation through prestressed media based on the general theory of finite deformations was proposed,. The governing equations in terms of velocities, stress and small rotations are formulated in the form of the first order partial differential equathions system. Presented a kinematic characteristic of the model and numerical simulathion algorithm.

Key words: finite deformations, elastic theory, simulation, anisotropy.

Введение

Внутренняя структура земной коры обладает зонами характеризующимися повышенными негидростатичными напряжениями, которые могут быть следствиями таких факторов, как гравитационные аномалии, температурный градиент, тектонические процессы и т.д.. Резонно ожидать, что такие зоны непосредственно влияют на процессы распространения сейсмических волн и должны учитываться при решении прямых и обратных волновых задач геофизики. Впервые влияние предварительных напряжений в среде на процесс формирования волнового поля было исследовано в работе (Віо, 1965). Впоследствии эта тема не получила должного развития, хотя отдельные работы по исследованию этого типа задач проводились см. например (Liu and Sinha, 2003), (Sharafutdinov and Wang, 2012).

В данной работе предложена линейная модель упругой среды с предварительными напряжениями, основывающаяся на уравнениях общей теории деформации упругих сред. Построена конечно- разностная аппроксимация соответсвующей дифференциальной задачи и проведена серия чиссленных экпериментов демонстрирующих влияние начальных напряжений на формирование волнового поля.

Вывод уравнений для упругих волн малых возмущений

Выведем уравнения для упругих волн. малых. возмущений для случая, когда упругая энергия изотропной среды является квадратичной функцией от тензора деформаций. Окончательная версия уравнений будет выписана в предположении, что тензор деформаци. предварительного напряженного состояния также является малым, а значит, соотношени. межд. напряжениями и деформациями предварительно напряженного состояния выражаются классическим законом Гука.

Предположим, что упругая энергия изотропной среды как функция от тензора деформации выражается квадратичной функцией

$$E = \frac{\lambda}{2\varrho} tr^2(\varepsilon) + \frac{\mu}{\varrho}(\varepsilon^2)$$

Здесь *λ*, *μ* – параметры Ламе, -плотность среды в ненапряженном состоянии, *ε*-тензор деформации.

Для связи упругой энергии и тенора напряжений воспользуемся известной формулой

$$\sigma = -2\varrho G^* \frac{\partial E}{\partial G}$$

где σ – тензор напряжений, ρ – плотность, G – тензор Фингера, E – упругая энергия.

Тензор фингера в свою очередь линейно выражается через тензор деформаций Альманси

$$G = I - 2\varepsilon$$

Здесь І – единичный оператор.

Так соотношение напряженно – деформируемого состояния примет вид

$$\sigma = \varrho(\lambda tr(\varepsilon)I - 2(\lambda tr(\varepsilon) - \mu)\varepsilon - 4\mu\varepsilon^2)$$

Дифференцируем полученное равенство по времени и принимая во внимание малость деформаций производим линеаризацию по ε , опуская несложные преобразавания в итоге получим соотношение

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\Sigma U - U^* \Sigma - 2\Sigma \operatorname{tr}(W) - 2\lambda \operatorname{tr}(\varepsilon^0 U) I + \lambda \operatorname{tr}(W) I + 2\mu W - \lambda \operatorname{tr}(W) \operatorname{tr}(\varepsilon^0) I -2\mu \operatorname{tr}(\varepsilon^0) W - 2\lambda \operatorname{tr}(W) \varepsilon^0 - 4\mu W \varepsilon^0 - 4\mu \varepsilon^0 W$$
(1)

Здесь Σ – тензор предварительных напряжений, U-тензор скоростей смещений, $W = \frac{U+U^*}{2}, \varepsilon^0 = \frac{1}{2\mu} \left(\Sigma - \frac{\lambda}{3(\lambda + \frac{2}{3}\mu)} tr \Sigma \right)$ – закон Гука преднапряженного со-

стояния.

Предполагая, что тензор напряжений представляется в виде суммы предварительных напряжений и малых возмущений $\sigma = \Sigma + s$ и учитывая, что предварительные напряжения удовлетворяют уравнениям равновесия получаем

$$\varrho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} + (\varepsilon + \omega) \frac{\partial \Sigma}{\partial x}$$
(2)

Здесь
$$\omega_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$
- оператор вращений.

Особенности распространения упругих волн в среде с начальными напряжениями

Коэффициенты уравнений (1),(2) содержат, кроме упругих модулей, значения начальных напряжений и их производных. Это может приводить как к анизотропии, так и к дисперсии волн. Для анализа волновых полей оказывается удобным рассматривать систему уравнений второго порядка для скоростей смещений, которая может быть получена из путем дифференцирования уравнений для скоростей по времени и исключения производных от напряжений:

$$\varrho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} + B_{ijk} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$$

На рис. 1 представлены индикатриссы продольных и поперечных волн в среде с начальными напряжениями $\Sigma_{11} = \rho V_p^2 / 50$ (слева) и $\Sigma_{11} = -\rho V_p^2 / 50$ (справа) скорости упругих волн в среде: $V_p = 3000$ м/c, $V_s = 2000$ м/c, плотность $\rho = 2000$ кг/м³



Рис. 1. Зависимость скоростей упругих волн от направления распространения соответствующие разреженной среде(слева) и сжатой(справа)

Можно видеть, что ненулевые начальные напряжения являются источником анизотропии скоростей упругих волн.

На рис. 2. представлен эксперимент когда волна от источника типа центр расширения с координатами X=7.7км, Z=7.9км проходит сквозь слой мощностью 1500м в котором $\Sigma_{11} = \varrho V_p^2 / 10$ (вверху) и $\Sigma_{11} = -\varrho V_p^2 / 10$ (внизу), в то время как остальные упругие параметры идентичны вмещающей среде. Общий размер области 90км на 30км.

Хорошо видно, что вследствие анизотропии, вызванной начальными напряжениями волновая картина существенно меняется, появляются отраженные и преломленные обменные волны.

Таким образом учет влияния предварительных напряжений может улучшать результаты решения прямых и обратных задач геофизики, а также объяснить некоторые «белые пятна» формирования волновых полей при различных сейсмических процессах.



Рис. 2. Мгновенные снимки волнового поля (компонента σ_{zz}), экперимент демонстрирующий влияние начальных напряжений на прохождение волны сквозь анизотропный напряженный слой

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Biot. M. A. Mechanics of incremental deformations. Wiley, 1965.

2. Liu, Q.H. and Sinha, B.K. [2003] A 3D cylindrical PML/FDTD method for elastic waves in fluid-filled pressurized boreholes in triaxially stressed formations, *Geophysics*, **68**(5), p.1731-1743.

3. Sharma M.D., Wave propagation in a prestressed anisotropic generalized thermoelastic medium, *Earth Planets Space*, V. 62, 2010, p.381-390.

4. Lys, E.V., Romenski, E.I., Cheverda, V. A., Epov, M. I. Interaction of seismic waves with zones of concentration of initial stresses, *Doklady Earth Sciences*, 2013, 449 (2), p. 402-405.

5. Sharafutdinov V. and Wang J. Tomography of small residual stresses. Inverse Problems, 2012, V. 28, doi: 10.1088/0266-5611/28/6/065017, (17 pp).

© Е. В. Лысь, Е. И. Роменский, В. А. Чеверда, М. И. Эпов, 2014

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ: ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГАЗОГИДРАТОВ

Юрий Александрович Манштейн

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-49-55, e-mail: manstein007@gmail.com

Иван Александрович Калугин

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-31-12, e-mail: ikalugin@igm.nsc.ru

Впервые применена электротомография погружной системой наблюдений для изучения донных осадков. Получены двумерные данные в высоком разрешении. Метод может быть применен для разведки месторождений газогидратов.

Ключевые слова: методы сопротивлений, электротомография, газогидраты.

ELECTRIC RESISTIVITY TOMOGRAPHY OF A LAKE BOTTOM SEDIMENTS: PROMISING TECHNIQUE FOR GAS HYDRATE DEPOSIT EXPLORATION

Yuri A. Manshteyn

Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, bld 3, Koptyuga str, Ph. D., Senior Science Researcher of Laboratory of Electromagnetic fields, tel. (383)330-49-55, e-mail: manstein007@gmail.com

Ivan A. Calugin

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, 630090, Novosibirsk, ac. Koptyug av., 3, Prof., tel. (383)333-31-12, e-mail: ikalugin@igm.nsc.ru

First Electric Resistivity Tomography used to study the Telezkoe lake bottom sediments. Geoelectric cross-sections of high resolution were obtained. The method can be applied for gas hydrate deposit exploration.

Key words: electric resistivity tomography, methane clathrate.

Электротомография – наиболее современная модификация методов сопротивлений, также называемая в отечественной литературе «сплошные вертикальные электрические зондирования», широко применяется во всем мире для изучения верхней части геологического разреза. Особенностью метода является большое количество измерений, производимых в автоматическом режиме с помощью специальной аппаратуры. Аппаратура при этом заземляется с помощью многожильного кабеля к системе электродов-заземлителей, расположенных линейно.

