

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

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

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2015

Ответственные за выпуск:

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

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
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 СГУГиТ, Новосибирск
В. А. Середович

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

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 319 с.

ISBN 978-5-87693-798-8 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-796-4

ISBN 978-5-87693-795-7

В сборнике опубликованы материалы XI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015», 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 СГУГиТ
Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-798-8 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-796-4

ISBN 978-5-87693-795-7

© СГУГиТ, 2015

СОЗДАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

Игорь Андреевич Агбаш

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер лаборатории электромагнитных полей, тел. (913)457-38-98, e-mail: igor.agbash@gmail.com

Андрей Юрьевич Соболев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

В статье предложен способ создания модели околоскважинного пространства, описывающей терригенный разрез, включающий в себя пласты-коллекторы различного насыщения. При этом случайно выбираются независимые параметры (характеристики скважины и бурового раствора, соленость пластовой воды, пористость и нефтенасыщенность), а распределение УЭС определяется по петрофизическим зависимостям.

Ключевые слова: бенчмарки, геофизика, каротаж, околоскважинное пространство.

GEOELECTRIC MODELS FOR TESTING WELL-LOGGING DATA PROCESSING ALGORITHMS

Igor A. Agbash

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer of the Laboratory of Electromagnetic fields, tel. (913)457-38-98, e-mail: igor.agbash@gmail.com

Andrey Y. Sobolev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Research Scientist, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

The paper proposes a way to create a model of terrigenous cut including oil- and water-saturated reservoirs. Independent parameters are chosen randomly (parameters of the well and the mud, formation water salinity, porosity and oil saturation), and resistivity distribution is determined by the petrophysical dependencies.

Key words: benchmarks, geophysics, borehole environment.

Бенчмарки – стандартизованные наборы тестовых данных – необходимый инструмент для научного исследования, ориентированного на практическое применение. Бенчмарки позволяют оценивать работу алгоритмов и сравнивать их между собой. Они используются во многих областях науки. В компьютерном моделировании на основе бенчмарков определяют качество работы алгоритма или прибора. Например, сравнение работы видеокарт (количество кадров в секунду, наличие и количество артефактов, температура процессора)

проводится моделированием стандартизованного набора сложных 3D-сцен (3DMark [1]).

В скважинной геофизике, в направлении, занимающемся обработкой каротажных сигналов (выделение границ, восстановление параметров околоскважинного пространства), бенчмарки пока редкое явление. Известна, например, оклахомская модель (рис. 1), которая являлась первой многопластовой моделью околоскважинного пространства [2], широко используемой для тестирования [3–5]. Также используется высококонтрастная модель Chirp model [5, 6] (рис. 2).

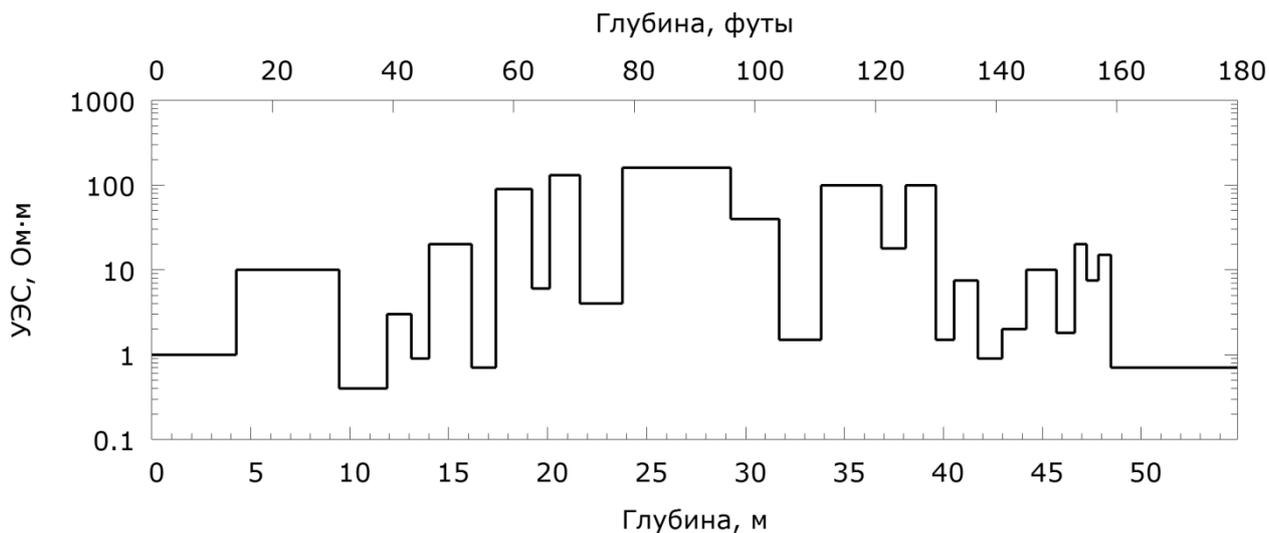


Рис. 1. Оклахомская модель

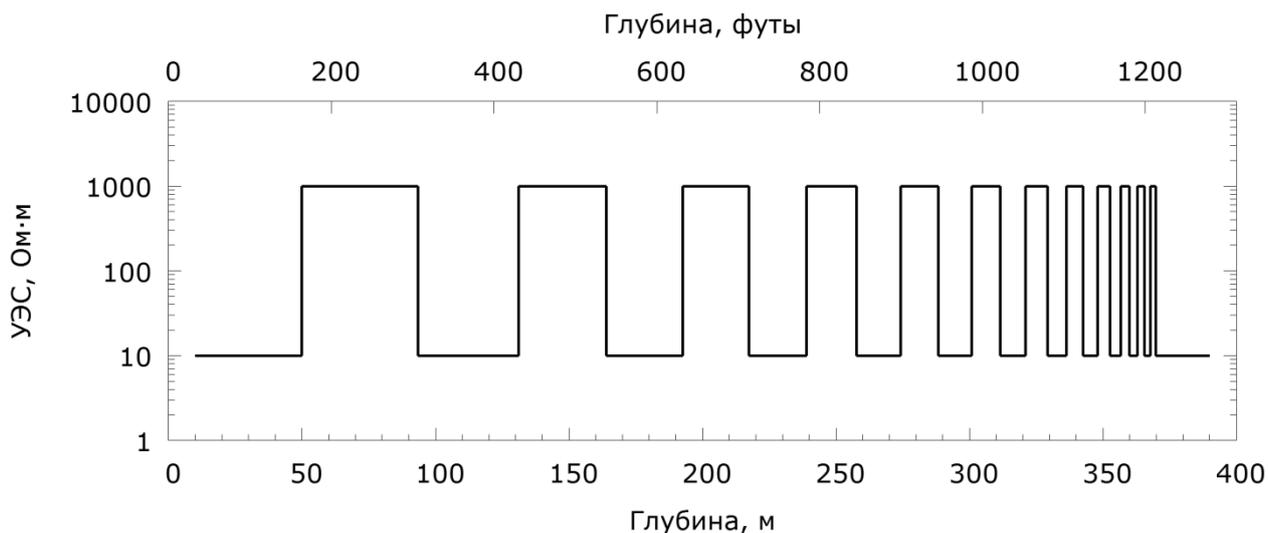


Рис. 2. Модель Chirp

В ходе работы над созданием автоматического средства расстановки границ потребовалось большое количество синтетических каротажных данных. Поскольку разные зонды обладают разной глубиной исследования, модели без проникновения типа Оклахомской не вполне имитируют разрез. Необходим переход к более сложным моделям, учитывающим проникновение фильтрата вглубь пласта. Задание сопротивлений зоны проникновения и пласта как независимых случайных параметров приводит к нереалистичным моделям.

Для моделирования требуется радиальное распределение сопротивлений, которое определяется гидродинамическими процессами фильтрации и в типичных случаях связано с петрофизическими параметрами по закону Арчи:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{1}{A} C \varphi^m S_w^n,$$

где C – соленость, φ – пористость, S_w – водонасыщенность. Величины показателей цементации m и насыщенности n могут определяться по лабораторным исследованиям на коллекции керн; при отсутствии такой информации полагаются равными 2 [7]. Значение коэффициента A также положим равным 2. Таким образом, удельное электрическое сопротивление (УЭС):

$$\rho = \frac{2}{C} \cdot \left(\frac{\varphi}{100}\right)^{-2} \cdot \left(1 - \frac{S_o}{100}\right)^{-2},$$

где $S_o = 1 - S_w$ – нефтенасыщенность, а величины φ и S выражены в процентах.

Таблица 1

Параметры околоскважинного пространства

	Обозначение	Диапазон	
Радиус скважины	$r_{\text{СКВ}}$, М	0.07	0.2
УЭС бурового раствора	$\rho_{\text{СКВ}}$, Ом*М	0.02	2
Толщина пласта	$h_{\text{пл}}$, М	0.6	10
Соленость пласта	$C_{\text{пл}}$	20	50
Пористость пласта	$\varphi_{\text{пл}}$	10	25
Нефтенасыщенность в пласте	$S_{\text{пл}}$	10^{-3}	0.75
Нефтенасыщенность в зоне проникновения	$S_{\text{зп}}$	0.0	0.1
Соленость бурового раствора	$C_{\text{СКВ}}$, Г/Л	$\frac{2}{\rho_{\text{СКВ}}}$	
УЭС пласта	$\rho_{\text{пл}}$, Ом*М	$\frac{A}{C_{\text{пл}}} \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{пл}}}{100}\right)^{-2} \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{пл}}}{100}\right)^{-2}$	
УЭС зоны проникновения	$\rho_{\text{зп}}$, Ом*М	$\frac{A}{C_{\text{зп}}} \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{пл}}}{100}\right)^{-2} \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{зп}}}{100}\right)^{-2}$	

Выбирая в заданных диапазонах (табл. 1) значения петрофизических параметров среды, мы можем получить УЭС пласта и зоны проникновения из закона Арчи и определить геоэлектрическую модель околоскважинного пространства (рис. 3). Значения выбираются случайно с равномерным распределением (соленость в скважине и пласте; нефтенасыщенность в пласте и в зоне проникновения; пористость пласта) или логарифмическим распределением ($h_{пл}$, $\rho_{скв}$).

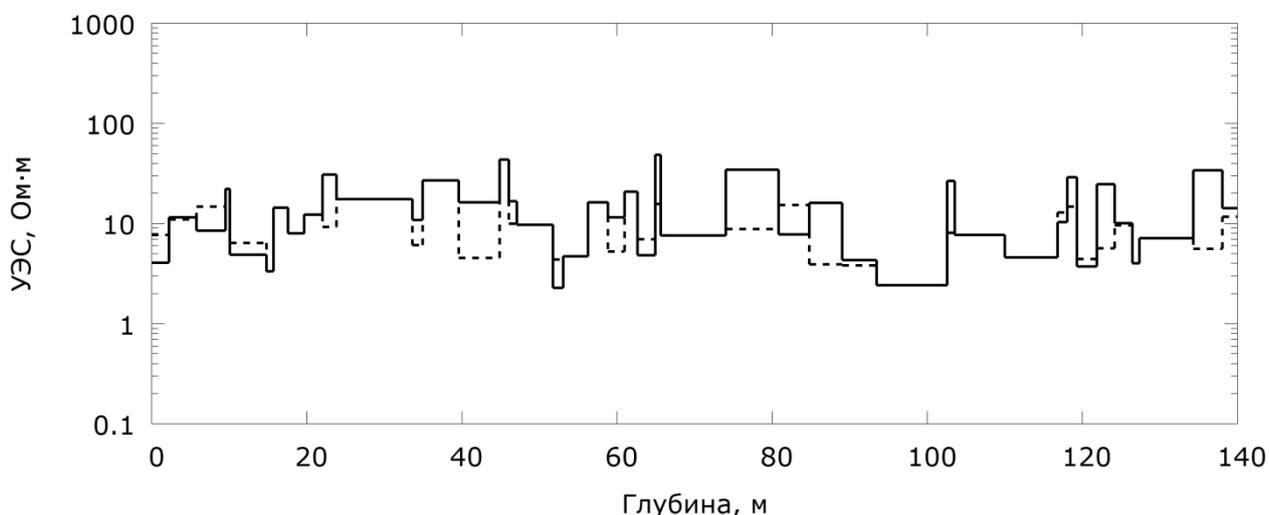


Рис. 3. Пример геоэлектрической модели.

Сплошная линия – УЭС незатронутой части пласта,
штриховая – УЭС зоны проникновения. Проводящий буровой раствор

Таким образом, можно автоматически построить любое необходимое количество двумерных моделей терригенного разреза, включающих пласты-коллекторы; при этом соотношения сопротивлений в этих моделях будут петрофизически согласованы по построению. Синтетические сигналы методов электрокаротажа в этих разрезах можно использовать для тестирования алгоритмов обработки каротажных сигналов. Задавая конкретные диапазоны параметров и значения петрофизических коэффициентов, можно получить тестовый набор, приближенный к характеристикам групп пластов конкретного месторождения.

На практических каротажных диаграммах присутствует шумовая составляющая, и при тестировании алгоритмов обработки ее надо учитывать. Этот шум складывается из геологических особенностей разреза (тонкая структура пластов), технологических причин (движение зонда в скважине) и собственно аппаратных шумов, и ввести реалистичную модель шума не так просто. Обычным является добавление белого (гауссового) шума фиксированного уровня (например, в работе [5] использовали 3 %).

Однако уровень сигнала и, следовательно, погрешность измерений и аппаратный шум может существенно зависеть от параметров окружающей среды. Для аппаратуры ВИКИЗ этот вопрос изучался в [8, 9], но согласованной модели не предложено.

Для целей настоящей работы предлагается использовать добавление белого шума, уровень которого связан с погрешностью измерения аппаратуры. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения ВИКИЗ разности фаз не более $(0.2/\Delta\varphi + 0.03) \cdot 100, \%$. Для БКЗ в исполнении СКЛ (НПП ГА Луч) предел допускаемой основной относительной погрешности измерения кажущегося УЭС не более $2.5 + 0.004 \cdot (5000/\rho_{\text{н}}^{\text{к}} - 1), \%$.

Предложена процедура автоматического создания геоэлектрических моделей околоскважинного пространства, описывающих терригенный разрез, включающий в себя глинистые и плотные пропластки и пласты-коллекторы различного насыщения. При этом в заданном диапазоне случайно выбираются независимые параметры (характеристики скважины и бурового раствора, соленость пластовой воды, пористость и нефтенасыщенность), а распределение УЭС определяется по петрофизическим зависимостям – по формуле Арчи.

Для имитации аппаратурного шума предложено использовать белый (гауссов) шум с амплитудой, зависящей от технических характеристик аппаратуры и от измеряемого сигнала.