В случае работы на акваториях обычно применяются плавающие кабели. Однако при значительной глубине воды таким способом получить данные о строении дна гораздо труднее, поскольку с глубиной разрешающая способность метода снижается. В августе 2013 года на оз. Телецкое в Алтайском крае были проведены полевые работы по изучению донных осадков озера с помощью электротомографии.

В качестве системы заземлений использован многожильный кабель с 24 токовыводами и 100-метровым удлинителем. Расстояние между токовыводами 5 м.

Измерения проводились аппаратурой СКАЛА-48.

Аппаратура размещалась на борту моторной лодки, кабель с якорем на конце спускался за борт до касания дна, после чего лодка начинала движение, и кабель продолжал выгружаться и линейно укладывался на дно. Во время укладки глубина воды измерялась с помощью эхолота.

Обработка данных произведена в два этапа. Сначала данные были обработаны в программе RES2DINV (Geotomo corp., Loke M.H.), затем один из профилей был обработан в программе ERT Lab (Geostudi Astier, s.r.l., Morelli G.). При этом обработка в RES2DINV не учитывала слой воды, а в ERT Lab данные о воде были введены.

Исследовались участки с небольшой (15 м) глубиной и более глубоководные (до 100 м). На подводной возвышенности Софьи Лепневой в северной части Телецкого озера были выполнены три профиля. Расположение возвышенности с отмеченным участком исследований приведено на рис. 1.



Рис. 1. Подводная возвышенность Софьи Лепневой

На рис. 2 приведены данные по мелководному участку, построенные в RES2DINV (сверху) и в ERT Lab (снизу). Видно, что верхний проводящий слой, очевидно приуроченный к илистым отложениям, имеет переменную мощность, практически отсутствуя на малой глубине. Конфигурация подошвы слоя илистых отложений практически идентична в обоих случаях. Однако, инверсия с учетом слоя воды лает более реалистичные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов, слагающих дно. Таким образом, если более высокоомная часть донных отложений, подстилающих илы, имеет сопротивление 100-130 Ом⋅м, то она соответствует песку, что имеет смысл, поскольку минимум глубины в исследованном месте соответствует истоку реки, впадающей в озеро.

На рис. 3 и 4 приведены результаты электротомографии по возвышенности. Было изучено поднятие дна, верхняя часть которого залегает на глубине 92-98 м. Вокруг этого поднятия глубина озера превышает 300 м.

На разрезе по краю возвышенности (см. рис. 3) заметно, что на склоне низкоомные илистые отложения практически отсутствуют, что согласуется с информацией о том, что ил не накапливается на склонах, сползая даже при малых (2-3°) углах наклона поверхности. В данном случае угол наклона весьма значителен.

Можно предположить, что высокоомные элементы разреза на склоне донного поднятия не что иное, как кристаллические породы. В таком случае, на краю плоской части, на пикетах 70-75 м виден субвертикальный разлом, заполненный низкоомным материалом.

Похожее структурное нарушение видно и на профиле на рис. 4 вверху.

Что же касается илистых отложений на плоской части поднятия, то их мощность достигает примерно 7 метров, что наиболее явно следует из разреза, приведенного на рис. 4 внизу. При измерении на этом разрезе расстояние между токовыводами было уменьшено до 2.5 м, что ограничило глубинность исследований, зато дало улучшение разрешающей способности.

В процессе работы были выявлены некоторые проблемы, связанные, видимо, с возникновением индуцированного электромагнитного поля в воде. Эта помеха была тем больше, чем больше была глубина.

Автор предполагает, что можно добиться лучших результатов измерений, используя многожильный кабель с большим числом токовыводов, меньшую частоту. Также следует уделить внимание измерению УЭС воды in situ и учету этого параметра при решении обратной задачи.

Представляется перспективным использовать электротомографию с погружными системами заземлений в двумерном и трехмерном варианте для изучения структуры залежей газогидратов на Байкале.



Рис. 1. Геоэлектрические разрезы на мелководье. Размеры указаны в метрах, значения - в Ом*м



Рис. 3. Геоэлектрический разрез по склону возвышенности



Рис. 4. Геоэлектрический разрез по возвышенности

© Ю. А. Манштейн, И. А. Калугин, 2014

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ БАХТИНСКОГО МЕГАВЫСТУПА С КУРЕЙСКОЙ СИНЕКЛИЗОЙ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ М-ЗСБ И МТЗ

Елена Николаевна Махнач

ООО ГП «Сибгеотех», 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Октябрьская магистраль, 4, главный геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)344-92-44, e-mail: mahnach@sibgeotech.ru

Анна Васильевна Мамаева

ООО ГП «Сибгеотех», 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Октябрьская магистраль, 4, ведущий геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)344-92-44, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

В работе описан новый подход к интерпретации данных многоразносных зондирований (М-ЗСБ) и магнитотеллурических зондирований (МТЗ) с целью выделения коллекторов в условиях широкого развития траппового магматизма, разломной тектоники, значительной латеральной неоднородности верхней части разреза. В такой сложной геологической ситуации получение достоверных результатов по данным электроразведки достигается путем комплексирования методов, применения современной аппаратуры, методики ведения полевых работ и последующей трехмерной интерпретации с построением объемных моделей среды. Эффективность решения данного круга задач приведена на примере Учаминской площади, расположенной в зоне сочленения Бахтинского мегавыступа с юго-западным бортом Курейской синеклизой.

Ключевые слова: геоэлектрическая модель, 1D-, 3D – интерпретация, МТ-данные, электрическое сопротивление, проводимость, коллекторы, рифей, венд.

GEOELECTRIC MODEL STRUCTURE ZONES WITH JUNCTION BAKHTIN MEGA-VYSTUPA KUREISKO SYNCLINE BY TEM SOUNDINGS M-KAB AND MTZ

Elena N. Mahnach

GP LLC «SibGeoTech», 630007, Russia, Novosibirsk, ul. October highway 4, Chief Geophysicist separation of oil and gas, tel. (383) 344-92-44, e-mail: mahnach@sibgeotech.ru

Anna V. Mamaeva

GP LLC «SibGeoTech», 630007, Russia, Novosibirsk, ul. October highway 4, a leading geophysicist separation of oil and gas, tel. (383) 344-92-44, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

A new approach to interpretation of multi-offset TEM (M-TEM) sounding and magnetotelluric sounding (MTS) measurements for the purpose of finding of collectors in the conditions of broad presence of trap magmatism, fault tectonics, considerable lateral heterogeneity of the top part of a section is described. In such a complex geological situation obtaining of reliable results of data of electromagnetic methods is achieved by combination of methods, using of up-to-date equipment, technique of field measurements and the subsequent three-dimensional interpretation of data with building of volume models of media. Efficiency of the solution of this sphere of tasks in the example of Uchaminskaya area located in the zone of joint of Bakhtinsky megabench with a southwest side of Kureyskaya syneclise is shown.

Key words: geoelectrical model, 1D-, 3D – interpretation, analysis MT-data, electrical resistance, conductivity, reservoirs, Riphean, Vend.

Основные перспективы нефтегазоносности в пределах Сибирской платформы связаны с карбонатными венд – нижнекембрийскими отложениями, терригенным вендом и кровлей рифейских образований [2]. На изучение этих комплексов пород и выделение объектов, перспективных на обнаружение УВ в их пределах, были направлены комплексные электроразведочные исследования, включающие электроразведку ЗСБ в многоразносном варианте и магнитотеллурические зондирования. Полевые работы выполнены ООО ГП «Сибгеотех» в 2009 – 10 гг. в объеме 1200 пог. км.

Высокая эффективность работ обеспечивается переходом к многоразносным зондированиям с закрепленным источником поля в сочетании с трехмерной интерпретацией данных [3]. При проведении электроразведочных работ М-ЗСБ использовалась незаземленная петля квадратной формы с размером сторон 500*500 м. Измерение спада наведенного электромагнитного поля производилось переносными регистраторами ЭМ - поля «Импульс-Д», разработанными в ООО ГП «Сибгеотех». Метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в современной модификации с использованием многоразносных зондирований (М-ЗСБ), выполненных по площадной системе наблюдений дает высококачественный результат по распределению проводимости до глубин 2.5 -3 км. Повышение глубинности обеспечивается проведением магнитотеллурических зондирований (МТЗ), нацеленных на изучение нижней части осадочного чехла и верхней части фундамента [1]. Они проводились с использованием электроразведочных станций MTU компании «Phoenix Geophysics» (Канада), предназначенных для регистрации электрических (Ех, Еу) и магнитных (Нх, Hy, Hz) компонент естественного магнитотеллурического поля. Использовалась пятиэлектродная крестообразная электрическая измерительная установка с длиной приемных линий 50 м. Регистрация МТ-поля осуществлялась в частотном диапазоне 400 – 0.0006 Гц. Время регистрации на точке составляло 12-14 часов, при шаге по профилю – 1 км.

Основной задачей геофизической интерпретации являлась оценка электропроводности венд-рифейских отложений, изучение характера сочленения структур Сибирской платформы на участке работ и составление геоэлектрического разреза. Рассматриваемые ниже части профилей ПР1 и ПР2 ориентированы вкрест простирания основных структур.

Интерпретация данных МТЗ состояла из двух этапов - качественный этап, сводящийся к выбору геоэлектрической модели, и количественный, направленный на определение параметров модели. На основе этой модели выполнялась 3D инверсия.