Параметры моделей и зашумленные синтетические сигналы зондов электрокаротажа предлагается использовать для тестирования, оценки и сравнения алгоритмов обработки каротажных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3DMark [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.3dmark.com/>
2. Barber T. D., Broussard T., Minerbo G. N. Sijercic, Z. and D. Murgatroyd, Interpretation of multiarray induction logs in invaded formations at high relative dip angles: The Log Analyst, 40, 1999. – N 3 (May–June). – P. 202–217.
3. Rosthal R., Barber T., Bonner S. Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // SPWLA 44th Annual Logging Symposium (Texas, USA, June 22–25, 2003): conf. paper. - Texas, 2003. - Paper QQ. - 14p.
4. Anderson B. I., Barber T. D., Habashy T. M. The interpretation and inversion of fully triaxial induction data; a sensitivity study // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium (Osio, Japan, June 2–5, 2002): conf. paper. - Osio, 2002. - Paper O. - 13.
5. Michael Zhdanov, David Kennedy, Arvidas Cheryauka, Ertan Peksen. Modeling of tensor induction well logging in a deviated well // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium (Texas, USA, June 17–20, 2001): conf. paper. - Texas, 2001. - Paper R. - 14.
6. Fang S., Wang T. Accurate Born simulation of induction response using an optimal background // SEG 2000 Expanded Abstracts. – Calgary. P. 1806–1809.
7. Нестерова, Г. В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) // Каротажник: научно-технический вестник. – 2008. – № 10 (175). – С. 81–101.
8. Соболев А. Ю., Жмаев С. С. Статистический анализ зондов ВИКИЗ // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – С. 242–244.
9. Эпов М. И., Глинских В. Н. Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2005. – 98 с.

© И. А. Азбаш, А. Ю. Соболев, 2015

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ И GPS НАБЛЮДЕНИЙ*

Геннадий Петрович Арнаут

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист, тел. (383)330-79-31, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

Евгений Николаевич Калиш

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Михаил Георгиевич Смирнов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер-конструктор, e-mail: smirnov.m.g@iae.nsk.su

Юрий Фёдорович Стусь

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: stus@iae.nsk.su

Исследованы результаты измерений неприливных вариаций ускорения силы тяжести Δg , проведенных в 1992–2014 гг. на сейсмостанции «Талая» в Слюдянском районе Иркутской области и в г. Иркутске, а также данные GPS-наблюдений вертикальных движений земной поверхности Δh в районе этих пунктов. Показано, что на изменения Δg преимущественное влияние оказывало изменение плотности земной коры, а на изменение Δh – горизонтальное сжатие-растяжение литосферы на границе Байкальской рифтовой системы и Сибирской платформы.

Ключевые слова: абсолютный лазерный баллистический гравиметр, мониторинг вариаций ускорений силы тяжести, рифтовая зона, GPS-наблюдения, вертикальные движения земной поверхности.

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта программы Президиума РАН № 4.1.

EVALUATION OF THE EFFECTS DEFORMATION PROCESSES IN GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN SOUTHWESTERN BAIKAL GEODYNAMIC POLYGON ACCORDING TO GAVIMETRIC AND GPS MEASUREMENTS

Gennadii P. Arnautov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., tel. (383)330-79-31, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

Eugenii N. Kalish

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., e-mail: kalish@iae.nsk.su

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: danossov@ngs.ru

Igor S. Sizikov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Mikhail G. Smirnov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: smirnov.m.g@iae.nsk.su

Yurii F. Stus

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., e-mail: stus@iae.nsk.su

Studied the results of measurements of variations of non-tidal gravity acceleration Δg , conducted in 1992-2014 years on seismic station "Talaya" in Slyudyanka district of Irkutsk region and on city Irkutsk, as well as GPS-data observations of vertical movements of the earth's surface Δh in the area of these points. It shown that Δg variations mainly due to the change of density of the crust and Δh variations – horizontal compression-stretching of the lithosphere at the boundary of Baikal rift system and the Siberian platform.

Key words: absolute laser ballistic gravimeter, monitoring variations of acceleration due to gravity, the rift zone, GPS-observations, the vertical movement of the earth surface.

В сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) начиная с 1992 г. проводятся регулярные измерения неприливных вариаций ускорения силы тяжести Δg (гравиметрический пункт находится на сейсмостанции «Талая» в Слюдянском районе Иркутской области). Для таких измерений используются прецизионные лазерные баллистические гравиметры, разработанные в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН [1, 2]. По точности измерений эти гравиметры находятся на уровне лучших мировых образцов: среднеквадратическая погрешность измерений Δg не превосходит 1÷2 мкГал ($1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$), что подтверждено официальными международными метрологическими сравнениями лучших гравиметров мира [3].

Практически одновременно (с отставанием не более трех суток) этими же гравиметрами проводятся контрольные измерения в платформенной области (в г. Новосибирск и в г. Иркутск). Результаты этих гравиметрических наблюдений представлены на рис. 1. В этих результатах учтено приливное воздействие Луны и Солнца, а также, согласно рекомендациям Международной гравиметрической комиссии [4], влияние смещения полюса Земли и притяжения изменяющихся атмосферных масс. За нулевое значение Δg принят результат первого измерения g .

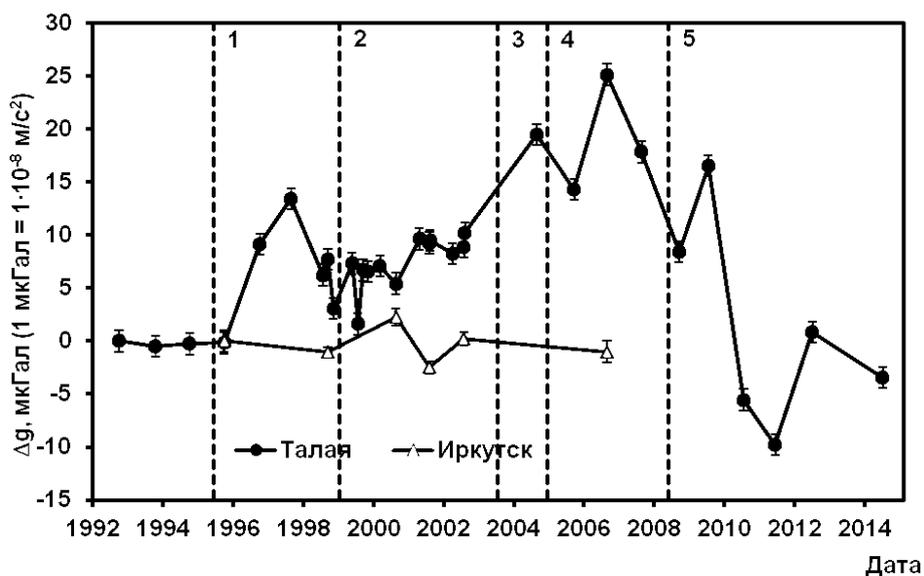


Рис. 1. Вариации ускорения силы тяжести: на сейсмостанции «Талая» и в Иркутске (здесь вертикальными штрихами указаны моменты сильных землетрясений: 29.06.1995 ($M=5,5$; $L=50$ км); 25.02.1999 ($M=5,9$; $L=90$ км); 17.09.2003 ($M=5,3$; $L=155$ км); 23.02.2005 ($M=5,3$; $L=160$ км); 27.08.2008 ($M=6,3$; $L=30$ км); L – удаление эпицентра от пункта «Талая»)

На основании результатов контрольных гравиметрических наблюдений в г. Иркутск и аналогичных измерений в Новосибирской области можно заключить, что наблюдаемые на пункте «Талая» вариации Δg являются региональными и связаны с сейсмическими процессами в БРЗ. При этом основными причинами изменений Δg могут быть две: изменения плотности $\Delta \rho$ земной коры в районе наблюдений и вариации высоты Δh пункта наблюдений.

При сжатии участка земной коры (ЗК) увеличивается его плотность $\Delta \rho$ и, следовательно, увеличивается значение Δg в этом районе. Одновременно с этим при упругом горизонтальном сжатии этого участка происходит поднятие его поверхности Δh и, следовательно, уменьшение значения Δg . При растяжении этого участка изменяются знаки значений Δh , $\Delta \rho$, и Δg .

Результаты GPS наблюдений подтверждают этот вывод (рис. 2). На этом рисунке приведены вариации вертикальных движений поверхности Земли на

двух близлежащих к гравиметрическому пункту «Талая» точках GPS наблюдений [5]: пункт «Слюдянка» удален от пункта «Талая» на 5,3 км, а пункт «Култук» – на 11,7 км. Здесь же показаны результаты GPS мониторинга вертикальных движений пункта «Иркутск». Результаты GPS-измерений на пункте «Талая» отражают только данные наблюдений последних лет [6] и отличаются от данных, приведённых на рис. 2 не более, чем на погрешность измерений.

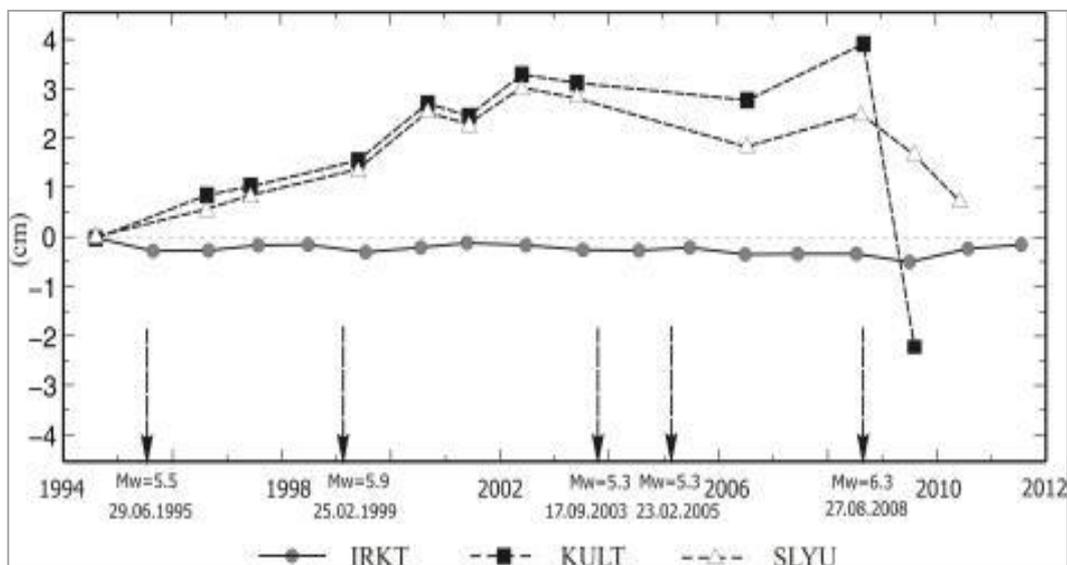


Рис. 2. Временные серии абсолютных вертикальных движений пунктов за период с 1994 по 2011 гг., расположенных на стабильной Сибирской платформе (IRKT, г. Иркутск) и вблизи эпицентра Култукского землетрясения (27.08.2008г., Mw=6.3) (KULT, п. Култук и SLYU, г. Слюдянка)

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что изменения Δg и Δh до Култукского землетрясения 2008 г. имеют положительный тренд со средней скоростью $\Delta g = 2$ мкГал/год и $\Delta h = (1,4 \div 3)$ мм/год на пунктах «Слюдянка» и «Култук»

соответственно. Однако из физических соображений зависимость изменений Δg и Δh должна иметь противоположный знак. Устранить это противоречие можно, учитывая последствия деформационных процессов на данном участке литосферы, изложенные ниже.

Поднятие Δh уровня земной поверхности в среднем до 2008 г., как видно из рис. 2, могло происходить из-за горизонтального упругого сжатия литосферы в этом районе [5]:

$$\Delta h = v \cdot d \cdot \xi \quad (1)$$

Здесь v – коэффициент Пуассона, d – глубина деформированного слоя Земли, ξ – изменение объемной деформации.

По результатам деформационных измерений, проведенных В. Ю. Тимофеевым (ИНГГ СО РАН) [6] средняя скорость изменений ξ на поверхности Земли

в районе пункта «Талая» была равна $\xi = 2 \cdot 10^{-6}$ /год. При этом глубина очагов землетрясений в исследуемом районе располагалась в средней части земной коры (10–20 км) а мощность земной коры составляет 35–40 км. Для оценки минимального влияния сжатия ЗК примем $d = 10$ км. Примем также типичное для литосферы значение $\nu = 0,25$ и по формуле (1) определим $\Delta h = (0,25 \cdot 10^6 \text{ см}) \cdot 2 \cdot 10^{-6}/\text{год} = 0,5 \text{ см/год}$.

Учитывая приближенный характер проведенной оценки, можно считать, что этот результат удовлетворительно (в пределах погрешностей приближенной оценки и результатов измерений) совпадает с данными (1,4 ÷ 3) мм/год, приведенными на рис. 2.

Поднятие уровня земной поверхности на высоту Δh приводит в соответствии с классической формулой гравиметрии к уменьшению значения силы тяжести, измеренного установленным на этой поверхности гравиметром на величину $\Delta g_h = -\gamma \cdot \Delta h$.

Здесь γ – значение вертикального градиента силы тяжести в свободном воздухе. По результатам измерений, произведенным В.Ю. Тимофеевым (ИНГГ СО РАН) относительным гравиметром Лакоста-Ромберга (LCRG-402) значение $\gamma = 1,8 \text{ мкГал/см}$ [6]. Следовательно, $\Delta g_h = -1,8 \cdot 0,5 \text{ мкГал/год} = -0,9 \text{ мкГал/год}$.

Второй причиной изменений Δg является изменение ρ плотности участка земной коры $\Delta \rho$ из-за его деформации ξ : $\Delta \rho = \rho \cdot \xi$.

Из приближенной формулы притяжения плоскопараллельного слоя [7,8] можно определить изменение Δg_ρ от изменения плотности деформированного участка литосферы и изменения его глубины:

$$\Delta g_\rho = 2\pi \cdot G \cdot \Delta \rho \cdot (d + \Delta h) + 2\pi \cdot G \cdot (\rho + \Delta \rho) \cdot \Delta h \approx 2\pi \cdot G \cdot \Delta \rho \cdot d + 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot \Delta h \quad (2)$$

Здесь $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{гс}^2$ – гравитационная постоянная. Примем также типичное для литосферы значение $\rho = 2,67 \cdot 10^8 \text{ г/см}^3$ и упоминавшиеся выше значения $d = 10$ км, $\xi = 2 \cdot 10^{-6}/\text{год}$ и $\Delta h = 0,5 \text{ см/год}$. Тогда из (2) получим значение $\Delta g_\rho = 3 \text{ мкГал/год}$. Суммарное изменение ускорения силы тяжести из-за деформационных процессов в литосфере в районе пункта «Талая» будет равно

$$\Delta g = \Delta g_\rho + \Delta g_h = (3 - 0,9) \text{ мкГал/год} \approx 2 \text{ мкГал/год}$$

Этот оценочный результат удовлетворительно совпадает со средним значением тренда, измеренным лазерным гравиметром в период 1995 – 2007 гг. и также равным 2 мкал/год. Из этого результата также следует преимущественное влияние на изменение Δg изменений плотности деформируемой геологической среды. Особенно значимо это влияние проявилось после землетрясения 2008 г.: произошла резкая разрядка напряжения в геологической среде, сопровождающаяся разрушением этой среды и резким уменьшением в период 2009–2010 гг. значения силы тяжести со скоростью около 17 мкГал/год.

Таким образом, оценка причин зарегистрированных изменений Δg показывает преимущественное влияние на них изменений плотности земной коры при её деформации, а изменение Δh обусловлено сменой знака этой деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г. и др. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // Автометрия. -1994. - № 3. - С 3–11.
2. Бунин И.А., Калиш Е.Н., Носов Д.А. и др. Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр //Автометрия. - 2010. - Т. 46, № 5. - С. 94–102.
3. Арнаутов Г.П. Результаты международных метрологических сравнений абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автометрия. - 2005. - Т. 41, № 1. - С. 126–136.
4. Resolutions international gravity commission. International absolute gravity base station network // Bull. Inform. BGI. Toulouse, France. - 1984. - N 58.
5. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Носов Д.А., Саньков В.А., Сизиков И.С., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф. Мониторинг вертикальных движений земной поверхности на пунктах Байкальского геодинимического полигона по данным гравиметрических и GPS наблюдений // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2013 (24-26 апреля 2013 г.), т. 3. Недропользование, горное дело, новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, геоэкология: сб. материалов IX Международного научного конгресса и выставки. - Новосибирск: СГГА, 2013. - С. 203–208.
6. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Арнаутов Г.П., Смирнов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Грибанова Е.И. Вариации силы тяжести и современная геодинамика юго-западной части Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика (GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS), ISSN 2078-502X; 2013, vol. 4, issue 2. – P. 119–134, dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0094.
7. Sasagawa G. and Zumberge M. Absolute gravity measurements in California, 1984-1989 // Journal of Geophysical Research. - 1991. - V. 96, N 82. - P. 2501–2513.
8. Цубои Т. Гравитационное поле Земли. - М.: Мир, 1982. – 286 с.

© Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, Д. А. Носов, И. С. Сизиков,
М. Г. Смирнов, Ю. Ф. Стусь, 2015

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Дмитрий Евгеньевич Аюнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, ведущий программист лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)333-03-99, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Альберт Дмитриевич Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, 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, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)330-25-91

Обсуждаются результаты измерений теплопроводности образцов пород баженовской свиты из керна скважин Салымская-2802, Малобалыкская-901, Чупальская-67. Измерения выполнялись прибором «Измеритель теплопроводности сканирующий». Всего выполнено 180 измерений теплопроводности в двух направлениях – параллельном и перпендикулярном слоистости. В обоих направлениях теплопроводность пород баженовской свиты изменяется от 1,1 до 2,5 Вт/м/К при среднем значении 1,5–1,7 Вт/м/К.

Ключевые слова: Западно-Сибирская плита, баженовская свита, измеритель теплопроводности сканирующий, коэффициент теплопроводности пород.

THERMAL CONDUCTIVITY OF BAZHENOV FORMATION ROCKS

Dmitry E. Ayunov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Laboratory of natural geophysical fields, tel. (383)333-03-99, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Albert D. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Laboratory of natural geophysical fields, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Ludmila S. Sokolova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Laboratory of natural geophysical fields, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

The results of thermal conductivity measurements for the rock samples from bazhenov formation core of the Salymenskaya-2802, Malobalykenskaya-901 and Chupalskaya-67 boreholes are discussed. The device «Scanning thermal conductivity meter» was used for the measurements. In all

180 thermal conductivity measurements were carried out in two directions – parallel and perpendicularly to the sample layers. In both directions thermal conductivity of bazhenov formation rocks varies from 1,0 to 2,5 W/m/K, on the average 1,6-1,7 W/m/K.

Key words: West Siberian plate, bazhenov formation, scanning thermal conductivity meter, thermal conductivity of rocks.

Баженовская свита выделяется в Западной Сибири на территории около миллиона квадратных километров и в пределах практически всей площади распространения находится в главной зоне нефтеобразования (на глубине 2–3 км, температура 70–134 °С). Ряд исследователей полагает, что к формированию коллекторов в баженовской свите причастно глубинное тепло [1, 2]. Температурные измерения в глубоких скважинах позволили установить существенное возрастание геотермического градиента (до 50–60 мК/м) в породах баженовской свиты (средний градиент в породах мела – 30 мК/м, доюрского фундамента – 25 мК/м) [3]. Причиной наблюдаемого изменения градиента может быть низкая теплопроводность (λ) баженинов по сравнению с породами других свит [4].

Баженины – трудный объект для измерений теплопроводности на приборах, требующих специальной подготовки образцов. Из битуминозных аргиллитов трудно готовить образцы, так как они часто разрушаются при механической обработке. Создание прибора ИТС (Измеритель теплопроводности сканирующий) [5] позволило нам впервые сравнительно детально изучить теплопроводность пород баженовской свиты по керну скважин Салымского района.

В основу прибора ИТС положен метод оптического сканирования образца подвижным источником тепла (электролампа с отражателем) и регистрации максимальных приращений температуры (T) нагреваемой поверхности подвижным инфракрасным радиометром. Теплопроводность определяется путем сравнения максимальных приращений T на исследуемом образце и на эталонах с известной теплопроводностью при одновременном их сканировании.

В данной работе в качестве эталонов использовались: мрамор ($\lambda = 2,86$ Вт/м/К), плавленый кварц КВ ($\lambda = 1,335$ Вт/м/К) и стекло К-8 ($\lambda = 1,081$ Вт/м/К). Измерения прибором ИТС могут быть выполнены без предварительной обработки на любой плоской или цилиндрической поверхности, если неровности не превышают $\pm 0,5$ мм. Качественные результаты получаются при измерениях на образцах, размер которых более 40x40x20 мм. Скорость сканирования составляет 4 мм/сек. В результате измерения определяются максимальное ($\lambda_{\text{макс}}$), минимальное ($\lambda_{\text{мин}}$) и среднее ($\lambda_{\text{ср.}}$) значения теплопроводности, а также коэффициент тепловой неоднородности $\beta = (\lambda_{\text{макс}} - \lambda_{\text{мин}}) / \lambda_{\text{ср.}}$, который характеризует тепловую неоднородность конкретного образца (в однородных породах $\beta \rightarrow 0$).

С помощью прибора ИТС изучена теплопроводность 139 образцов из керна скважин Салымская-2802, Малобалькская-901 и Чупальская-67 (Салымский нефтегазоносный район). По возможности на каждом полноразмерном керне проводилось два измерения (сканирования): вдоль оси керна по боковой поверхности и на торцах керна. В первом случае оценивалось значение теплопро-

водности вдоль слоистости (λ_1), во втором – вдоль оси керна, т.е. перпендикулярно слоистости (λ_2). В табл. 1 приведены данные о количестве измерений по каждой скважине. Очевидно, что наиболее детально изучена теплопроводность пород баженовской свиты по керну скважины Салымская-2802, поэтому в дальнейшем будем анализировать в основном данные именно по этой скважине. Отметим, что по геолого-геофизическим данным [6, 7], в разрезе скважины Салымская-2802 баженовская свита выделяется в интервале 2796–2830 м, т.е. нами изучена теплопроводность только верхней половины баженовской свиты, вскрытой этой скважиной.

Таблица 1

Количество измерений теплопроводности

Скважина	Глубина, м	Число образцов	Число измерений		
			λ_1	λ_2	$\lambda_1 + \lambda_2$
Салымская-2802	2786-2816	128	122	37	31
Малобалыкская-901	2885-2912	7	7	7	7
Чупальская-67	2945-2956	4	4	4	4
Всего		139	133	48	42

На рис. 1 представлены гистограммы значений λ образцов керна из баженовской свиты по скважине Салымская-2802 (интервал 2796–2816). Они показывают, что теплопроводность пород свиты изменяется в широких пределах – в основном от 1,1 до 2,6 Вт/м/К. Отдельные керн характеризуется более высокой теплопроводностью (до 3 Вт/м/К). Оба распределения близки к нормальному с одним модальным значением 1,6–1,7 Вт/м/К. Правая ветвь гистограммы λ_1 растянута в сторону увеличения до 3,0 Вт/м/К (в основном измерения в интервале 2814–2816 м). Средние значения λ_1 и λ_2 составляют соответственно $1,69 \pm 0,33$ Вт/м/К (по 80 измерениям) и $1,52 \pm 0,24$ Вт/м/К (по 20 измерениям).

На рис. 2 показано изменение λ_1 и λ_2 по глубине в интервале 2786–2816 м для скважины Салымская-2802.

Теплопроводность измерена в трех интервалах: 2786–2796 м, 2799–2809 м и 2812–2816 м. Рассмотрим изменения λ в каждом из них.

Интервал 2786–2796 м, перекрывающий баженовскую свиту, сложен в основном глинистыми аргиллитами мелового возраста с редкими линзами известняка. С глубиной аргиллиты изменяются от серых до темно-серых и черных, что связано с увеличением в них органики. Теплопроводность в этом интервале постепенно уменьшается с глубиной в среднем от 2 до 1,5 Вт/м/К, причем в основном сохраняется превышение λ_1 над λ_2 (на 0,5–0,6 Вт/м/К). Аномально высокие значения λ_1 (3–4 Вт/м/К), вероятно, фиксируют скопления карбонатного материала.

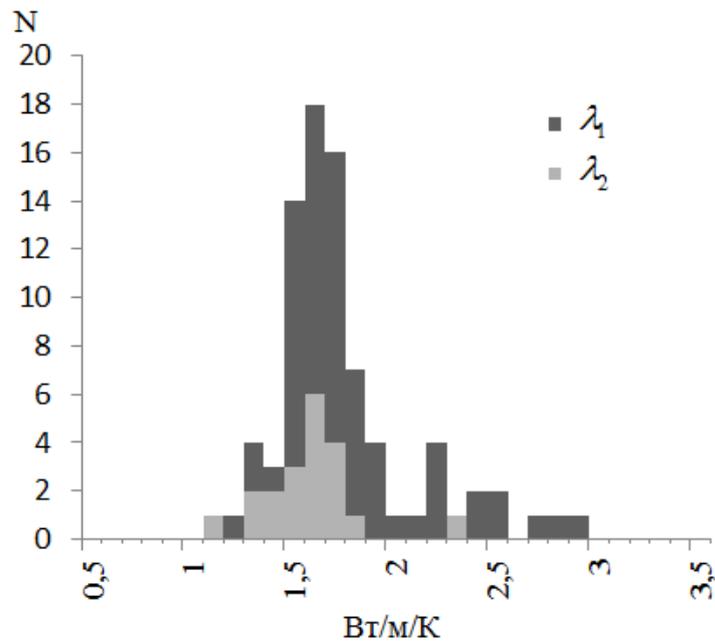


Рис. 1. Гистограммы значений λ пород баженовской свиты по скважине Салымская-2802 (интервал 2796–2816 м).
 λ_1 – 80 значения, λ_2 – 20 значений

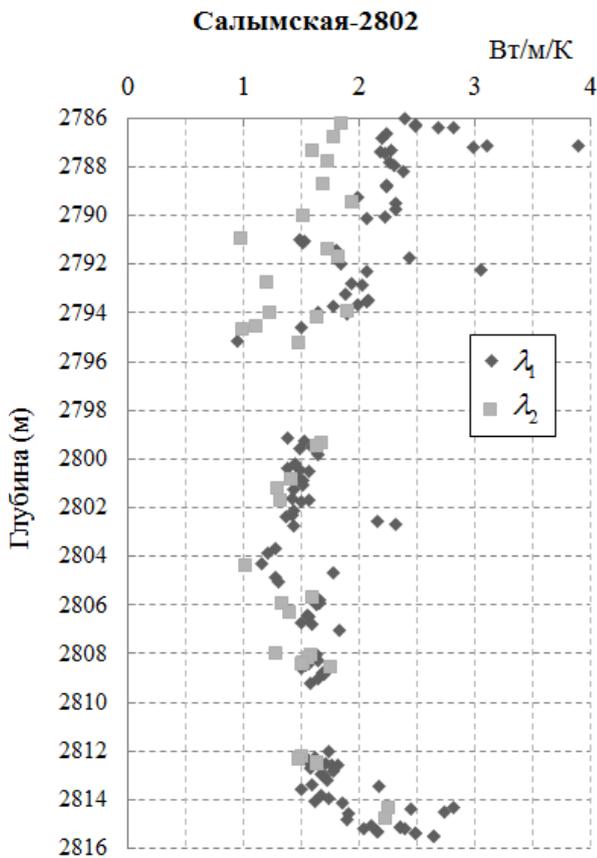


Рис. 2. Изменение теплопроводности (λ_1 и λ_2) пород скважины Салымская-2802 в интервале 2786–2816 м.
 По геолого-геофизическим данным [6, 7] баженовская свита в этой скважине располагается на глубинах 2796–2830 м.
 Геологический разрез по [6, 7]:
 породы мелового возраста:
 I. 2786–2796 м – глинистые аргиллиты;
 баженовская свита:
 II. 2796–2801, 2803–2805.5, 2807–2814 м – глинисто-кремнистые породы с высоким содержанием $C_{орг}$ и редкими карбонатными прослоями;
 III. 2801–2803, 2805.5–2807, 2814–2816 м – породы, обогащенные кремнием (силициты)

Интервал 2799–2809 м представлен отложениями баженовской свиты и сложен в основном черными глинисто-кремнистыми аргиллитами с высоким содержанием органики и редкими прослоями известняка. Этот интервал в отличие от других характеризуется примерно одинаковой теплопроводностью во всех направлениях (в среднем 1,5 Вт/м/К). На глубинах 2801–2803 м и 2805–2807 м выделяются слои, обогащенные кремнием (силициты).

Интервал 2812–2816 м также представлен отложениями баженовской свиты, которая здесь сложена черными глинисто-кремнистыми аргиллитами, обогащенными органикой. На глубинах 2810–2814 м теплопроводность пород во всех направлениях сохраняется примерно одинаковой, но более высокой (в среднем 1,6–1,7 Вт/м/К), чем во втором интервале. Ниже 2014-и м выявлен слой пород, обогащенных кремнием (силициты) с редкими карбонатными прослоями. В его пределах значения λ_1 и λ_2 резко возрастают (λ_1 – до 2,5–2,8, λ_2 – до 2,3 Вт/м/К), что может быть связано с влиянием кремнезема и карбонатов.

В скважинах Малобалыкская-901 и Чупальская-67 измерено всего 11 образцов (табл. 1) аргиллитов из баженовской свиты. Измерения выполнены по обоим направлениям. По первой скважине средние значения λ_1 и λ_2 составляют 2,0 и 1,4 Вт/м/К, а по второй – 1,8 и 1,2 Вт/м/К.

В результате выполненных исследований установлена аномально низкая теплопроводность пород (в основном аргиллиты) баженовской свиты. В вертикальном направлении она составляет 1,2–1,6 Вт/м/К, т.е. в 1,5–2 раза меньше теплопроводности вышерасположенных меловых пород [3]. Это изменение λ приводит к наблюдаемому увеличению геотермического градиента в пределах свиты и соответственно к росту температуры в нижележащих породах.