Сложность выбора модели и получения достоверной информации о параметрах геоэлектрического разреза объясняется распределением ЭМ-поля, которое зависит от всех элементов зондируемой среды. Для преодоления этих сложностей в данной работе применена методика совместной 1D- и 3Dинтерпретации. Она основанная на прямом трехмерном моделировании по моделям, полученным в ходе качественного анализа и количественной интерпретации [3].На этапе качественной интерпретации, важную роль играет анализ магнитотеллурических данных, позволяющий осуществить корректный выбор интерпретационной модели [1]. Он включает в себя анализ кривых, магнитотеллурических параметров, нормализацию кривых ρ_{κ} .

В результате выполненных по профилям наблюдений определены частотные характеристики магнитотеллурического тензора |Z|. Полученные в результате обработки кривые модуля кажущегося сопротивлениям и фазы импеданса представлены в виде псевдогеоэлектрических разрезов на рис. 1.



Рис. 1. Псевдоразрезы десятичного логарифма модуля сопротивления (Ом.м) и фазы импеданса (градусы)

Начальный анализ по разрезам показал, что различное распределение магнитотеллурических параметров в широтном и меридиональном направлениях наблюдается практически для всего интервала периодов и говорит о сильном влиянии приповерхностных неоднородностей, создающих случайный геологических шум.

Дальнейший шаг в построении модели связан с анализом распределения магнитотеллурических параметров неоднородности и асимметрии: параметр неоднородности (N), региональный параметр ассиметрии (β), амплитудный параметр ассиметрии (Skew_s), фазочувствительный параметр ассиметрии (Skew_b)

(рис. 2). С их помощью оценивается степень неоднородности геологической среды и локализуются выделяемые структуры.

В результате анализа частотных распределений параметров по профилю предположение о локальных трехмерных неоднородностях с региональной двумерной структурой получило дополнительное подтверждение.

Следующим шагом была, нормализация МТ-данных посредством приведения их к уровню кривых М-ЗСБ, для подавления влияния приповерхностных трехмерных эффектов, имеющих гальваническую природу.



Рис. 2. Частотные разрезы параметров неоднородности тензора импеданса

На этапе качественного анализа было сформирована геоэлектрическая модель разреза, которая использовалась в ходе количественной 1D- и 3Dинтерпретации данных

В процессе 3D- интерпретации в рассматриваемой части площади установлено сильное влияние анизотропии на сопротивление пород. Здесь широтные и меридиональные кривые имеют различный вид с периода от 1 сек. Низкоомный анизотропный слой выделяется на глубине порядка 4500 - 5500 м, он погружается в северном направлении, в его пределах электрические сопротивления по латерали во взаимно-ортогональных направлениях отличаются в 3-4 раза (рис. 3). Причинами, вызывающими анизотропию горных пород, могут быть слоистость, особенности структуры и текстуры пород, существование преобладающего направления трещиноватости, напряженное состояние пород и т.д.



Рис. 3. Геоэлектрическая 3D- блок-модель фрагмента Учаминской площади

Проведенные исследования позволили создать объемную геоэлектрическую модель исследуемой среды и на ее основе уточнить прежние представления о геологическом строении и характере сочленения двух крупных структур Сибирской платформы – Бахтинского мегавыступа и юго-западного борта Курейской синеклизы.

В восточной части площади установлена западная граница Ангаро-Котуйского грабен-рифта, что является определяющим структурным элементом, способствующим формированию в осадочном чехле зон нефтегазонакопления. По распределению геоэлектрических параметров (сопротивление, проводимость) прослежена граница выклинивания отложений с улучшенными коллекторскими свойствами в нижнем венде. С линией выклинивания данных отложений связываются перспективы нефтегазоносности вендского терригенного НГК в ловушках структурно-литологического типа. Применение специальных приемов обработки дало возможность разграничить блоки пород различного состава и локализовать участки, представляющие поисковый интерес. Изучение анизотропии пород позволило определить наиболее проницаемые уровни геологического разреза и возможные пути миграции углеводородов. Полученные материалы могут рассматриваться в качестве основы для дальнейшего изучения территории по более плотной сети наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н. Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: На-учный мир, 2009. - 680 с.

2. Перспективные на нефть зоны и объекты Сибирской платформы: сб. науч. тр. / Под ред. В. С. Старосельцева. - Новосибирск: СНИИГГиМС, 2009. - С. 1–26

3. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D – Электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Наука, 2009. - 211 с.

© Е. Н. Махнач, А. В. Мамаева, 2014

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЗОНДОВ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА С ИНДУКЦИОННО-ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (ПО МАТЕРИАЛАМ ПУБЛИКАЦИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Игорь Владиславович Михайлов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант, вед. прогр., e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

Марина Николаевна Никитенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: nikitenkomn@ipgg.sbras.ru

Вячеслав Николаевич Глинских

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лаб., e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Проанализированы зарубежные публикации по зондам электрокаротажа с индукционно-гальваническим возбуждением. Рассмотрены их преимущества и недостатки по сравнению с зондами электромагнитного каротажа.

Ключевые слова: электрокаротаж, индукционно-гальваническое возбуждение, численное моделирование.

ANALYSIS OF ELECTROLOGGING TOOLS WITH COMPOUND INDUCTION AND GALVANIC EXCITATION CAPABILITIES (BASED ON PUBLICATIONS AND SIMULATION DATA)

Igor V. Mikhaylov

A.A. Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av. 3, postgraduate student, Leading Software Developer, e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

Marina N. Nikitenko

A.A. Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av. 3, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: nikitenkomn@ipgg.sbras.ru

Vyacheslav N. Glinskikh

A.A. Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyug av. 3, Ph.D., Head of Laboratory, e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Foreign publications on electrologging tools with compound induction and galvanic excitation are analyzed. Their advantages and shortcomings if compared with electromagnetic logging tools are considered.

Key words: electrologging, compound induction and galvanic excitation, numerical simulation.

Постоянное усложнение объектов исследования скважинной геофизики требует совершенствования применяемых методов, технологий и каротажных приборов. Заметно развиваются направления, связанные с методами электромагнитного каротажа, широко используемыми для оценки насыщения углеводородами. Несмотря на ряд несомненных преимуществ, они недостаточно эффективны в скважинах с высокопроводящим буровым раствором и понижающим проникновением фильтрата. В этом смысле, электрокаротаж может являться необходимым дополнением.

В данной работе, на базе аналитического обзора зарубежных публикаций и результатов численного моделирования, проводится анализ возможностей каротажных зондов с индукционно-гальваническим возбуждением, характеризующихся высокой разрешающей способностью.

Основываясь на анализе многочисленных публикаций, в частности [1-4], в целом отражающих основную идею, можно отметить следующее.

Широко распространены зонды, характеризующиеся одновременно несколькими способами «возбуждения-измерения». Так, большой интерес представляет реализация бокового каротажа, обладающего хорошей фокусировкой. Результаты полевых измерений в вертикальных скважинах показали, что эти зонды обладают лучшей чувствительностью к пластам меньшей мощности, чем, например, двухзондовый индукционный каротаж.

Другой важный момент – возможность эффективного применения зондов электрокаротажа с индукционно-гальваническим возбуждением при больших контрастах удельных сопротивлений между пластом и буровым раствором. Так, сопротивления скважинного флюида, характерные для биополимерных растворов, оказывают слабое влияние на отклики рассматриваемых зондов. В то же время, диаграммы электромагнитного каротажа, например ВИКИЗ, в таких условиях сильно усложняются.

Соответствующие отклики в сильнонаклонных и горизонтальных скважинах отражают физическую ситуацию, обратную той, которая наблюдается в вертикальных скважинах. А именно, зонды электрокаротажа с индукционногальваническим возбуждением при приближении к границе начинают раньше чувствовать проводящие вмещающие пласты, чем высокоомные. Для зондов индукционного каротажа характерна обратная ситуация по сравнению с зондами электрокаротажа с индукционно-гальваническим возбуждением – более ранняя чувствительность наблюдается к высокоомным вмещающим пластам. С точки зрения геонавигации и возможностей определения сопротивлений пластов, эти методы взаимно дополняют друг друга.

Вплоть до сегодняшнего дня, рассматриваемые зонды электрокаротажа модернизировались. Например, использование измерительных кнопочных электродов различной ориентации относительно ствола скважины, характеризующихся азимутальной чувствительностью к среде и высоким вертикальным разрешением, позволило строить электрические имиджи, нашедшие широкое применение при решении разных задач.

Известное явление, осложняющее вид диаграмм электромагнитного каротажа в скважинах с большими углами наклона, - образование «рогов поляризации» в области пересечения границ пластов. Говоря о диаграммах зондов электрокаротажа с индукционно-гальваническим возбуждением, следует сказать, что подобных осложнений на них не наблюдается.

Нельзя не отметить возможность применения электрокаротажа с индукционно-гальваническим возбуждением в значительно большем диапазоне сопротивлений пластов по сравнению с электромагнитным каротажем (на два порядка). Это является предпосылкой к использованию первого в высокоомных геологических разрезах.