Благодарности. Авторы благодарят академика А.Э. Конторовича и сотрудников лабораторий седиментологии и геологии нефти и газа Западной Сибири ИНГГ СО РАН за поддержку исследований теплопроводности пород баженовской свиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты. / Под. ред. Ф.Г. Гурари. - М.: Недра, 1988. - 199 с.
2. Зубков М.Ю. Типы коллекторов и акустические свойства пород, слагающих отложения баженовской и абалакской свит (Западная Сибирь) // Горные ведомости. - 2013. - № 12. - С. 32–49.
3. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Новиков Г.Н., Фризен Л.Ф. Тепловой поток юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. - 1988. - № 8. - С. 77–85.
4. Соколова Л.С., Дучков А.Д., Юрченко Н.В. Теплопроводность битуминозных аргиллитов баженовской свиты // Геология и геофизика. - 1986. - № 10. - С. 42–46.
5. Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М., Березин В.В. Безконтактное определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла // Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1983. - №7. - С. 86–93.
6. Интерпретация материалов геофизических исследований скважин нефтеносного разреза баженовской свиты: литотипы и их физические параметры / М. А. Павлова, К. В. Сухо-

рукова, В. Н. Глинских, В. А. Казаненков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 127–131.

7. Дешин А.А., Пономарева Е.В. Распределение органического углерода в баженовской свите по данным геофизических исследований скважин (Салымский нефтегазоносный район) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. - № 2.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, Л. С. Соколова, 2015

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА: КЛАССИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Виктор Сергеевич Селезнев

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Алексей Владимирович Лисейкин

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Юрий Иванович Колесников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, тел. (383)333-31-39, e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Евгений Андреевич Хогоев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-34-19, e-mail: hogoevea@ipgg.sbras.ru

Двумя разными методами на основе данных массива сейсмических станций построены карты локальной окрестности проведенного ГРП на скважине Уренгойского месторождения. Рассчитаны количественные параметры, позволяющие сравнить классический и предлагаемый подходы.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, сеть станций, эмиссионная томография, метод амплитудных спектров.

THE LOCALIZATION OF SEISMIC INITIATIONS WHILE HYDRAULIC FRACTURING PROCESS: CLASSIC AND EXPERIMENTAL APPROACHES

Alexey A. Bryksin

Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Victor S. Seleznev

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Aleksey V. Liseikin

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Geophysicist, tel. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Yury I. Kolesnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Associate Professor, tel. (383)333-31-38, e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Evgeny A. Hoguev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., tel. (383)333-34-19, e-mail: hogoevea@ipgg.sbras.ru

Local area maps of conducted hydraulic fracturing at the Urengoy oil field well are constructed using two different methods on data from seismic instruments array. Quantitative parameters are calculated allowing to compare classic and proposed techniques.

Key words: induced hydraulic fracturing, seismic network, emission tomography, method of amplitude spectrums.

В последние несколько лет в Геофизической службе СО РАН продолжают работы по изучению спектральных характеристик среды, которые изменяются под воздействием различных источников сигнала. Известно, что любой такой источник имеет уникальную картину свойств, которая однозначно отражается в частотной области, в частности, в амплитудных спектрах сигнала. Применительно к сейсмологии был получен ряд интересных результатов [1, 2], а разработанное программное обеспечение и большой полученный объем данных из района действующей скважины Уренгойского месторождения дали возможность попытаться определить характеристики проведенного гидроразрыва пласта с помощью развиваемой методологии и сравнить полученные с ее помощью результаты с хорошо изученным методом сейсмической эмиссионной томографии. Классическое определение коэффициента подобия (сембланса) может быть записано как [3]:

$$S(\rho) = \frac{\sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K x_i(t_j - \tau_i(\rho)) \right)^2}{\sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^K x_i^2(t_j - \tau_i(\rho))}, \quad (1)$$

где $x_i(t_j)$ – значение принимаемого сигнала на i -ой станции сейсмической антенны в момент времени t_j , $\tau_i(\rho)$ – временная задержка, соответствующая времени прохода сигнала от модельной точки с координатами ρ до i -ой станции сейсмической антенны, K – число приемных каналов, T – число независимых временных отсчетов.

Существенной особенностью данного представления является то, что для так называемого "белого шума", порождаемого средой, математическое ожидание уравнения (1) равняется единице. Это позволяет оценивать отсутствие сигнала в точке независимо от количества приемных каналов.

Идеология второго подхода – метода амплитудных спектров (МАС) – аналогична подходу сейсмоэмиссионной томографии (СЭТ), однако наличие сигнала в рассматриваемой модельной точке оценивается по изменению амплитуды просуммированных записей станций сейсмической антенны на фиксированной частоте (характерной частоте источника):

$$A(\omega, \rho) = \frac{1}{T} \left| \sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K x_i(t_j - \tau_i(\rho)) \right) e^{-i\omega t_j} \right|, \quad (2)$$

где верны все обозначения для уравнения (1), ω – исследуемая частота спектра.

Ограничивая набор исследуемых частот из соображений физических свойств среды и принимая во внимание, что T , как правило, существенно меньше (в сотни раз) общей длины зарегистрированных станциями данных, мы приходим к выводу (проверенному на практике), что вычислительное время, необходимое для расчетов по формуле (2), будет в разы отличаться от требуемого для расчетов по (1) в выгодную сторону. Это объясняется возможностью линейного (матричного) представления всего набора данных, передаваемых в процедуру счета по формуле (2), что позволяет использовать параллельные вычисления.

Интересная особенность метода амплитудных спектров состоит и в том, что, учитывая однообразие подготовки данных (для него и метода сейсмической томографии), он позволяет рассчитывать значение семблansa (1) и амплитуд (2) в едином, обобщенном пакете программных средств, имея возможность сравнивать получаемые результаты.

Специалисты ГС СО РАН в апреле 2014 г. выполняли исследования по регистрации и анализу микросейсмических колебаний в районе устья скважины №378 Уренгойского нефтегазового месторождения. Была установлена временная сеть из 36-ти трехкомпонентных станций, равномерно распределенных по площади 2x2 км вокруг скважины (сейсмическая антенна), и проведена регистрация в течение 2,5 недель, с частотой дискретизации 500 Гц. В этот период на скважине производились работы по гидравлическому разрыву пласта (ГРП). Задачи исследования заключались как в локализации места разрыва пласта, так и выполнении оценки применимости методов сейсмического мониторинга для контроля над производственными процессами на месторождении.

Для получения 3D-модели происходящих сразу после основного ГРП событий была рассмотрена трехмерная сетка модельных точек, с шагом в 100 м по всем направлениям (границы в плоскости север-восток определялись областью сейсмической антенны, исследовалась глубина от 2 до 4 км от уровня дневной поверхности). Характерной частотой была принята частота в 13 Гц,

поскольку изучение записей станций показало наличие осцилляций на этой частоте. Интервал времени расчета моделей – половина часа, следующая за гидроразрывом пласта. По полученному кубу данных были построены поверхности равных значений, которые аппроксимировались эллипсоидами. По ним, в свою очередь, удалось установить основные параметры эллипсоида: азимут, зенитный угол главной оси и, как следствие, направление второй и малой осей.

Полученные результаты приведены на рис. 1. Темной линией обозначен ход ствола скважины № 378, построенный по данным, предоставленным специалистами Уренгойской газовой компании.

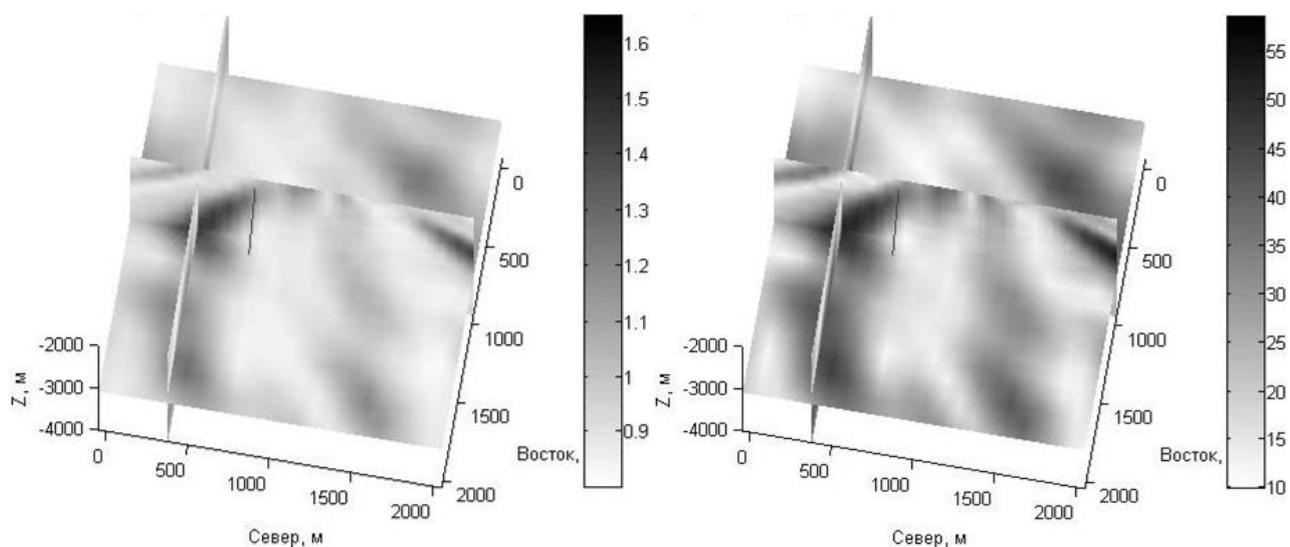


Рис. 1. Локализация эллипсоида результата ГРП относительно расположения ствола скважины № 378. Слева метод сейсмической эмиссионной томографии; справа метод амплитудных спектров, частота 13 Гц. Плоскости сечений проходят через максимумы соответствующих рассчитанных значений

На рис. 2 представлены томографические изображения на глубине 3100 м. Звездой обозначено устье скважины, пунктиром – проекция ствола скважины на дневную поверхность. Белые окружности соответствуют позициям сейсмических станций, чьи данные принимали участие в расчете.

Сопоставление параметров эллипсоидов, полученных двумя методами – МАС и СЭТ, показало, что различия в углах осей эллипсоида не превышало 3-х градусов, а в значении глубины – 50 м (при абсолютной глубине 3100 м). Таким образом, метод амплитудных спектров очень хорошо повторяет результаты проверенного классического метода сейсмической эмиссионной томографии, являясь при этом существенно производительнее с точки зрения вычислений.

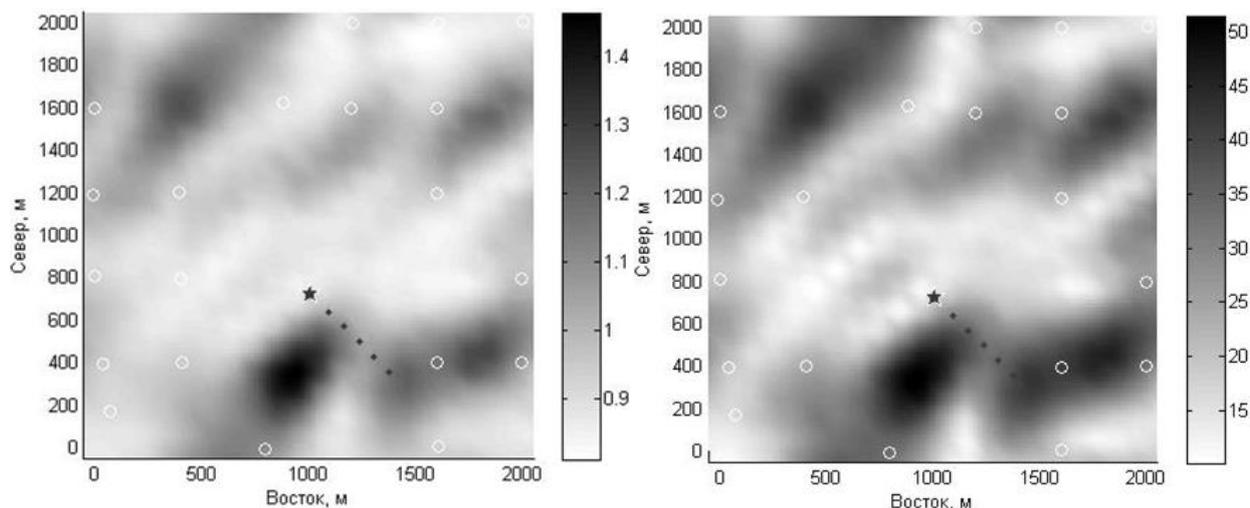


Рис. 2. Сечение вычисленного куба данных на глубине 3100 м.
Слева метод сейсмической эмиссионной томографии;
справа метод амплитудных спектров, частота 13 Гц

С точки зрения методологии это, безусловно, положительный результат, однако следует обсудить, почему же в результате обработки были получены данные, указывающие на место разрыва пласта, отстоящее от ствола скважины примерно на 250 м в плоскости и около 200 м по высоте (соответствует наиболее темному пятну в форме эллипса, одна из осей которого перпендикулярна проекции ствола скважины на рис. 2). На наш взгляд, основной причиной таких результатов является крайне неточная скоростная модель, используемая в расчетах: вряд ли геологические структуры вокруг промысловой скважины соответствуют предположению о горизонтально-слоистой среде. Таким образом, несмотря на присутствие сомнений в верности локализации трещины ГРП, можно утверждать, что результаты применения альтернативного классическому методу МАС показывают наличие выделяемой аномалии не хуже метода сейсмической эмиссионной томографии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. - 2012. - Т. 53. - С. 399–405.
2. Seleznev V.S., Liseikin A.V., Bryksin A.A., Gromyko P.V. What caused the accident at the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant (SSHPP): a seismologists point of view // Seismological Research Letters. - 2014. - V. 85, №4. P. 817–824.
3. Николаев А.В., Троицкий П.А, Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН СССР. - 1986. - Т. 286, № 3. - С. 586–591.

© А. А. Брыксин, В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин,
Ю. И. Колесников, Е. А. Хогоев, 2015

**ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДВУХ СКВАЖИН
НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)**

Зинаида Никитична Гнибиденко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)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. Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Владимир Аркадьевич Маринов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-23-06, e-mail: Marinovva@ipgg.sbras.ru

Представлены предварительные результаты комплексного палеомагнитного и палеонтологического изучения верхнемеловых отложений северо-востока Западной Сибири (Красноярский край), вскрытых скважинами Ванкорская 10 и Восточно-Лодочная 1р. На основании полученных данных разработаны магнитостратиграфические разрезы верхнемеловых отложений (долганской и дорожковской свит) для двух исследуемых скважин. Породы долганской и дорожковской свит характеризуются прямой полярностью с единичными всплесками обратной намагниченности.

Ключевые слова: магнитостратиграфия, палеомагнетизм, магнитозона, верхнемеловые отложения, северо-восток Западной Сибири.

**PALEOMAGNETIC STUDIES OF THE UPPER
CRETACEOUS SEDIMENTS 2 WELLS IN THE NORTH-EAST
OF WESTERN SIBERIA (KRASNOYARSK REGION)**

Zinaida N. Gnibidenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Leading Research Scientist, tel. (383)330-49-66, e-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Alexandra V. Levicheva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Postgraduate, tel. (383)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Vladimir A. Marinov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)330-49-66, e-mail: Marinovva@ipgg.sbras.ru

Presents preliminary results of complex paleomagnetic and paleontological investigations of the Upper Cretaceous deposits of wells Vankor 10 and Vostochno-Lodochnay 1p stripped in the

North-East of Western Siberia (Krasnoyarsk region). The Upper Cretaceous magnetostratigraphic sections of the both wells (Dolgan and Doroschkovskaya Suites) are developed. Dolgan and Doroschkovskaya suites are characterized by normal polarity with low power horizons of reversal magnetization.

Key words: magnetostratigraphy, paleomagnetism, magnetozone; Upper Cretaceous sediments, North-East of Western Siberia.

В статье представлены результаты комплексных палеомагнитных и палеонтологических исследований керна 2х скважин, пробуренных на северо-востоке Западной Сибири, в Красноярском крае в пределах Енисей-Хатангского мегапрогиба. В скважинах Ванкорская 10 и Восточно-Лодочная 1р изучены верхнемеловые отложения. Целью этого исследования является получение палеомагнитной характеристики верхнемеловых отложений левобережья нижнего течения р. Енисей, сопоставление палеомагнитной характеристики исследуемых отложений с палеонтологическими данными и разработка магнитостратиграфического разреза исследуемых отложений.

Отбор образцов и обработка полученных результатов в целом не отличались от общепринятой и стандартной методики палеомагнитных исследований [1, 3, 4]. Из керна, ориентированного «верх-низ» и представляющего собой один стратиграфический уровень, вручную или с помощью пробоотборника конструкции А. А. Бишаева отбирались образцы-кубики с ребром грани 2 см. Образцы-кубики вырезались из центральной части керна так, чтобы ось Z была направлена по оси керна вниз; направления горизонтальных осей X и Y произвольны. Каждый стратиграфический уровень представлен двумя-тремя образцами-кубиками. Для обеспечения комплексных исследований отбор ориентированных образцов для палеомагнитного изучения производился в месте отбора проб для палеонтологических исследований.

В процессе обработки собранных коллекций исследуемых скважин определялись магнитные характеристики пород, проводились специальные лабораторные магнитные исследования, направленные на выделение характеристической (первичной) компоненты естественной остаточной намагниченности, образовавшейся в процессе формирования породы. Сохранность естественной остаточной намагниченности и ее магнитоустойчивость устанавливались на первом этапе с применением временной магнитной чистки. Временная магнитная чистка использовалась для снятия вязкой составляющей естественной остаточной намагниченности. Для этого после отбора образцы выдерживались в лабораторных условиях в течение полутора месяцев в положении «in situ» и измерялись. Затем, после выдержки их в течение такого же временного периода в положении, противоположном первому, повернутом на 180° относительно оси Y, образцы измерялись повторно. В результате этого процесса происходит компенсация вязкой составляющей и паразитной лабораторной намагниченности, образовавшейся при хранении образцов. Процесс снятия вязкой компоненты будет продолжаться и в дальнейшем при использовании ступенчатой темпера-

турной чистки и чистки переменным магнитным полем для контрольной коллекции образцов.

При лабораторных палеомагнитных исследованиях использовались отечественные и зарубежные приборы и установки: каппаметр KLY-2 (Chezh Republic – измерение магнитной восприимчивости), спиннер-магнитометры JR-4 и JR-6A (Chezh Republic – измерение направления и величины естественной остаточной намагниченности).

Всего из 2х исследуемых скважин отобрано 59 кернов (стратиграфических уровней), из которых было изготовлено 143 образца-кубика с размером грани 20 мм. Плотность отбора кернов составляла в среднем 1 м.

Геологический разрез и биостратиграфия скв. Ванкорская 10 и Восточно-Лодочная 1р. Для палеомагнитного изучения скважина Ванкорская 10 была опробована в интервале глубин 1030.48–991.66 м (мощность 38.82 м), что отвечает верхам долганской и низам дорожковской свит верхнего мела. Опробованная часть долганской свиты представлена алевролитами темно-серыми и серыми с подчиненными прослоями глин, а также чередованием прослоев песчаников светло-серых мелкозернистых и алевролитов серых песчанистых. Дорожковская свита сложена преимущественно алевролитами темно-серыми и серыми глинистыми с подчиненными прослоями темно-серых алевритистых глин. В верхах долганской и низах дорожковской свит (интервалы глубин 1018.5–991.3 м) обнаружены фораминиферы, позволяющие датировать эти отложения нижнетуронским подъярусом верхнего мела (K2t1) (зона *Inoceramus labiatus*) [2]. Из двух свит этой скважины было отобрано 69 образцов-кубиков, ориентированных «верх-низ» и представляющих 30 стратиграфических временных уровней. Скважина Восточно-Лодочная 1р опробована в интервале глубин 995–960 м (мощность 35 м), что соответствует дорожковской свите верхнего мела. Дорожковская свита сложена темно-серыми алевритистыми глинами и серыми и зеленовато-серыми алевролитами с подчиненными прослоями светло-серых песчаников. По всему разрезу дорожковской свиты обнаружены фораминиферы и иноцерамиды, характерные для среднетуронского и верхнетуронского подъярусов верхнего мела (K2t2-3)(зона *Inoceramus lamarcki*) [2]. Из этой свиты отобрано 74 образца-кубика, ориентированных «верх-низ» и представляющих 29 стратиграфических временных уровней.

Магнитные свойства пород. Породы исследуемых свит по магнитным свойствам весьма неоднородны. Высокие значения магнитной восприимчивости (χ) и естественной остаточной намагниченности (ЕОН) имеют глины, алевролиты и песчаники долганской свиты. Магнитная восприимчивость пород долганской свиты изменяется от 20.9 до 32.2×10^{-5} ед. СИ, при средних значениях 27.2×10^{-5} ед. СИ, а естественная остаточная намагниченность варьирует в пределах 1.1–2.7 мА/м, при средних значениях 1.7 мА/м χ пород долганской свиты в 2 раза выше величины этого параметра вышележащей дорожковской свиты и изменяется от 36.5 до 75.8×10^{-5} ед. СИ, при средних значениях 61.9×10^{-5} ед. СИ. Естественная остаточная намагниченность пород долганской свиты в среднем в 4 раза выше, чем ЕОН дорожковской свиты и равна 8.4 мА/м. Повышенные

значения скалярных магнитных параметров объясняются тем, что породы долганской свиты, скорее всего, содержат большее количество ферромагнитных минералов-носителей намагниченности, чем породы дорожковской свиты; либо породы долганской свиты имеют в составе магнитной фракции более магнитные минералы, нежели породы дорожковской свиты.

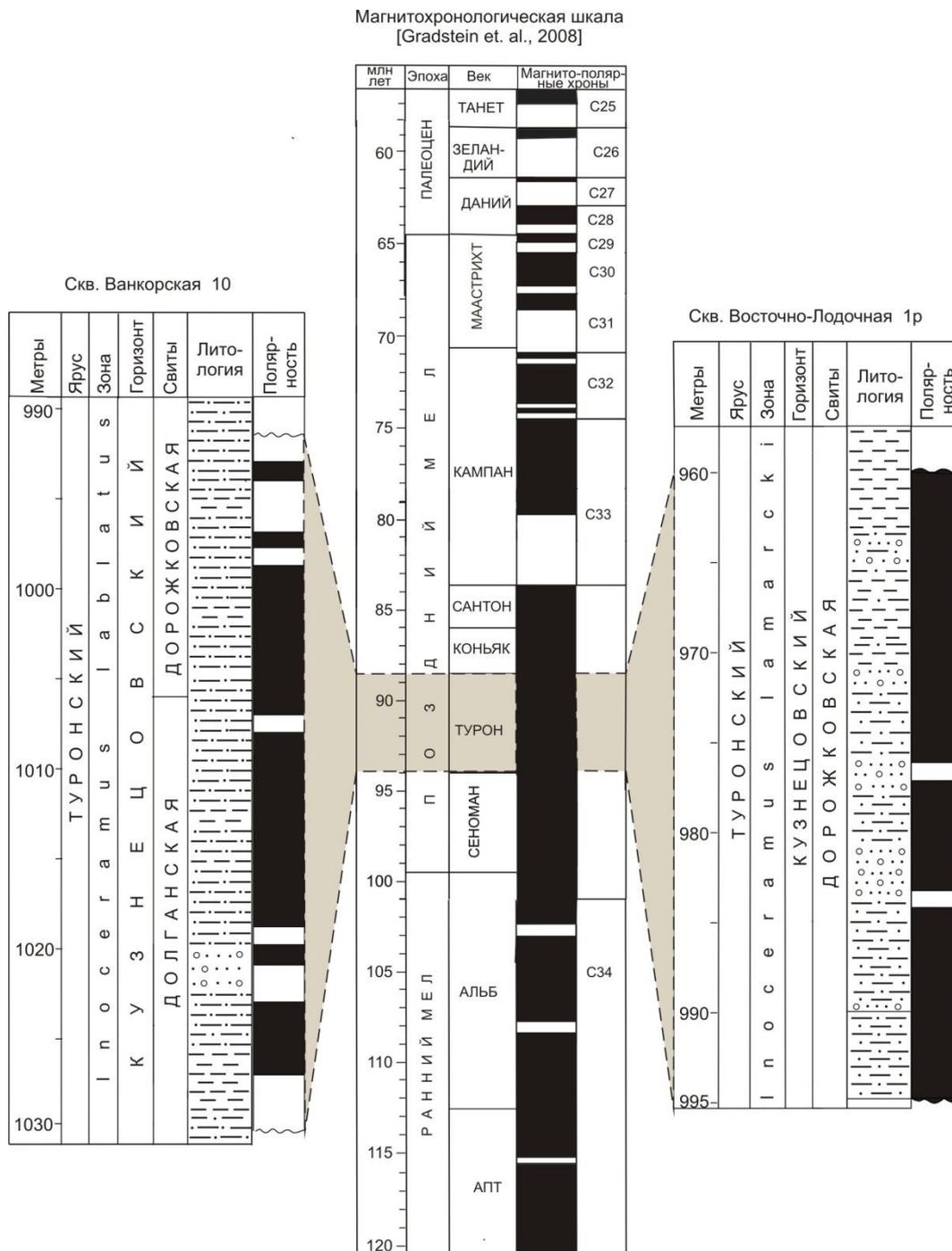


Рис. 1. Сопоставление магнитостратиграфических разрезов скважин Ванкорская 10 и Восточно-Лодочная 1р с магнитохронологической шкалой Градстейна [5]

Фактор Кенигсбергера (Q_n) – отношение естественной остаточной намагниченности к индуктивной в земном магнитном поле ($Q_n = \text{ЕОН} / \chi H$) – меньше 1 и изменяется от 0.12 до 0.27. Магнитная восприимчивость для пород скв. 1р изменяется от 43.4 до 210.6×10^{-5} ед. СИ, при средних значениях 108.7×10^{-5} ед. СИ, а естественная остаточная намагниченность варьирует в пределах 4.2–45.8 мА/м, при средних значениях 15.7 мА/м. В целом χ и ЕОН пород дорожковской свиты в скважине Восточно-Лодочная 1р выше, чем в скважине Ванкорская 10 в 4 раза (χ) и в 7 раз (ЕОН). Фактор Кенигсбергера меньше 1 и равен 0.29.

Магнитобиостратиграфический разрез. Для выделения характеристической компоненты (ChRM) естественной остаточной намагниченности из общей ЕОН была использована временная магнитная чистка, которая показала, что естественная остаточная намагниченность является весьма стабильной. По характеристической компоненте намагниченности были построены палеомагнитные разрезы двух исследуемых скважин (рис. 1). Палеомагнитные разрезы долганской и дорожковской свит скв. 10 и дорожковской свиты скв. Восточно-Лодочная 1р характеризуются прямой полярностью с единичными всплесками обратной намагниченности. Сопоставление полярности выделенных палеомагнитных направлений и данных макро- и микрофаунистического изучения с магнитохронологической шкалой Ф.М. Градстейна [5] показаны на рис. 1. Прямая полярность геомагнитного поля исследуемых скважин и палеонтологические данные позволяют заключить, что время формирования отложений долганской (верхняя часть) и дорожковской (нижняя часть) свит в скважинах Ванкорская 10 и Восточно-Лодочная 1р укладывается во временной диапазон позднего мела – туронский век, отвечающий части интервала прямой намагниченности магнитополярного хрона С34 общей магнитохронологической шкалы Ф.М. Градстейна (~94–88.5 млн. лет).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. - Саратов: Изд-во СГУ, 1997. - 179 с.
2. Отчет по договору № ТННЦ-6484/13 (025/13) «Выполнение работ по стратиграфическому, палеобиогеографическому, седиментологическому и литофациальному анализу верхнемеловых отложений Большехетского проекта и прилегающих территорий». - Новосибирск, 2014. - 112 с.
3. Палеомагнитология / А.Н. Храмов, Г.И. Гончаров, Р.А. Комиссарова и др. - Л.: Недра, 1982. - 312 с.
4. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм. - Л.: Недра, 1967. - 252 с.
5. Gradstein F.M., Ogg J.G., Kranendonk M. On the Geologic Time Scale 2008 // Newsletters on Stratigraphy. - 2008. - V. 4, No 1. - P. 5–13.

© З. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева, В. А. Маринов, 2015

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Алексей Александрович Горбатенко

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

Карина Владимировна Сухорукова

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

Интерпретацию данных электромагнитного каротажа в скважинах с горизонтальным завершением можно эффективнее выполнять на основе трехмерной инверсии с учетом зенитного угла скважины. Форма каротажных кривых в таких скважинах сильно отличается от формы кривых в вертикальных. Для расстановки границ пластов следует опираться на признаки, отличные от тех, что используются в вертикальных скважинах. Ускорения расчетов можно достичь прореживанием данных, подаваемых на вход процедуры инверсии. При этом плотность точек измерения должна быть больше в интервалах пересечения скважиной границ пластов и меньше в интервалах однородных пластов.

Ключевые слова: геофизические исследования скважин, электромагнитный каротаж, ВЭМКЗ, горизонтальные скважины, уменьшение точек.

PREPROCESSING OF ELECTROMAGNETIC LOGGING DATA IN HORIZONTAL WELLS FOR NUMERICAL INTERPRETATION

Alexey A. Gorbatenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Lead Programmer of the Laboratory of Well Logging Geophysics, tel. (383)330-79-47, e-mail: gorbatenkoa@ipgg.sbras.ru

Karina V. Suhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Senior Researcher of the Laboratory of Well Logging Geophysics, tel. (383)330-49-52, e-mail: suhorukovakv@ipgg.sbras.ru

3D inversion algorithms should be used for electromagnetic well logging data interpretation in horizontal wells. The mention should be made that electromagnetic data from horizontal wells are different from data from vertical ones. It means in particular that in horizontal wells there are signs indicating boundary position that different from ones in vertical wells. To speed up calculations one should reduce the number of logging points in inversion input data.

Key words: well logging, electromagnetic well logging, VEMKZ, horizontal wells, points reduction.