С целью изучения возможностей электрокаротажа с индукционногальваническим возбуждением в условиях Западной и Восточной Сибири, было проведено моделирование и анализ откликов двухкатушечного зонда. При моделировании рассматривался широкий спектр электрофизических и геометрических параметров скважины, зоны проникновения и пласта на базе слоистооднородных моделей.

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы. Двухкатушечный зонд обладает высоким радиальным и вертикальным разрешением. Наблюдается надёжная зависимость регистрируемых откликов зонда от электрического сопротивления пласта, вне зависимости от контрастности сопротивлений между скважиной, зоной проникновения и пластом.

Электрокаротаж с индукционно-гальваническим возбуждением, вероятно, имеет большой потенциал для применения в условиях Западной и Восточной Сибири. Поскольку поведение диаграмм этого метода и электромагнитного каротажа в ряде случаев принципиально отличается, их совместное использование может способствовать более эффективному решению таких задач, как изучение сложнопостроенных коллекторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gianzero, S., Chemali, R., Lin, Y., Su, S., Foster, M. A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling // Transactions of the SPWLA 26th Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, USA, June 17-20, 1985. Paper A.

2. Gianzero, S., Chemali, R., Su, S. Induction, Resistivity and MWD Tools in Horizontal Wells // Transactions of the SPWLA 30th Annual Logging Symposium. – Denver, Colorado, USA, June 11-14, 1989. Paper N.

3. Bonner, S., Bagersh, A., Clark, B., Dajee, G., Dennison, M., Hall, J., Jundt, J., Lovell, J., Rosthal, R., Allen, D. A New Generation of Electrode Resistivity Measurements for Formation Evaluation While Drilling // Transactions of the SPWLA 35th Annual Logging Symposium. – Tulsa, Oklahoma, USA, June 19-22, 1994. Paper OO.

4. Ortenzi, L., Dubourg, I., Van Os, R., Han, S., Koepsell, R., Chow, S., Ha, Y. New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes // Transactions of the SPWLA 52nd Annual Logging Symposium. – Colorado Springs, Colorado, USA, May 14-18, 2011. Paper LLL.

© И. В. Михайлов, М. Н. Никитенко, В. Н. Глинских, 2014

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Михаил Михайлович Немирович-Данченко

Томский Филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: michnd@mail.ru

Александра Андреевна Шатская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ассистент кафедры геофизики, alek.sashka@mail.ru

В работе предложена методика построения модели среды с системой наклонных трещин и проведения расчетов прямых задач сейсморазведки для такой среды. Система плоскопараллельных трещин имеет регулируемые угол наклона и флюидонасыщенность. Приводится пример построения временного разреза для модели с водонасыщенными трещинами. Сравниваются спектры падающего и проходящего сигналов.

Ключевые слова: трещиноватые среды, спектральный анализ, численное моделирование.

CALCULATION OF INFLUENCE OF INCLINED-CRACKS SYSTEM ON THE SEISMIC FIELD

Mikhail M. Nemirovich-Danchenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Tomsk Affiliate, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Russia, Tomsk, Leading Researcher, Ph.D in Physics and Mathematics, e-mail: michnd@mail.ru

Alexandra A. Shatskaya

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30, Department of Geophysics, assistant, e-mail: alekasashka@mail.ru

In work the technique of creation of model of the environment with system of inclined cracks and carrying out calculations of direct problems of seismic exploration for such environment is offered. The system of plane-parallel cracks has an adjustable tilt angle and a saturated. The example of creation of a temporary section for model with water-saturated cracks is given. Spectra of incident wave and refracted wave are compared.

Key words: fractured zone, spectral analysis, numerical simulation.

На сегодняшний день все сервисные геофизические кампании мира предлагают 3D3C работы. Это позволяет сделать обычным для производственных организаций использование азимутальной анизотропии скоростей для определения параметров трещин в слоях. В тоже время становится очевидной неполнота извлекаемых из анизотропии скоростей данных и относительно невысокая помехоустойчивость алгоритмов, это было убедительно показано на защите одной из последних диссертационных работ (Диссертация Г.А. Дугарова, см. [1]). Этим объясняется интерес к анизотропии поглощения, что хорошо видно из анализа публикаций последнего десятилетия. Так, в работе [2] рассмотрены лабораторные эксперименты с системами трещин различной насыщенности и обсуждаются возможности выявления соответствующих сейсмических атрибутов. Нами предлагается подобные эксперименты проводить на основе конечноразностного моделирования. Подробно система уравнений и конечноразностная схема приведены в работах [3, 4] и в данной работе не обсуждаются.

Для проведения численного эксперимента был разработан генератор моделей с управляемыми углами наклона и параметрами насыщенности трещин

Для диапазона углов наклона из первого полу-квадранта $0 \le \alpha \le \frac{\pi}{4}$ удобно пользоваться следующей формулой определения текущих координат расчетной ячейки в исходной области

$$x_c = x \cos(\alpha) + w,$$

$$y_c = x \sin(\alpha) + w + (N - 1)h.$$
 (1)

Здесь ∞- угол наклона направляющего вектора системы трещин к оси ОХ, N- число трещин, h – расстояние между ними, w – толщина отдельной трещины. Последние два параметра определяются в единицах ячеек.

Для углов диапазона $\pi/4 \le \alpha \le \pi/2$ трещины проводятся не от оси ОХ, как в формуле (1), а от оси ОҮ.

На рис. 1 приводится геометрия модели для угла 20 градусов. Этот угол – характерный для диапазона углов при анализе касательных ослабленностей по данным ВСП [1]. Очевидно, что оси x₃ из работы [1] соответствует ось ОХ нашей модели (рис. 1).



Рис. 1. Модель среды с системой наклонных трещин. Цифрами обозначено: 1 – вмещающая среда, 2 – флюид в трещинах

В модели, представленной на рис. 1 N=22, h= 5, w= 3 (см. формулу (1). Вмещающая среда имеет параметры Vp=3000 м/с, Vs =2000 м/с, ρ =2000 кг/м³. Параметры флюида Vp=1500 м/с, Vs =0 м/с, ρ =1000 кг/м³,

Для этой модели был рассчитан временной разрез от падения плоской волны, возбуждение и регистрация на линии ОХ. Фрагмент этого разреза приведена на рис. 2.

А на рис. 3 сравниваются спектры падающего сигнала и волны, прошедшей через систему трещин.



Рис. 2. Синтетический временной разрез. Выделена отдельная трасса





Сравнение спектров говорит о следующем. Как и для случая ненасыщенных трещин (см. работы [5, 6]), происходит видимое смещение несущей частоты в низкочастотную часть спектра. Кроме того, происходит обогащение правой части кривой высокими частотами, отвечающими как за дифракционную картину на всем семействе трещин, так и за собственные моды колебаний трещин в отдельности. Влияние ступенчатой аппроксимации криволинейной в общем случае границы было подробно рассмотрено в работе [7]. Как показали наши расчеты, затухание высоких частот спектра волны, прошедшей через пачку трещин, обусловлено (в отсутствие механизмов трения) волновым сопротивлением. Это связано, в свою очередь, с системой неоднородных поверхностных волн, возникающей на границах раздела [5].

Обнаруженные закономерности могут быть далее использованы для выявления сейсмических атрибутов, ответственных за зоны поглощения с учетом ориентированности систем трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН, междисциплинарный интеграционный проект № 127 и при поддержке РФФИ, грант № 12-05-00337-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дугаров Г.А. Оценка эффективных параметров сред с ориентированными трещинами в модели линейного проскальзывания по данным об анизотропии скоростей и поглощения сейсмических волн : Автореф... дис. канд. физ-мат. наук. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – 18 с.

2. Pyrak-Nolte L.J. Fracture anisotropy: the role of fracture-stiffness gradients // The Leading Edge — 2007. — V. 26. — N_{29} . — P. 1124–1127.

3. Немирович-Данченко М.М., Стефанов Ю.П. Применение конечно-разностного метода в переменных Лагранжа для численного расчета волновых полей в сложнопостроенных средах// Геология и геофизика. - № 11. - 1995. - С. 96-105

4. Nemirovich-Danchenko M.M. A model for the brittle hypoelastic medium: application to computation of deformations and failure in rock, Phys. Mesomech., 1, No. 2 (1998) 101-108

5. *Немирович-Данченко М.М.* Возможности обнаружения множественной трещиноватости сплошной среды на основе оценки спектральной плотности энергии отраженного сигнала // Физ. мезомех. - 2013. - Т. 16. - № 1. - С. 105-110

6. Гик Л.Д., Конторович В.А., Канаков М.С., Лапковский В.В., Лунев Б.В., Немирович-Данченко М.М. Использование спектральных характеристик сейсмической записи для прогноза зон улучшенных коллекторов // Технологии сейсморазведки. - 2013. - № 3. - С. 16-20

7. Nielsen P. Numerical modelling of seismic waves: on the elimination of grid artifact / Norsk Hydro Research Center, N-5020, Bergen, Norway, 1994. - 47 p.