Доля наклонных и горизонтальных скважин при разработке нефтегазовых месторождений неуклонно растет. В связи с этим все острее становится необ-

ходимость более точных методик интерпретации данных геофизических исследований скважин. Это касается в том числе и методов электромагнитного каротажа. В силу того, что в горизонтальных скважинах на такие измерения влияют эффекты, отсутствующие в вертикальных стволах (например, тонкая слоистость, заряды на границах пластов), использование методик интерпретации, разработанных для вертикальных скважин, зачастую приводит к ошибочным оценкам параметров пород, окружающих скважину [1].

Для более точного описания строения пройденного разреза используют процедуру инверсии данных в слоистой среде с учетом наклона прибора относительно границ пластов [2]. Очевидно, что результат и время выполнения инверсии зависит от подаваемых на вход алгоритма результатов измерений в скважине и от стартовой модели. Так, например, чем ближе стартовая модель к истинному строению среды, тем меньше итераций требуется для поиска решения.

Построение стартовой модели начинается с расстановки границ. Поскольку форма кривых электромагнитного каротажа в горизонтальных скважинах отличается от формы кривых в вертикальных [1], то расстановка границ пластов выполняется другим способом. Как известно, в вертикальных скважинах границе контрастных по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) пластов соответствуют участки диаграмм с наибольшим значением производной [3]. Но в скважинах с большим зенитным углом вихревые токи, создаваемые источником, пересекают границы пластов, в результате чего на них образуются электрические заряды, что сказывается на показаниях прибора. На рис. 1б изображена диаграмма разности фаз, рассчитанная для длинного зонда высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) в двухслойной среде при зенитном угле скважины 85° . УЭС верхнего полупространства составляет $30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, нижнего – $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Горизонтально расположенная граница находится на отметке 0 м. В этом месте на диаграмме наблюдается минимум значений разности фаз, который связан с образованием на границе пластов электрического заряда. При этом в интервале глубин от -4 до 0 м значения разности фаз мало изменяются, а после пересечения границы начинают резко возрастать. Численное моделирование данных ВЭМКЗ в различных ситуациях показало, что на границе контрастных по УЭС пластов при зенитном угле более 60° всегда наблюдается локальный минимум разности фаз [1]. Из-за сложных условий измерений в горизонтальных скважинах данные ВЭМКЗ зачастую бывают зашумлены [4], и локальные минимумы разности фаз оказываются скрыты этими шумами. Для подавления шумов применяют различные методы фильтрации или сглаживания. На диаграмме сглаженного сигнала положению границы пластов будет соответствовать перегиб со стороны меньшей разности фаз или большего кажущегося УЭС.

При больших зенитных углах скважина пересекает пласты под очень острым углом, каждая граница долгое время находится в области чувствительности прибора. Таким образом, в небольшом интервале по вертикали находится большое число точек измерения. Например, на участке диаграммы, изображен-

ном на рис. 1б, в интервале глубин от минус 4 до плюс 4 м находится 555 точек измерения. Это означает, что в процессе инверсии этих данных на каждой итерации прямая задача решается 555 раз. Очевидно, если даже шаг измерения будет меньше, то использование инверсии все равно позволит получить решение с требуемой точностью. Поэтому для увеличения скорости вычислений можно уменьшить число точек измерения, подаваемых на вход процедуры инверсии, без снижения качества подбора. К тому же, так как вдоль ствола скважины чувствительность сигнала к разным параметрам среды неодинакова, целесообразно при прореживании точек оставлять их большую концентрацию на участках, где известна чувствительность и к УЭС пластов, и к положению границы между ними. На рис. 1в изображены функции чувствительности к параметрам двухслойной модели в зависимости от глубины точки измерения. Значения этих функций одновременно отличны от нуля в интервале от минус 1 до плюс 2 м. Следовательно, при прореживании оптимально оставлять большую плотность точек в таких интервалах. На диаграмме разности фаз (рис. 1б) в этом интервале наблюдается наиболее резкое изменение значений. Тогда при прореживании большую плотность точек измерения необходимо оставлять в интервалах, где наблюдается изменение значений разности фаз (места пересечения границ пластов), а в интервалах, где показания электромагнитных зондов практически не изменяются, можно оставлять меньшую плотность точек, так как там наблюдается чувствительность лишь к УЭС одного пласта.

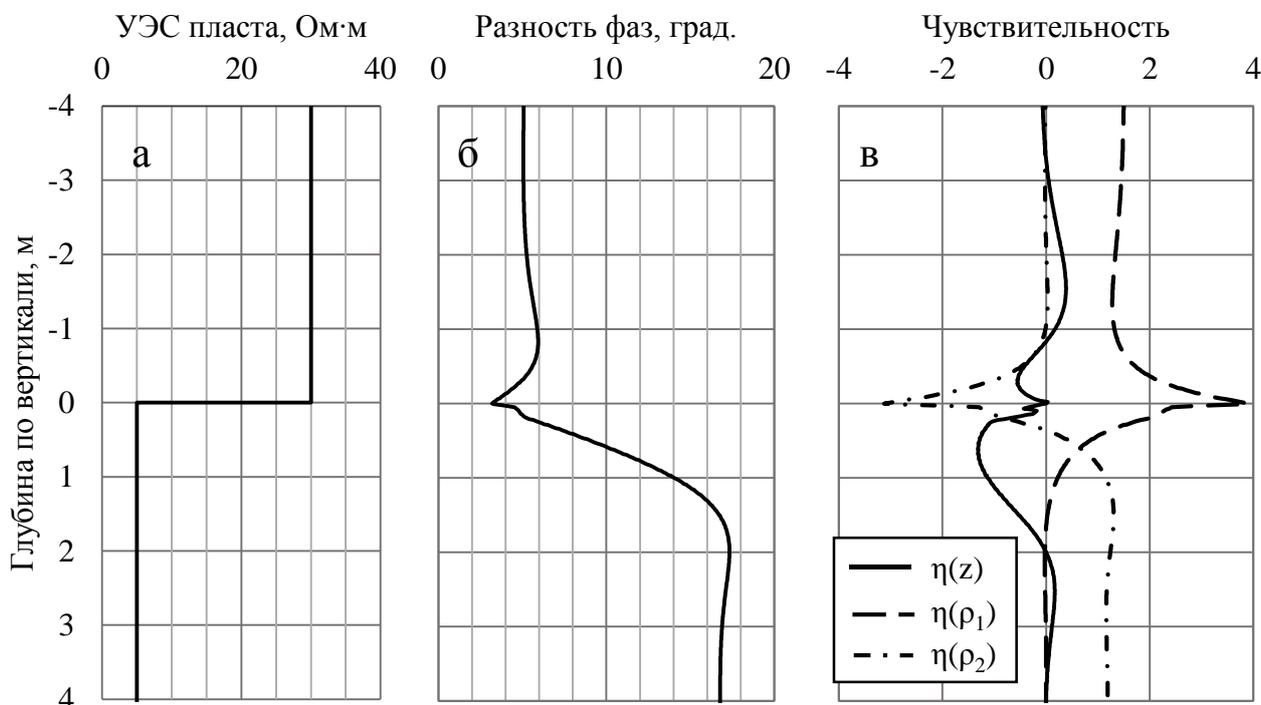


Рис. 1. Разность фаз зонда ВЭМКЗ длиной 2,0 м, рассчитанная для двухслойной среды при зенитном угле 85° . Параметры модели (а). Разность фаз зонда длиной 2,0 м (б). Чувствительности к параметрам модели (в)

Поиск интервалов пересечения границы пластов можно выполнять при помощи алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера [5]. Получаемая густота точек регулируется с помощью предельного расстояния от произвольной точки на кривой до прямой, проведенной между двумя точками этой кривой. Результат его работы, по данным длинного зонда ВЭМКЗ, записанным с шагом по скважине 0.2 м, показан на рис. 2. Алгоритм возвращает кривую со значительно меньшим числом точек, чем в исходной. Величина производной по парам соседних точек вблизи границ пластов выше, чем на интервалах мощных пластов. По величине этой производной можно регулировать шаг между точками и таким образом увеличивать вес интервалов пересечения границ пластов и уменьшать вес участков с однородными пластами.

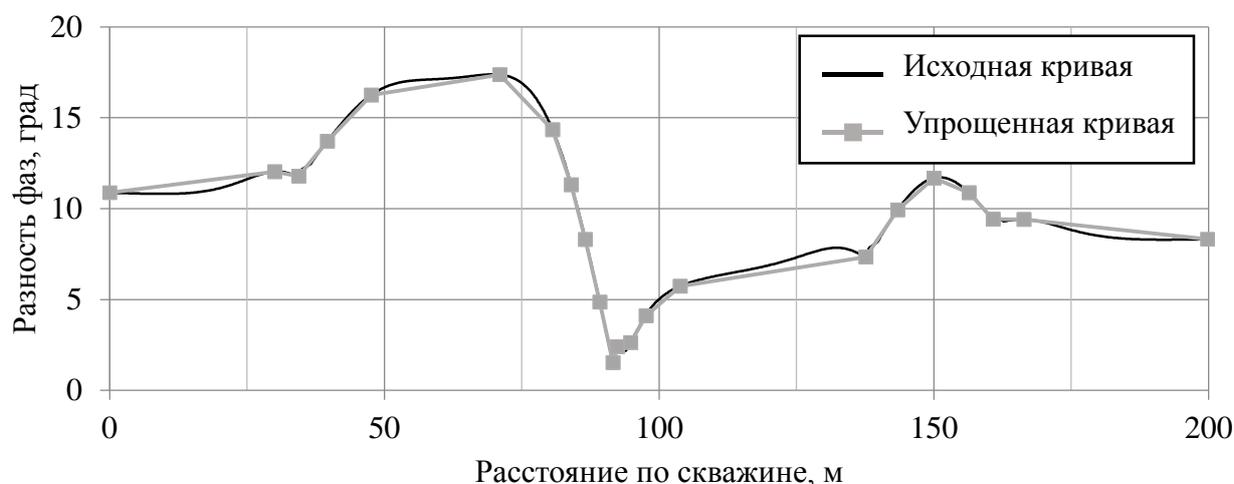


Рис. 2. Данные зонда длиной 2,0 м в горизонтально-слоистой среде при зенитном угле скважины 85° и построенная по ним при помощи алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера упрощенная кривая

Таким образом, интерпретация данных исследований методом электромагнитного каротажа горизонтальных участков скважин требует применения новых алгоритмов, которые отличаются от тех, что используются для вертикальных стволов. С их помощью можно повысить скорость вычислений и точность результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбатенко А.А., Сухорукова К.В. Особенности сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах // Каротажник. - 2014. - Вып. 245. - С. 42–55.
2. Cheryauka, A.B. High-frequency electromagnetic soundings for boreholes with horizontal completion / A.B. Cheryauka, M.I. Epov, M.N. Nikitenko // 58th EAGE Conf. and Techn. Exhib., Amsterdam, 3-7 June, 1996: Extend. Abstr. Book. Vol. 1. - Zeist, 1996. - P. 170.
3. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю. Выделение пластов в терригенном разрезе по данным ВИКИЗ // Каротажник. - 1999. - Вып. 57. - С. 58–69.

4. Горбатенко А.А., Вологдин Ф.В., Сухорукова К.В. Моделирование влияния неровностей стенки скважины и эксцентриситета каротажного зонда на показания высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором // Каротажник. - 2013. - Вып. 224. - С. 54–64.

5. Urs Ramer. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves // Computer Graphics and Image Processing. - 1972. - Vol. 1., Issue 3. - P. 244–256.

© А. А. Горбатенко, К. В. Сухорукова, 2015

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ДЛЯ РЕШЕНИЯ РУДОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ

Екатерина Сергеевна Горностаева

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

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Евгений Владимирович Павлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-52-36, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Максим Васильевич Кириллов

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, тел. (383) 330-73-39, e-mail: kirillovm@igm.nsc.ru

Представлены и обсуждаются результаты геофизических исследований методом электротомографии в пределах разломной зоны на Шадрихинской площади. Построена трехмерная геоэлектрическая модель участка исследований. Установлено, что разлом имеет субширотное простирание и сечёт генеральные структуры северо-восточного направления. Показано, что структурно-геологическое строение участка исследований схоже со строением Легостаевского золоторудного поля. На основе метода аналогии сделано предположение о рудоперспективности выделенной разломной зоны.

Ключевые слова: электротомография, трехмерная модель, геоэлектрический разрез, разлом, золотое оруденение.

THE APPRECIATION CAPABILITY OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN THE STUDY FAULT TO SEARCH FOR ORE

Ekaterina S. Gornostaeva

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

Vladimir V. Olenchenko

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

Evgeny V. Pavlov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)330-52-36, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Maksim V. Kirillov

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Junior Research Scientist, tel. (383)330-73-39, e-mail: kirillovm@igm.nsc.ru

Presents and discusses the results of geophysical surveys electrical resistivity tomography method within the of the fault zone. The three-dimensional geoelectric model was plot. It has been established that the fault has sublatitudinal strike and traverses general structure of the north-east extension. It is shown that the structural geological feature of the area of research is similar to the structure of Legostaevskiy golden field. By the method analogy was assumed ore prospect allocated fault zone.

Key words: electrical resistivity tomography, three-dimensional model, geoelectric section, fault, gold mineralization.

Колывань – Томская складчатая зона (КТСЗ) и Северо-Западный Салаир рассматриваются многими исследователями как весьма перспективный регион для обнаружения золотого оруденения [1]. В Новосибирской области известны в основном россыпные месторождения и одно рудное – Легостаевское, располагающееся в сочленении вышеупомянутых геологических структур.

Основная добыча золота Новосибирской области ведётся в Егорьевском золотоносном районе, являющимся одним из старейших золотопромысловых регионов Сибири. Сырьевая база россыпного золота катастрофически истощена, а добыча его сокращается. Тем не менее для выявления новых объектов золоторудной минерализации имеется большой потенциал [2]. Проблемы поисков рудных месторождений геологическими методами в условиях Западного Салаира и КТСЗ осложняются слабой обнаженностью изучаемой территории из-за мощного чехла четвертичных (неоген-четвертичных) отложений. И хотя в бассейнах рек Ик, Бердь и Обь широко распространена россыпная золотоносность, большинство коренных источников золота остаются не найденными.

Рудное золото Западного Салаира и КТСЗ связано, как правило, с жильным, штокверковым золото-кварцевым и золото-сульфидным, золотосульфидно-кварцевым прожилково-вкрапленным оруденением [3]. Такие типы оруденения приурочены к зонам тектонических нарушений. Таким образом, задачи геофизических исследований сводятся к выделению (поискам) зон тектонических нарушений под покровом четвертичных отложений.

В рудной геофизике для картирования разломов в последнее время в среде электроразведочных методов интенсивно развивается и применяется технология 2D- и 3D-электротомографии (ЭТ) методом сопротивлений [4, 5, 6]. Двумерный и трёхмерный подход к инверсии данных позволяет эффективно изучать геологические структуры сложного строения.