© М. М. Немирович-Данченко, А. А. Шатская, 2014
ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ДИАГРАММЫ ВИКИЗ И БКЗ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Галина Владимировна Нестерова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, зам. директора, тел. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. отделом горного породоведения, тел. (383)217-05-28, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Ирина Владимировна Суродина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории численного моделирования сейсмических полей, e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

В работе исследуется влияние анизотропии среды, окружающей скважину, на показания зондов ВИКИЗ и БКЗ. Используются разработанные авторами трёхмерные численные модели фильтрации бурового раствора в пласт в условиях изменения напряжённодеформированного состояния среды и программы расчёта диаграмм ВИКИЗ и БКЗ для случая трёхмерного описания среды. Показано, что неравнокомпонетность поле внешних напряжений отражается в диаграммах скважинных измерений.

Ключевые слова: каротаж, численное моделирование, удельное электрическое сопротивление, коэффициент бокового отпора, напряжённо-деформированное состояние.

INFLUENCE OF THE GEOMECHANICAL PARAMETER ANISOTROPY ON VIKIZ AND BKZ LOGS ACCORDING TO THE DATA OF NUMERICAL SIMULATION

Galina V. Nesterova

Trofimuk Instituteof Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Ph.D., senior scientist of Laboratory of electromagnetic fields, tel. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.nsc.ru

Igor N. Yeltsov

Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Doctor of Science, associate professor, Deputy director on scientific work, tel. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

Leonid A. Nazarov

Chinackal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt, prof., Head of Rock Informatics Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Larisa A. Nazarova

Chinackal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt, prof., Head of Rock Properties Department, tel. (383)217-05-28, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6, Akademika Lavrentjeva, Ph.D., senior scientist of Laboratory of Numerical Modeling of Seismic Fields, e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

Influence of the anisotropy of the borehole environment on VIKIZ and BKZ logs are studied. 3D numerical models of mud filtration under stress-strain state and VIKIZ and BKZ logs developed by authors are used. It is shown that non-uniform compression affects the borehole logs.

Key words: logging, numerical simulation, resistivity, lateral pressure factor, stress-strain state.

При бурении и последующих работах на скважине изменяется напряжённодеформированное состояние пород, её окружающих. При этом изменяются пористость и проницаемость вблизи скважины, причём связь этих параметров снапряжённо-деформированным состоянием может иметь различный характер для разных типов пород. Экспериментальные исследования зависимости проницаемости от напряжений при деформировании пород за пределом упругости показывают, что величина проницаемости может как увеличиваться [5, 11], так и уменьшаться [8-10] в несколько раз. Возрастание проницаемости имеет место, как правило, для пород с низкой пористостью. При изменении процессапроникновения фильтрата бурового раствора в пласт, связанного с уменьшением/увеличением проницаемости и пористостиизменяются распределения водонасыщенности и солёности пластового флюида иудельного электрического сопротивления (УЭС) породы в окрестности скважины. Это отражается в каротажных диаграммах ВИКИЗ и БКЗ. Ранее был создан программно-алгоритмический комплекс, позволяющий моделировать процессы фильтрации двухфазной несмешивающейся жидкости в пласт и солепереноса в условиях напряжённо-деформированного состояния, имеющего место в процессе бурения скважины[2-4, 7]. Входными параметрами при моделировании являются фильтрационно-ёмкостные свойства пласта, свойства пластовых флюидов и бурового раствора, давление, геомеханические параметры (угол внутреннего трения, сцепление, коэффициент бокового отпора, предел прочности породы). Постановка задачи приведена в работах [3-4].

В настоящей работе исследуются случаи проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, породы которого обладают отличнымигеомеханическимисвойствами в разных направлениях.

Задача численного моделирования показаний зондов ВИКИЗ сводится к решению уравнений Максвелла

$$rot \vec{E} = i\omega\mu\vec{H}$$
$$rot \vec{H} = \sigma\vec{E} - i\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J}^{cm}$$

где $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ и $\vec{H} = (H_x, H_y, H_z)$ - векторы электрического и магнитного поля, ω - циклическая частота, \vec{j}^{cm} - плотность стороннего тока, текущего в генераторной катушке, $\mu = 4 * \pi * 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость, $\varepsilon(x, y, z)$ диэлектрическая проницаемость и $\sigma(x, y, z)$ - электропроводность изотропной среды. Электрическое поле представим в виде суммы аномального \vec{E}^a и первичного \vec{E}^0 электрического полей. Последнее определяется как поле источника в однородной среде с электропроводностью σ_0 и нулевой диэлектрической проницаемостью. Аналогично представим и магнитное поле $\vec{H} = \vec{H}^0 + \vec{H}^a$. Для аномальных полей получим уравнения

$$rot \vec{H}^{a} + \vec{E}^{a}(i\omega\varepsilon - \sigma) = \vec{E}^{0}(\sigma - \sigma_{0} - i\omega\varepsilon)$$
$$rot \vec{E}^{a} - i\omega\mu\vec{H}^{a} = 0$$

Для сокращения размерности задачи перейдем к дифференциальным уравнениям в частных производных второго порядка:

$$rot \, rot \, \vec{E}^a + \vec{E}^a (i\omega\varepsilon - \sigma) \cdot i\omega\mu = \vec{E}^0 (\sigma - \sigma_0 - i\omega\varepsilon) \cdot i\omega\mu. \tag{1}$$

После дискретизации с помощью метода конечных разностей уравнения (1), полученную систему линейных уравнений решаем итерационным предобусловленным методом эрмитового разложения [6].

Численное моделирование показаний зондов БКЗ сводится к решению уравнения Пуассона для аномального потенциала электрического поля U^a

$$div(\sigma \nabla U^{a}) = -div((\sigma - \sigma_{0}) \nabla U^{0}), \qquad (2)$$

где U^0 - первичный потенциал, связанный с источником поля, расположенным в однородной среде с проводимостью σ_0 , $\sigma(r, \varphi, z)$ - проводимость среды в цилиндрической системе координат, U - полный потенциал электрического поля $U = U^0 + U^a$. Дискретизация уравнения (2) проводится методом конечных разностей, полученная система линейных алгебраических уравнений решается итерационным предобусловленным методом сопряжённых градиентов [1].

На рис. 1 приведены кривые зондирования ВИКИЗ, а на рис. 2- кривые зондирования БКЗ, рассчитанные на НКСЗО-Т Сибирского Суперкомпьютерного Центра. Параметры пласта: глубина – 3000 км, пористость – 20%, проницаемость 50 мд, нефтенасыщенность – 75%, прочность пород коллектора на сдвиг – 12 Мпа, коэффициент бокового отпора в направлении у – 0.70. Значение коэффициента бокового отпораq_hв направлении х является шифром кривых на рисунке.Видно, что значения и ВИКИЗ и БКЗ монотонно возрастают с увеличением q_h.



Рис. 1. Кривые зондирования ВИКИЗ для разных значений коэффициента бокового отпора q_h



Рис. 2. Кривые зондирования БКЗ для разных значений коэффициента бокового отпора q_h

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 89 и гранта РФФИ 13-05-12031.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дашевский Ю.А., Суродина И.В., Эпов М.И. Трёхмерное математическое моделирование системы мониторинга электрических свойств скважинного флюида // Международная конференция « Математические методы в геофизике», Новосибирск, 2003. - Ч.1, С. 268-272.

2. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Петрофизическая интерпретация повторных электромагнитных зондирований в скважинах // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 852-861.

3. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. – 2012. – Т. 445. – № 6. – С. 671-674.

4. Назарова Л.А., Назарова Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. – 2013. – № 5. – С. 37-49.

5. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001.

6. Суродина И.В., Мартаков С.В., Эпов М.И. Трехмерное математическое моделирование гармонических электромагнитных полей в задачах каротажа в наклонно-горизонтальных скважинах // Международная конференция по вычислительной математике МКВМ-2004.Ч.2. – С.699-703.

7. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. GEHM / Назарова Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. –№ 2012619496 от 19.10.2012.

8. Holt R.M. Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field // SPE Formation Evaluation. -1990. - No 5. - P. 444-448.

9. Keaney G. M. J., Meridith P. G., Murrel S. A. F. Laboratory study of permeability evolution in a "tight" sandstone under non-hydrostatic stress conditions // SPE /ISRM EuRock'98. Trondheim: SPE. – 1998. – SPE/SRM 47265. http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00047265

10. Randall M.S., Conway M., Salter G., Miller S. Pressure-Dependant Permeability in Shale Reservoirs Implications for Estimated Ultimate Recovery, AAPG Search and Discovery Article N 9012.2011, AAPG Hedberg Conference. – December 5-10. – 2010. – Austin, Texas. http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2011/hedberg-texas/abstracts/ndx_miller.pdf

11. Rhett D. W., Teufel L. W. Effect of Reservoir Stress Path on Compressibility and Permeability of Sandstones//67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineering, Washington, DC, October 1992. – SPE paper № 24756 1992. –P. 4-7.

© Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, И. В. Суродина, 2014

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЙ ТОЛЩИ ПЕРЕВАЛА ЖОСАЛЫ КЕЗЕН (ИЛЕЙСКИЙ АЛАТАУ) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Ярослав Константинович Камнев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, инженер, тел. (383)330-79-08, e-mail: KamnevYK@ipgg.sbras.ru

Рассмотрены результаты электрических зондирований в области распространения многолетнемёрзлых пород альпийского типа. Показано влияние экспозиции склона и тектоники на строение геоэлектрической модели многолетнемёрзлой толщи. Установлено закономерное изменение геоэлектрической модели при переходе от сплошного типа распространения мерзлых пород к прерывистому и островному.