Для оценки геологической информативности ЭТ при изучении разломов в условиях КТСЗ были проведены исследования на полигоне ИНГГ СО РАН «Ключи». Изучаемый участок расположен на правом берегу р. Обь в 8 км к востоку от Новосибирского Академгородка.

В геологическом строении района исследований участвуют пачинская (D_3pc) и юргинская (D_3jug) свиты, представленные светло-серыми сланцами,

алевролитами, песчаниками и известняками. На поверхности палеозойского основания развиты образования древней коры выветривания, сложенной белыми пестроцветными глинами мощностью 10–20 м. Третичные отложения представлены краснодубровской свитой (Q_2krd) – лессовидными суглинками и тонкослоистыми аллювиально-озерными отложениями [7].

В 2013 году на исследуемом участке были проведены рекогносцировочные работы методом электротомографии. Профили проходили в юго-восточном направлении вкрест генерального простирания геологических структур. По результатам работ построен геоэлектрический разрез, фрагмент которого приведён на рис. 1. На разрезе субвертикальными зонами аномально низких сопротивлений (5–10 Ом·м) выделяются две разломные зоны малой мощности (до 15 м).

В 2014 году в рамках учебной геофизической практики на полигоне «Ключи» в пределах выявленной аномалии «Разлом 2» были выполнены площадные детальные работы с целью построения трёхмерной геоэлектрической модели (рис. 2).

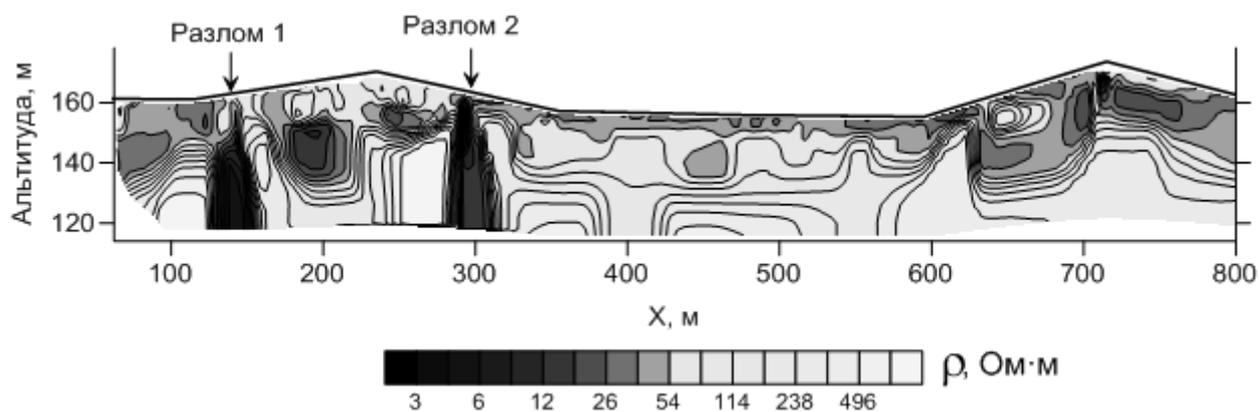


Рис. 1. Фрагмент геоэлектрического разреза через площадь исследований в районе стационара «Ключи»

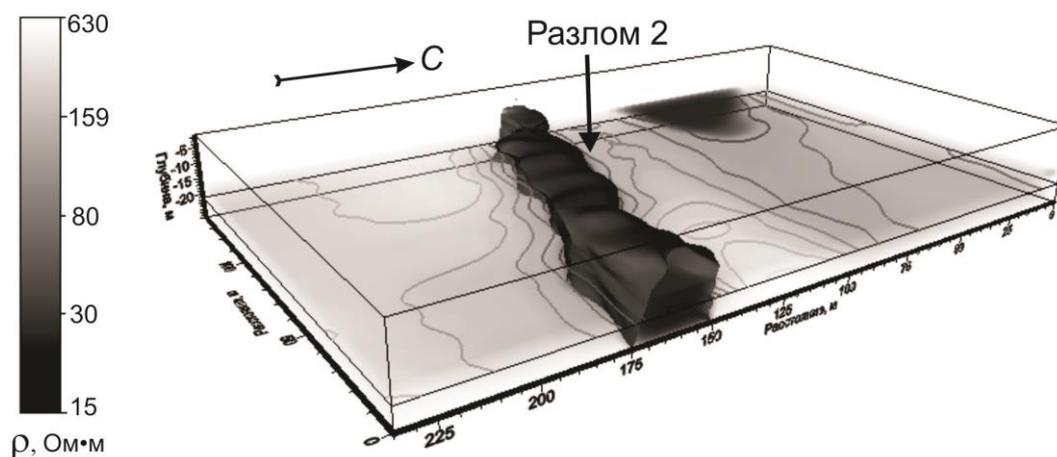


Рис. 2. Срез трёхмерной геоэлектрической модели по глубине 15 м и изоповерхность 50 Ом·м в пределах субширотной разломной зоны

Установленная мощность перекрывающих отложений над разломной зоной составляет порядка 10 м. Субширотный разлом выделяется линейной аномалией пониженного УЭС (менее 50 Ом·м) на фоне высокоомных (100–600 Ом·м) вмещающих пород. Горизонтальная мощность разломной зоны около 20 метров.

Основной геоморфологической структурой в пределах участка работ является Шадрихинский разлом северо-восточного простирания, хорошо проявляющийся на цифровой модели рельефа (ЦМР) (рис. 3). В контурах участка исследований его сечёт структура субширотного простирания, которая и выделяется на геоэлектрическом разрезе и в трёхмерной модели.

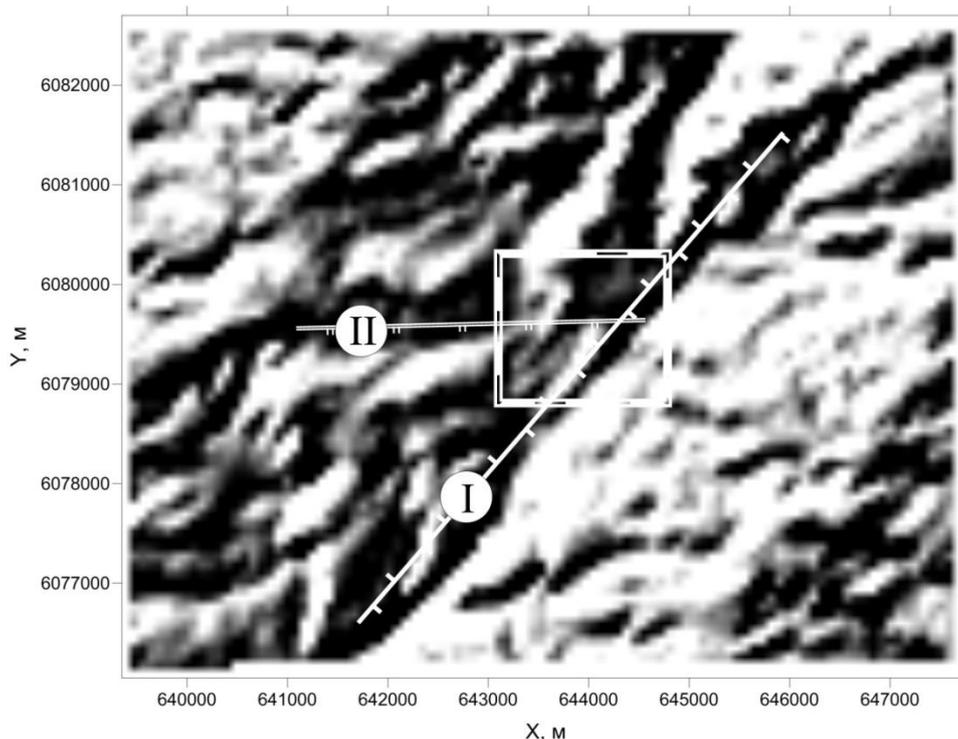


Рис. 3. Цифровая модель рельефа:
I – Шадрихинский разлом, II – субширотный разлом (Разлом 2).
Прямоугольником показан участок исследований

Характерной особенностью выделенных разломов широтного простирания является низкое УЭС субстрата. Этим они отличаются от зон разломов генерального простирания.

Нами предполагается, что субширотные разломы являются рудоконтролирующими, особенно в узлах пересечения с разломами генерального (северо-восточного) простирания. Подобная ситуация отмечается на Легостаевском месторождении.

Территория Легостаевского месторождения также ограничивается разломами северо-западного (салаирского) и северо-восточного (колывань-томского) простирания. Разрывные нарушения относятся к надвиговому типу с падением плоскостей на юг и юго-восток и являются рудоконтролирующими [8].

Таким образом, в результате исследований установлено следующее.

Выделенные маломощные зоны низкого сопротивления имеют субширотное простирание и секут структуры северо-восточного направления. Узлы пересечений таких структур могут быть перспективными на золотое оруденение. Геологическими признаками оруденения в пределах участка исследований являются обломки кварцевой жилы.

Схожее строение выделенных разломных зон отмечается и на Легостаевском золоторудном месторождении, что, используя метод аналогии, позволяет считать перспективным на золотое оруденение участок «Ключи». Результаты геофизических исследований необходимо заверить геохимическим опробованием и последующим бурением разведочной скважины на глубину до 30 м.

Метод электротомографии показал хорошую геологическую информативность при изучении разломной зоны и может быть применен для поисков потенциально рудоносных структур в закрытых условиях, связанных с развитием мощного чехла рыхлых отложений, характерных для Северо-Западного Салаира и КТСЗ.

Выделение погребенных тектонических нарушений с помощью геофизических методов исследования и дальнейший структурно-тектонический анализ являются необходимыми и основополагающими при постановке поисковых работ на золотое оруденение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В. и др. Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. - 227 с.
2. Росляков Н.А., Нестеренко Г.В., Калинин Ю.А., Васильев И.П. и др. Золотоносность кор выветривания Салаира. - Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1995. - 170 с.
3. Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В. и др. Минерагения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. - 243 с.
4. Loke M.H.. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual, IRIS Instruments. - 2009.
5. Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр. - 2005. - №12. - С.52–54.
6. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. - 2012. - № 6. - С. 54–63.
7. Васютинская Т.Ф., Михайловский Д.В. Геологическая карта 1:200 000. Объяснительная записка. - ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1969. - С. 55–57.
8. Орехов А.Н., Беляев В.И., Орехова С.Т. Некоторые результаты магниторазведочных исследований на золоторудном месторождении (Новосибирская область) // Международный семинар им. Д.Г. Успенского: материалы 33-й сессии. - Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. - 465 с.

© Е. С. Горностаева, В. В. Оленченко, Е. В. Павлов, М. В. Кириллов, 2015

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОТКЛИКА ПОЛЕВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

Борис Григорьевич Титов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник лаборатории 408, тел. (383)333-26-04, e-mail: TitovBG@ipgg.sbras.ru

Владимир Матвеевич Грузнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, тел. (383)333-27-11, e-mail: GruznovWM@ipgg.sbras.ru

Приведен анализ необходимых параметров портативного гамма-спектрометра для полевой радиометрической съемки. Реализована стабилизация отклика гамма-спектрометра на основе BGO кристалла при изменении температуры окружающей среды в интервале от -30 до +40 °С. Достигнутая стабильность работы прибора обеспечивает режим съемки в движении в полевых условиях, что экспериментально подтверждено картированием съемки на площадях в Советском районе г. Новосибирска и Алтайском крае.

Ключевые слова: гамма-спектрометр, естественная радиоактивность, радиометрическая съемка.

STABILIZATION OF THE FIELD GAMMA SPECTROMETER RESPONSE

Boris G. Titov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Senior Research Scientist, lab. 408, tel. (383)333-26-04, e-mail: TitovBG@ipgg.sbras.ru

Vladimir M. Gruznov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Deputy Director for Science, tel. (383)333-27-11, e-mail: GruznovWM@ipgg.sbras.ru

Parameters of a portable gamma spectrometer required for conducting field radiometric survey are analyzed. Response of the BGO crystal-based gamma spectrometer with the ambient temperature changed from - 30 to +40 °C is stabilized. The device stability achieved allows one to conduct field survey on the move, which is verified by mapping the results of the survey conducted within Novosibirsk, Soviet district, and the Altai Territory.

Key words: gamma spectrometer, natural radioactivity, radiometric survey.

Анализ результатов радиометрических съемок показывает высокую прогностно-оценочную эффективность применения этих методов при поиске углеводородных месторождений. Данные о содержании радиоактивных элементов в приповерхностном слое могут служить критерием для прогноза нефтегазоносности геологических структур. Набор и качество радиационных признаков, указывающих на месторождение, варьируются от месторождения к месторожде-

нию и до конца не изучены. Постоянным параметром является повышенная аномальность радиационных полей и совпадение контуров радиационных аномалий на поверхности с контурами нефтеносных коллекторов [1].

Изучение связи распределения радиоактивных элементов в приповерхностном слое с нефтегазовыми месторождениями возможно при использовании высокоточной аппаратуры (гамма-спектрометров, термолюминесцентных дозиметров и др.).

С помощью высокочувствительного гамма-спектрометра выявлена отрицательная аномалия урана, тория и калия над месторождениями Хелец и Кохов в Израиле. То же самое выявлено и для ряда месторождений в Сибири.

Выпускаемые в России и за рубежом портативные гамма-спектрометры, например, Гамма-1С/PS, РГП-301, GR-130 (BGO), и GR-130G (NaI) ориентированы в основном на использование в атомной энергетике для определения высокоактивных искусственных изотопов и не оптимизированы для проведения геофизических работ, как технически, так и функционально.

В настоящее время есть все предпосылки к созданию современных полевых портативных гамма-спектрометров для геофизического применения с лучшими характеристиками, чем у существующих отечественных и зарубежных аналогов.

Полевой гамма-спектрометр должен представлять собой функционально законченное изделие, оптимизированное для проведения радиационной съемки при выполнении геофизических работ по поиску залежей углеводородов.

В современных условиях при радиометрической съемке необходимо обеспечивать измерение значений интегральной и удельных активностей радионуклидов U, Th, K в условиях естественного залегания, топографическую и временную привязку результатов измерений по системе GPS/ГЛОНАСС с одновременным отображением на экране оператора энергетических спектров, распределения общей и удельной радиоактивности U, Th, K на маршруте и их соотношений.

Современный гамма-спектрометр для геофизических работ должен обеспечивать пешеходную и автомобильную съемку в движении и на точках стояния, иметь постоянство метрологических характеристик в расширенном диапазоне температур (от -40 до +50 °С).

Особое внимание должно уделяться минимизации его энергопотребления и массогабаритных характеристик.

Условия эксплуатации накладывают дополнительные требования к чувствительности и точности измерения кларковых содержаний при пешеходной и автомобильной съемках и отображению результата съемки на экране оператора.

В статье приведены результаты исследований по созданию и опробованию в полевых условиях программно-алгоритмического макета современного гамма-спектрометра с компенсацией температурной зависимости отклика сцинтиллятора. Разработано и отлажено программное обеспечение макета, реализующее алгоритм компенсации температурной зависимости отклика и управления работой модуля сцинтилляторного блока и модуля определения координат по проводной и

беспроводной линиям передачи данных с помощью внешнего управляющего компьютера.