Ключевые слова: электротомография, многолетнемёрзлые породы, разлом, талик.

GEOELECTRIC MODEL OF PERMAFROST ZHOSALY KEZEN PASS (ILEYSKIY ALATAU) BY RESULTS OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Vladimir V. Olenchenko

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prosp., senior staff scientist, tel. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Yaroslav K. Kamnev

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prosp., engineer, tel. (383)330-79-08, e-mail: KamnevYK@ipgg.sbras.ru

The results of electrical soundings in the area of mountain permafrost presented. Effect of slope exposure and faults on structure of the geoelectric model permafrost has been shown. Change in the type of continuous permafrost to the island type leads to a regular change in the geoelectric model.

Key words: electrical resistivity tomography, mountain permafrost, fault, talik.

Изучение морфологии многолетнемёрзлых пород (ММП) это одна из основных задач геокриологии. Для определения морфометрических параметров многолетнемерзлой толщи наряду с бурением применяются геофизические методы. Одним из наиболее информативных методов исследования криолитозоны является современная модификация вертикального электрического зондирования – электротомография (ЭТ).

В основе технологии электротомографии заложены многоэлектродные измерения и двумерная инверсия данных зондирований. В результате получают

распределение удельного электрического сопротивления горных пород по разрезу, по которому судят о геологическом и/или геокриологическом строении массива. Технология ЭТ отличается от классических вертикальных электрических зондирований высокой пространственной плотностью наблюдения и двумерным подходом к интерпретации, что позволяет использовать её для изучения сложнопостроенных геологических разрезов.

Технология электротомографии была применена нами для изучения многолетнемёрзлых пород Тянь-Шаня. Основными задачами являлись оценка мощности ММП и влияния на её строение локальных факторов, таких как экспозиция склона, тектоника.

Исследования проводились в высокогорье Северного Тянь-Шаня на хребте Илейский Алатау. Участок работ располагался на перевале Жосалы Кезен (абс. высота 3340 м). Здесь в межгорной седловине на площади около 3 км² расположены здания и инженерные сооружения научных организаций Республики Казахстан и Института мерзлотоведения СО РАН (ИМЗ СО РАН). На застроенной территории и за её пределами находятся несколько термометрических скважин. Термометрические скважины вскрывают крупнообломочные толщи верхнеплейстоценовых и голоценовых морен мощностью около 20-25 м, подстилаемых коренными гранитными породами. Межгорная седловина представляет собой узел пересечения двух тектонических нарушений, образующих мощною зону дробления субширотного простирания, протягивающуюся между долинами рек Проходной и Озёрной [1].

По данным Казахстанской высокогорной геокриологической лаборатории ИМЗ СО РАН температура ММП в слое нулевых годовых колебаний изменяется в пределах минус 0,2-0,3 °C. Максимальная предполагаемая мощность ММП на склоне северной экспозиции составляет около ста метров, 70 м из которых вскрыто скважиной № 3 (рис.1а). В 220 м от скв. 3 по направлению к склону южной экспозиции мощность ММП сокращается предположительно до 35-40 м (скв. №1 не вскрыла подошву ММП). Еще через 80 м в скважине №2, пробуренной около отапливаемых до 1987 года зданий, вскрытая мощность мёрзлых пород составляла 13 м. Через 110 м от скважины №2 под склоном южной экспозиции скважина №4 на глубину до 300 м не вскрыла мёрзлые породы.

Профиль электрических зондирований располагался в створе термометрических скважин. Зондирования выполнялись с помощью многоэлектродной электроразведочной станции «Скала-48» [2]. Измерения осуществлялись последовательностью подключения электродов, соответствующей симметричной установке Шлюмберже с максимальными разносами питающей линии 235 м, что обеспечивало глубинность исследований 35-40 м. Инверсия разреза кажущегося сопротивления проводилась в программе Res2Dinv [3].

На рис. 1 показан геокриологический разрез по [4] и геоэлектрический разрез по данным электротомографии. На геоэлектрический разрез снесены проекции скважин. Сами скважины находились на расстоянии от 10 (скв. 1) до 40 м (скв. 3, 2) от оси профиля. Скважина № 4 расположена в 110 м перпендикулярно оси профиля.



1- склоновые отложения; 2- моренные крупноглыбовые отложения с песчано-суглинистым заполнителем; 3- граниты трещиноватые; 4- разломы; 5- мёрзлые породы по данным бурения 1967 г; 6- мёрзлые породы по данным электроразведки 2013 г.

Мёрзлая часть разреза склона северной экспозиции характеризуется высокими (4500-11000 Ом·м) значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). При этом, максимуму УЭС соответствуют ММП с минимальной температурой на глубине 10-15 м, установленной по данным термокаротажа скв. №3. Мощность слоя высокого УЭС превышает глубинность исследований.

По мере продвижения профиля по направлению к склону южной экспозиции (с юга на север) УЭС мёрзлой толщи понижается до 2000-5000, геоэлектрический разрез становится невыдержанным, а в области тектонического нарушения наблюдается уменьшение мощности высокоомного слоя. Уменьшение УЭС мёрзлых пород связано с ростом их температуры, вызванной как сменой экспозиции склона, так и повышенным тепловым потоком по разлому.

На горизонтальной поверхности седловины в зоне тектонического разлома слой высокого сопротивления, ассоциируемый с ММП, становится фрагментарным, что отражает островное строение многолетнемёрзлых пород. УЭС пород здесь меняется от 780 до 5000 Ом·м в зависимости от литологического состава, температуры и льдистости.

На склоне южной экспозиции УЭС трещиноватых гранитов составляет 780-1600 Ом·м, что говорит об их талом состоянии.

В соответствии с характером распределения УЭС вдоль линии профиля в направлении с юга на север можно выделить участок сплошного (I), прерывистого (II) и островного (III) типов распространения мёрзлых пород (рис. 1 б). При этом закономерно изменяется как строение высокоомного слоя (от сплошного типа к прерывистому и островному), так и его УЭС. Изменение УЭС при смене типа ММП от сплошного к островному связано с повышением температуры мёрзлой толщи.

Помимо температуры на УЭС горных пород влияет и литологический состав. На рис. 2 показана гистограмма распределения УЭС пород на перевале Жосалы Кезен. Распределение характеризуется полимодальностью, что говорит о неоднородности выборки. То есть в разрезе присутствуют несколько групп пород, обладающих определённым УЭС.



Рис. 2. Гистограмма распределения УЭС горных пород на участке работ: 1- милониты зоны разлома; 2- талые моренные и склоновые отложения; 3- мерзлые моренные и талые трещиноватые граниты; 4- мёрзлые трещиноватые граниты

На основе известных зависимостей УЭС от температуры и литологического состава пород гистограмма распределения интерпретируется следующим образом. Группе пород с сопротивлением 50 Ом·м соответствуют милониты зоны дробления, так как только присутствием глинистой фракции можно объяснить такие низкие УЭС горных пород. Максимум распределения на 250 Ом·м вызван талыми моренными и склоновыми отложениями, представленными глыбововалунными отложениями с песчаным заполнителем, песчаным и щебенистым грунтом. В диапазоне УЭС 700-2000 Ом·м проявляется два максимума, соответствующих талым трещиноватым гранитам и мёрзлым моренным и склоновым отложениям. Мода, равная 5000 Ом·м отвечает за мёрзлые трещиноватые граниты.

Таким образом, в результате электрических зондирований на перевале Жосалы Кезен установлено, что при смене экспозиции склона закономерно уменьшается мощность слоя высокого сопротивления, интерпретируемого как толща многолетнемёрзлых пород, изменяется его строение от сплошного к фрагментарному, а также уменьшается электрическое сопротивление. Все эти трансформации геоэлектрической модели вызваны сменой типов распространения многолетнемёрзлой толщи от сплошного к прерывистому и островному, происходящей при изменении экспозиции склона. Другим фактором, влияющим на строение ММП, является разломная тектоника. В зоне разломов наблюдаются нарушения в распределении УЭС по высокоомному слою, а также общее уменьшение УЭС пород, связанное с повышением температуры ММП.

Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ № 14-05-00435 А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов А.П., Северский Э.В., Титков С.Н. Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1996. 194 с.

2. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nemfis.ru/pdf/etom.pdf.

3. Loke M.H. Tutorial. RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia: Geotomo Software, 2010. 148 c.

4. Филатов Л. Г., Ровенский М. И., Тузов В. А., Гуленин Н. Е. Методика комплексных геофизических исследований при решении гидрогеологических и инженерно-геологических задач в селеопасных районах Большой и Малой Алматинок // Мат-лы семинара по применению географич. и математич. методов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. Москва, 1967. Вып. 5, с. 159-171.

© В. В. Оленченко, Я. К. Камнев, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. Е. В. Балков, А. К. Манштейн. Макетирование аппаратуры ма-	
логлубинного электромагнитного профилирования и радиально-	
частотного зондирования	
2. С. С. Баранова, К. С. Сердюк, А. Ю. Соболев. Разработка набо-	
ра инструментов для интерпретации данных бокового каротажного	
зондирования в программном комплексе Techlog	
3. В. Н. Глинских, Г. В. Нестерова. Петрофизические модели	
электропроводности глинистых песчаников при интерпретации дан-	
ных электромагнитного каротажа	13
4. 3. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева. Магнитостратиграфия и па-	
леомагнетизм верхнемеловых отложений юго-востока Западной Си-	
бири	18
5. А. А. Горбатенко, К. В. Сухорукова. Погрешность измерения и	
невязка при численной интерпретации сигналов электромагнитного	
каротажа в горизонтальных скважинах	
6. В. А. Горбатенко, В. Н. Глинских, И. В. Суродина. Численные	
решения задач электромагнитного каротажа на графических процес-	
copax	29
7. Е. С. Горностаева, В. В. Оленченко, В. В. Потапов. Строение	
Шадрихинского разлома (правобережное Приобье) по данным аудио-	
магнитотеллурического зондирования	32
8. С. А. Гуськов, В. С. Волкова. История геологического развития	
арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозой-	
ское время	36
9. А. Ю. Девятова, Е. П. Бессонова. Физико-химическое модели-	
рование техногенных процессов переноса элементов в газо-	
аэрозольной фазе	40
10. А. Н. Дробчик, Н. А. Манченко, Н. А. Голиков. Разработка ла-	
бораторных устройств для измерения физических свойств мерзлых	
или гидратосодержащих образцов при различных р-т условиях	46
11. А. Д. Дучков, Л. С. Соколова. Оценка термоупругих напряже-	
ний в земной коре Восточной Тувы в зоне сейсмической активизации	
2011–2012 гг.	52
12. П. Г. Дядьков, А. А. Дучкова, Д. А. Кулешов, А. В. Левичева,	
Д. М. Павлова. О природе магнитных эффектов в пункте Стволовая на	
восточном побережье оз. Байкал в период стояния ледового покрова	58
13. П. Г. Дядьков, Д. А. Кулешов, А. А. Дучкова. Аномалия веково-	
го хода магнитного поля в районе центрального Байкала в период	
сейсмической активизации 2008–2011 гг.	63

14. Т. И. Ельиов. В. Н. Доровский. Определение пористости и объ-	
емных лолей компонент срелы. насышенной волонефтяной смесью	
15. А. Ф. Еманов. А. А. Еманов. Е. В. Лескова. А. В. Фатеев.	
В. Г. Подкорытова. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. (ml = 6.7)	
и 26 02 2012 г (ml = 6.8). Развитие взаимосвязанной активизации.	
$16 A \Phi Еманов A A Еманов A B Фатеев E B Пескова$	
Е В Шевкунова В Г Подкорытова Крупнейший техногенный сейс-	
мический процесс на земле Бачатское землетовсение 18.06.2013 г.	
(ml - 6.1 Kyzface)	80
$17 \ A \ B \ 3\pi 6 \ M \ C \ M \ M \ M \ M \ M \ M \ M \ M$	
17. A. D. J.OOURCKUU, D. C. MOCUMUROS, $1. A. HUUMMUPOS.$ HEIIOID	
зование метода зондирования вертикальными токами при изучении	85
кимосрлитовых грубок и рудных объектов	
18. А. В. Злооинскии, В. С. Могилатов, В. П. Валишов. Использо-	
вание комплекса электроразведочных методов для оконтуривания	01
пефтяных месторождении	
19. С. А. Казанцев. Датчики в геотермии: сравнительный анализ	
20. Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, С. М. Стефаненко. Первые	
результаты математического моделирования индукционных переход-	101
ных характеристик магнитовязких геологических сред	101
21. Н. О. Кожевников, В. В. Потапов, Ю. А. Агафонов. Первыи	
опыт применения аудиомагнитотеллурических зондирований для изу-	100
чения региональной структуры Приольхонья	106
22. Н. О. Кожевников, В. В. Потапов. Выключение тока в гори-	
зонтальной незаземленной петле: теория и эксперимент	111
23. Т. В. Корнеева, Д. О. Кучер. Совокупность геохимических	
и геофизических методов при изучении вертикального и латерального	
распространения высокоминерализованных токсичных растворов	
(г. Карабаш)	116
24. А. С. Кудрявцев, А. Л. Макась, С. П. Подъячев, М. Л. Трошков.	
Система обогащения / разделения для быстрого внелабораторного оп-	
ределения следовых концентраций метилмеркаптана и диметилсуль-	
фида в воздухе с применением мобильногомасс-спектрометра с хими-	
ческой ионизацией при атмосферном давлении	122
25. О. А. Кучай, М. Е. Козина. Определение границы Амурской	
плиты по сейсмологическим данным	128
26. А. А. Лапковская, В. В. Оленченко. Особенности распростра-	
нения многолетнемёрзлых пород на южном склоне Курайского хребта	
(Горный Алтай) по геофизическим данным	
27. В. В. Лапковский. Новый подход к структурной интерпретации	
данных МОГТ на основе интервальных оптимальных отображений	
28. Г. Н. Логинов, С. В. Яскевич, А. А. Дучков. Разработка про-	
граммного пакета предварительной обработки данных скважинного	
микросейсмического мониторинга	
- *	

29. Б. В. Лунев, Т. В. Абрамов. Моделирование соляного диапи-	
ризма расчетом 3d ползущих течений с использованием технологии	
параллельных вычислений CUDA на GPU	
30. Б. В. Лунев, В. В. Лапковский, Т. В. Абрамов. Численное моде-	
лирование развития инверсионных складок в подсолевых слоях	153
31. Е. В. Лысь, Е. И. Роменский, В. А. Чеверда, М. И. Эпов. Рас-	
пространение упругих волн в средах с начальными напряжениями	158
32. Ю. А. Манштейн, И. А. Калугин. Электротомография донных	
осадков: перспективный метод разведки месторождений газогидратов	163
33. Е. Н. Махнач, А. В. Мамаева. Геоэлектрическая модель строе-	
ния зоны сочленения Бахтинского мегавыступа с Курейской синекли-	
зой по данным электромагнитных зондирований М-ЗСБ и МТЗ	
34. И. В. Михайлов, М. Н. Никитенко, В. Н. Глинских. Анализ воз-	
можностей зондов электрокаротажа с индукционно-гальваническим	
возбуждением (по материалам публикаций и результатам моделиро-	
вания)	
35. М. М. Немирович-Данченко, А. А. Шатская. Расчет влияния	
системы наклонных трещин на сейсмическое поле	177
36. Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова,	
И. В. Суродина. Влияние анизотропии геомеханических параметров на	
диаграммы ВИКИЗ и БКЗ по данным численного моделирования	
37. В. В. Оленченко, Я. К. Камнев. Геоэлектрическая модель мно-	
голетнемёрзлой толщи перевала Жосалы Кезен (Илейский Алатау) по	
данным электротомографии	186

CONTENTS

 low depth electromagnetic profiling and radial-frequency sounding	1. E. V. Balkov, A. K. Manstein. Prototype of the equipment for shal-		
2. S. S. Baranova, K. S. Serdyuk, A. Y. Sobolev. Development of tools for russian lateral logging data interpretation within Techlog wellbore software platform	low depth electromagnetic profiling and radial-frequency sounding		
for russian lateral logging data interpretation within Techlog wellbore software platform	2. S. S. Baranova, K. S. Serdyuk, A. Y. Sobolev. Development of tools		
software platform 8 3. V. N. Glinskikh, G. V. Nesterova. Petrophysical models of electrical conductivity of shaly sands for electromagmanetic log interpretation 13 4. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva. Magnetostratigraphy and pa- 13 leomagnetism of upper cretaceous sediments of south-east of West Siberia 1 5. A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova. Measurement error and misfit 1 in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in hori- 23 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solu- 23 ions of electromagnetic logging problems using gpus. 29 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Sha- 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic re- 36 gions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- 40 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing la- 40 boratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate 52 semples at various p-t conditions 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 58 in the crust of eastern tuva in zone seismic activity in 2011-2012 52 </td <td>for russian lateral logging data interpretation within Techlog wellbore</td> <td></td> <td></td>	for russian lateral logging data interpretation within Techlog wellbore		
3. V. N. Glinskikh, G. V. Nesterova. Petrophysical models of electrical conductivity of shaly sands for electromagmanetic log interpretation 13 4. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva. Magnetostratigraphy and pa- 13 leomagnetism of upper cretaceous sediments of south-cast of West Siberia 1 5. A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova. Measurement error and misfit 1 in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in horizontal wells 23 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solutions of electromagnetic logging problems using gpus 29 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Shadriha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- 40 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 52 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of 53	software platform.		
conductivity of shaly sands for electromagmanetic log interpretation 13 4. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva. Magnetostratigraphy and pa- leomagnetism of upper cretaceous sediments of south-east of West Siberia 1 5. A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova. Measurement error and misfit 1 in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in horizontal wells 23 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solutions of electromagnetic logging problems using gpus 29 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Shadriha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- 36 9. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 52 14. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, 52 15. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 16 vecast of take Baikal during the period of ice coverage 58 17. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58	3. V. N. Glinskikh, G. V. Nesterova. Petrophysical models of electrical		
 4. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva. Magnetostratigraphy and paleomagnetism of upper cretaceous sediments of south-east of West Siberia	conductivity of shaly sands for electromagmanetic log interpretation		
 leomagnetism of upper cretaceous sediments of south-east of West Siberia	4. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva. Magnetostratigraphy and pa-		
 5. A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova. Measurement error and misfit in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in hori- zontal wells	leomagnetism of upper cretaceous sediments of south-east of West Siberia		18
 in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in horizontal wells 23 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solutions of electromagnetic logging problems using gpus. 29 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Shadriha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physicchemical modeling of elements transfer in gas-aerosol phase 40 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate semples at various p-t conditions 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses in the crust of eastern tuva in zone seismic activity in 2011-2012 52 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, D. M. Pavlova. On the nature of magnetic effects at Stvolovaya station on the east coast of lake Baikal during the period of ice coverage 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of secular magnetic variation in the central part of Baikal region during the 2008–2011 seismic activity period 63 14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of system saturated with oil water mixture 68 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, V. G. Podkorytova. Tuva earthquakes 27.12.2011 (ml =6.7) and 26.02.2012 (ml = 6.8). The development of an interrelated activation. 74 16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova, K. Shevkunova, V. G. Podkorytova. The largest man-caused seismic 	5. A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova. Measurement error and misfit		
zontal wells 23 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solutions of electromagnetic logging problems using gpus. 29 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Shadriha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- 36 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate 40 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 52 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, 52 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of 58 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, 68 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, 74 16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova, 74 16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova	in numerical interpretation of electromagnetic well logging signals in hori-		
 6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solutions of electromagnetic logging problems using gpus	zontal wells		
 tions of electromagnetic logging problems using gpus	6. V. A. Gorbatenko, V. N. Glinskikh, I. V. Surodina. Numerical solu-		
 7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Shadriha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding	tions of electromagnetic logging problems using gpus		
driha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding 32 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic 36 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- 40 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 46 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses 52 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, 52 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of 58 14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of 58 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, 68 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, 74 16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova, 74 16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova, 58	7. E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, V. V. Potapov. Structure Sha-		
 8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic regions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic	driha fault by result of the audiomagnetotelluric sounding		
 gions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic	8. S. A. Gusskov, V. S. Volkova. Geological history of the arctic re-		
 9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic- chemical modeling of elements transfer in gas-aerosol phase	gions of Western Siberian geosyneclise in cenozoic		
 chemical modeling of elements transfer in gas-aerosol phase	9. A. Y. Devyatova, E. P. Bessonova. Technogenic processes physic-		
 10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing laboratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate semples at various p-t conditions	chemical modeling of elements transfer in gas-aerosol phase	40	
 boratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate semples at various p-t conditions	10. A. N. Drobchik, N. A. Manchenko, N. A. Golikov. Developing la-		
 semples at various p-t conditions	boratory devices for measuring physical properties of frozen or hydrate		
 11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses in the crust of eastern tuva in zone seismic activity in 2011-2012	semples at various p-t conditions		
 in the crust of eastern tuva in zone seismic activity in 2011-2012	11. A. D. Duchkov, L. S. Sokolova. Evaluation thermoelastic stresses		
 12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva, D. M. Pavlova. On the nature of magnetic effects at Stvolovaya station on the east coast of lake Baikal during the period of ice coverage	in the crust of eastern tuva in zone seismic activity in 2011-2012	52	
 D. M. Pavlova. On the nature of magnetic effects at Stvolovaya station on the east coast of lake Baikal during the period of ice coverage	12. P. G. Dyadkov, A. A. Duchkova, D. A. Kuleshov, A. V. Levicheva,		
 the east coast of lake Baikal during the period of ice coverage	D. M. Pavlova. On the nature of magnetic effects at Stvolovaya station on		
 13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of secular magnetic variation in the central part of Baikal region during the 2008–2011 seismic activity period	the east coast of lake Baikal during the period of ice coverage	58	
 secular magnetic variation in the central part of Baikal region during the 2008–2011 seismic activity period	13. P. G. Dyadkov, D. A. Kuleshov, A. A. Duchkova. The anomaly of		
 2008–2011 seismic activity period	secular magnetic variation in the central part of Baikal region during the		
 14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of system saturated with oil water mixture	2008–2011 seismic activity period	63	
 system saturated with oil water mixture	14. T. I. Eltsov, V. N. Dorovsky. Determination of volume fractions of		
 15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev, V. G. Podkorytova. Tuva earthquakes 27.12.2011 (ml = 6.7) and 26.02.2012 (ml = 6.8). The development of an interrelated activation	system saturated with oil water mixture	68	
 V. G. Podkorytova. Tuva earthquakes 27.12.2011 (ml = 6.7) and 26.02.2012 (ml = 6.8). The development of an interrelated activation	15. A. F. Emanov, A. A. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev,		
 26.02.2012 (ml = 6.8). The development of an interrelated activation	V. G. Podkorytova. Tuva earthquakes $27.12.2011$ (ml = 6.7) and		
16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova, E. V. Shevkunova, V. G. Podkorytova. The largest man-caused seismic	26.02.2012 (ml = 6.8). The development of an interrelated activation		
E. V. Shevkunova, V. G. Podkorytova. The largest man-caused seismic	16. A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, E. V. Leskova,		
· •	E. V. Shevkunova, V. G. Podkorytova. The largest man-caused seismic		

process on the earth. Bachatskoe earthquake $18.06.2013$ (ml = 6.1, Kuzbass) 80	
17. A. V. Zlobinskiy, V. S. Mogilatov, R. A. Shishmarev. Using vertical	
electric current sounding for kimberlite pipe and ore surveys	
18. A. V. Zlobinskiy, V. S. Mogilatov, B. P. Balashov. Complex of	
electromagnetic surveying methods with the aim of delineation of oil ac-	
cumulation	
19. S. A. Kazantsev. Sensors in geothermy, comparanive analysis	
20. Ya. K. Kamnev, N. O. Kozhevnikov, S. M. Stefanenko, Mathemati-	
cal modeling of inductive transient response of magnetically viscous geo-	
logocal materials: first results	101
21. N. O. Kozhevnikov, V. V. Potapov, Yu. A. Agafonov, First attempt	
to use audiomagnetotelluric method in large scale tectonic studies of Olk-	
hon region	106
22. N. O. Kozhevnikov, V. V. Potapov, Current turn-off in a horizontal	
ungrounded loop: theory and experiment	111
23. T. V. Korneeva, D. O. Kucher, Complex of geochemical and geo-	
physical approaches using for investigation of the vertical and lateral dis-	
tribution of highly toxic solutions (Karabash district)	116
24 A S Kudrvavtsev A L Makas S P Podvachev M L Troshkov	
Enrichment / separation system for fast on-site determination of methyl	
mercaptanand dimethyl sulphide in air by mobile mass spectrometer with	
atmospheric pressure chemical ionization	122
25 <i>O</i> A Kuchai M E Kozina Determination of the boundary of the	
Amur plate by seismological data	128
26 A A Lapkovskava V V Olenchenko Particular of distribution	
mountain permafrost on the southern slope of the Kurai ridge (Gorny Altai)	
from geophysical data	133
27 V V Lapkovsky A new approach to structural interpretation of	155
cdn data based on interval CDP ontimization transformation	137
28 G N Loginov S V Yaskevich A A Duchkov Developing softa-	
were package for preliminary processing of borehole microseismic data	142
29 B V Lunev T V Abramov Modeling of salt diapirism by calcula-	
tion of 3d creening flow with parallel computing on GPU with CUDA	148
30 B V Lunev V V Lankovsky T V Abramov Numerical modeling	
of inversion folding in the subsalt lavers	153
31 F V Lys F I Romenski V A Cheverda M I Epov Elastic	155
waves propagation in presstressed media	158
32 Yu A Manshtevn I A Caluain Electric resistivity tomography of	150
a lake bottom sediments: promising technique for gas hydrate deposit ex-	
nloration	163
33 F N Mahnach A V Mamaeva Geoelectric model structure	105
zones with junction Bakhtin megavystupa Kureisko syncline by tem sound-	
ings M-KAB and MTZ	168
	100

34. I. V. Mikhaylov, M. N. Nikitenko, V. N. Glinskikh. Analysis of	
electrologging tools with compound induction and galvanic excitation ca-	
pabilities (based on publications and simulation data)	174
35. M. M. Nemirovich-Danchenko, A. A. Shatskaya. Calculation of in-	
fluence of inclined-cracks system on the seismic field	177
36. G. V. Nesterova, I. N. Yeltsov, L. A. Nazarov, L. A. Nazarova,	
I. V. Surodina. Influence of the geomechanical parameter anisotropy on	
VIKIZ and BKZ logs according to the data of numerical simulation	181
37. V. V. Olenchenko, Ya. K. Kamnev. Geoelectric model of perma-	
frost Zhosaly Kezen pass (Ileyskiy Alatau) by results of electrical resistivi-	
ty tomography	186

Научное издание

Х Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

T. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка Н.Ю. Леоновой

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997. Подписано в печать 09.04.2014. Формат 60 × 84 1/16 Печать цифровая. Усл. печ. л. 11, 45. Тираж 100 экз. Заказ Редакционно-издательский отдел СГГА 630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10. Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА 630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.