Помимо стандартных технических решений, имеющихся в типовых спектрометрах, в программно-алгоритмический макет спектрометра введены новые технические решения, обеспечивающие адаптивную компенсацию температурной зависимости сцинтиллятора, отображение результата съемки в виде карты с нанесенными значениями интенсивности гамма-поля и его компонент (содержания урана, тория и калия) и интерпретационных параметров поиска залежей углеводородов. Новые принципы, заложенные в техническое решение, такие как тип и размер сцинтилляционного кристалла, модульный принцип построения, наличие проводного и беспроводного каналов связи, совместное отображение топографической карты и карты измеренных параметров гамма-поля, позволили улучшить эксплуатационные параметры макета спектрометра и качество выдаваемой информации непосредственно в полевых условиях.

Установлено, что сцинтиллятор ВГО имеет максимальный световой выход, равный 1 отн. ед. при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, это соответствует максимальному световыходу сцинтиллятора NaI(Tl) при температуре $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В интервале температур от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ световой выход $J(T)$ ВГО изменяется от 0,83 отн. ед. до 0,33 отн. ед. и хорошо описывается линейной функцией типа $J(T) = kJ_0T + b$, где J_0 - световой выход при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, T - текущая температура в градусах Цельсия, $k = -0,0129$, $b = 1,2605$.

Такое изменение световыхода приводит к сдвигу положения регистрируемых фотопиков в спектре и вносит ошибку в измерения, проведенные при разных температурах. Наибольшие искажения в спектр вносятся при резком изменении температуры сцинтиллятора во время длительных измерений, при этом ухудшается энергетическое разрешение детектора, появляются ложные пики.

Стабилизация работы гамма-спектрометра в этом случае должна происходить по трем каналам путем:

- облучения области фотокатода и диодной системы ФЭУ нормированным импульсом света от светодиода, сравнения амплитуды электрического импульса на выходе ФЭУ с эталонным, заранее установленным значением, занесенным в память электронной схемы. В случае расхождения автоматически изменяется коэффициент усиления предусилителя ФЭУ, так, чтобы амплитуда импульса, полученного от светодиода, была постоянна и соответствовала эталонному значению (оптической канал стабилизации);

- измерения температуры сцинтиллятора специальным температурным датчиком и установления по его показаниям из заранее определенной таблицы такого коэффициента усиления предусилителя ФЭУ, при котором положение линий в спектре было бы постоянно (температурный канал стабилизации);

- вычисления в процессе работы спектрометра каждые 5 минут положения линий калия $E=1452\text{ кэВ}$ и тория $E=2600\text{ кэВ}$ в спектре и при их смещении производство корректировки (программный канал стабилизации).

Для дополнительного уменьшения температурных искажений спектра целесообразно ограничивать теплообмен сцинтиллятора ВГО с внешней средой

путем помещения его в защитный кожух из теплоизолирующего материала толщиной 10–20 мм.

Введение такой стабилизации в экспериментальный макет гамма-спектрометра со сцинтиллятором ВГО размером 63х63 мм позволило обеспечить энергетическое разрешение спектрометра для линии $E=662$ кэВ изотопа Cs-137, равным 9,8 % для интервала температур от -30 °С до $+50$ °С. Относительное смещение линии Cs-137 ($E=662$ кэВ) в набираемом спектре при этом составило менее 1 % .

Темп охлаждения гамма-спектрометра m для перепада температур от $+27$ °С до -11 °С составил $9,06 \times 10^{-5}$ 1/с, что обеспечивает стабильную работу спектрометра в полевых условиях.

В результате полевых испытаний получены карты интенсивности гамма-поля естественной радиоактивности на территории Советского района и Алтайского края, подтверждена высокая стабильность работы макета спектрометра и работоспособность заложенных в макет алгоритмов стабилизации, измерения и отображения. Повторяемость результата измерения по одному и тому же маршруту в пределах статистической погрешности измерения. Карта изменения интенсивности гамма поля и его компонент, а также интерпретационные параметры отображались непосредственно в процессе измерения в режиме on-line. Отчет по результатам измерений получен сразу по окончании съемки на маршруте.

Экспериментально подтверждена возможность гамма-съемки с автомобиля в движении со скоростями от 10 до 80 км/час. Дискретность съемки маршрута в движении составила: для пешеходной съемки со скоростью 3,6 км/час от 10 до 100 м; для автомобильной съемки со скоростями от 36 км/час до 72 км/час дискретность измерения не более 100 – 2000 метров. Для более детальной съемки требуется измерение при малых скоростях. При этом в зоне тория за время единичного измерения набиралось не менее 100 импульсов, что достаточно для вычисления интерпретационных параметров Th/U и DRAD [2].

На примере измерения интенсивности гамма-поля естественной радиоактивности и его компонент (U, Th, K) вдоль профиля длиной 50 км показана перспективность отображения параметров гамма-поля и интерпретационного параметра DRAD в режиме on-line. Результат измерений показан на рис. 1. Положительные значения DRAD показывают области с аномальными значениями естественной радиоактивности, которые могут быть порождены залежами углеводородов. Измерения проводились с помощью макета гамма-спектрометра, расположенного на автомобиле в движении. Средняя скорость движения – 80 км/час. Усреднение величины гамма-поля осуществлялось для участков длиной 2,5 км.

В качестве экспресс-оценки в программно-алгоритмическом макете созданного гамма-спектрометра могут быть использованы и другие интерпретационные параметры, получаемые из измеряемых величин гамма-поля, например, нарушение корреляционных связей между U и K, наличие кольцевых аномалий и осциллирующих отклонений от среднего для измеряемого гамма-поля.

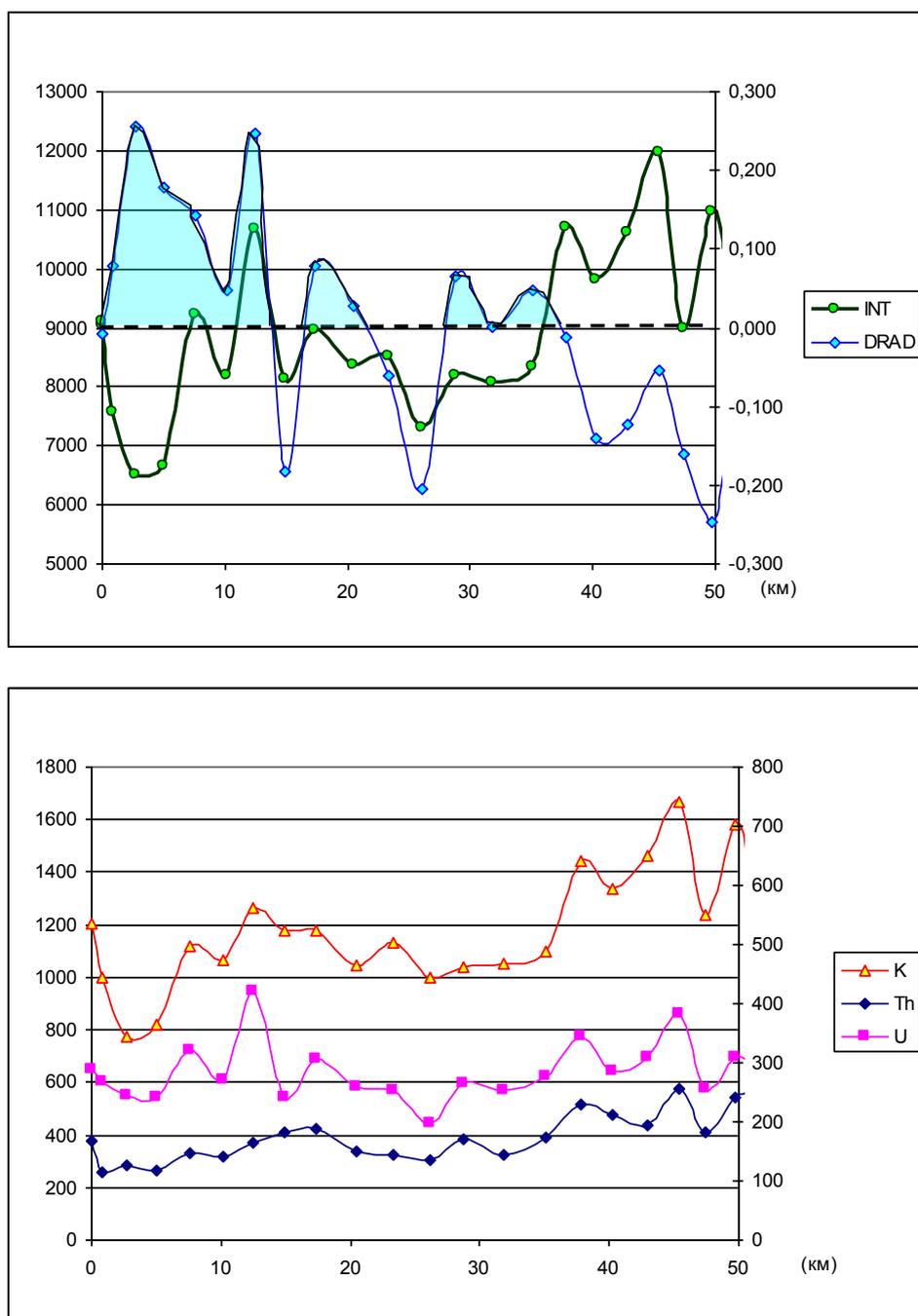


Рис. 1. Результат изменения интенсивности поля естественной радиоактивности (INT), его компонент (U, Th, K) и параметра DRAD вдоль профиля длиной 50 км

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболев И.С. Методы радиогеохимии при наземных поисках месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. - 2007. - Т. 311, № 1. - С. 90–96.
2. Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thomson C.K. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations // Geophysics. - 1993. - V. 58, Issue 10. - P. 1417–1427.

© Б. Г. Тутов, В. М. Грузнов, 2015

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ И ГЛУБИННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Валерий Викторович Плоткин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Игоревич Губин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: GubinD9@mail.ru

Разработана математическая модель для расчёта кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ) над геоэлектрическим разрезом, осложнённым приповерхностными и глубинными неоднородностями электропроводности.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, кажущееся сопротивление, приповерхностные и глубинные неоднородности электропроводности.

NUMERICAL MODEL OF THE INFLUENCE OF NEAR-SURFACE AND DEEP CONDUCTIVITY INHOMOGENEITIES AT MAGNETOTELLURIC SOUNDING

Valery V. Plotkin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Leading Research Scientist, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Dmitry I. Gubin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer, e-mail: GubinD9@mail.ru

The mathematical model is developed for calculation of magnetotelluric sounding (MTS) curves over the geoelectric section complicated by near-surface and deep conductivity inhomogeneities.

Key words: magnetotelluric sounding, apparent resistivity, the near-surface and deep conductivity inhomogeneities.

Интерпретация кривых МТЗ в рамках одномерной модели среды нередко приводит к построению ложных геоэлектрических разрезов. Искажения магнитотеллурических кривых, возникающие при отклонениях от модели Тихонова-Каньяра, часто проявляются при наличии латеральных неоднородностей электропроводности. Для дальнейшего развития метода МТЗ необходимо создание эффективного алгоритма, позволяющего получать решения прямых и обратных задач для сложных геологических структур за минимальное расчётное время.

Для анализа особенностей искажений кривых МТЗ будем использовать модель среды, включающую поверхностный и глубинный неоднородные по электропроводности слои, между которыми располагается горизонтально-слоистая модель среды. Подстилает глубинный слой также латерально-однородный геоэлектрический разрез.

Для решения прямой задачи неоднородные слои разбиваются на конечное число параллелепипедов, в каждом из которых среда однородна. Электромагнитное поле в них определяется с помощью метода Треффца [1]. Граничные условия на кровле поверхностного неоднородного слоя и на подошве глубинного основаны на двумерном Фурье-преобразовании электромагнитного поля. Их вывод подробно рассмотрен в работе [2]. Основная задача заключается в получении граничных условий в области между неоднородными слоями.

Из уравнений Максвелла следует, что пространственный спектр электромагнитного поля в каждом слое латерально однородной модели среды, расположенной между неоднородными слоями, представим в виде:

$$\begin{aligned}
 e_x &= a^+ e^{n_j(z-z_m)} + a^- e^{-n_j(z-z_m)}, \\
 e_y &= b^+ e^{n_j(z-z_m)} + b^- e^{-n_j(z-z_m)}, \\
 h_x &= -\frac{ik_x k_y}{\omega \mu n_j} \left(a^+ e^{n_j(z-z_m)} - a^- e^{-n_j(z-z_m)} \right) - \left(\frac{ik_y^2}{\omega \mu n_j} + \frac{n_j}{i\omega \mu} \right) \left(b^+ e^{n_j(z-z_m)} - b^- e^{-n_j(z-z_m)} \right), \\
 h_y &= \left(\frac{ik_x^2}{\omega \mu n_j} + \frac{n_j}{i\omega \mu} \right) \left(a^+ e^{n_j(z-z_m)} - a^- e^{-n_j(z-z_m)} \right) + \frac{ik_x k_y}{\omega \mu n_j} \left(b^+ e^{n_j(z-z_m)} - b^- e^{-n_j(z-z_m)} \right),
 \end{aligned}$$

где $a^{+,-}$ $b^{+,-}$ – некоторые константы, которые в общем случае могут зависеть от пространственных частот k_x и k_y , $n_j = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - i\omega \mu \sigma_j}$, z_m – координата центра слоя, σ_j – электропроводность слоя.

Далее, пользуясь непрерывностью $e_{x,y}$ и $h_{x,y}$ на всех горизонтальных границах в пространстве между неоднородными слоями, можно составить необходимое количество уравнений, учитывая все возможные комбинации пар k_x и k_y [2].

На внешних боковых гранях неоднородных слоёв поставлены периодические граничные условия. Этот тип граничных условий связан с использованием в алгоритме двумерного Фурье представления поля, которое автоматически предполагает, что поле меняется в неоднородных слоях периодически по оси x с периодом $T_x = L_x n$ и по оси y с периодом $T_y = L_y m$ ($L_{x(y)} n(m)$ – размер блоков и их число вдоль оси $x(y)$).

Рис. 2 и 3 отражают влияние глубинной аномалии на искажения кривых МТЗ (ρ_{xy} и ρ_{yx} – искажённые кривые, ρ_L – неискажённая). Все графики по-

строены для центральной точки полигона. На рис. 2 кривые с индексом 1 ($\rho_{xy1}, \rho_{yx1}, \rho_{L1}$) рассчитаны для модели среды, представленной на рис. 1, а с индексом 2 ($\rho_{xy2}, \rho_{yx2}, \rho_{L2}$) – для той же модели, но с отсутствием аномалии в глубинном слое. Кривые на рис. 3 построены для той же модели (рис. 1), но с большей мощностью 3-го слоя (h_3) латерально-однородной среды между неоднородными слоями (не 30 м, а 400 м, смысл индексов тот же). Из рисунков видно уменьшение влияния глубинной аномалии на искажения кривых МТЗ при увеличении мощности 3-го слоя, что очевидно из физических соображений.

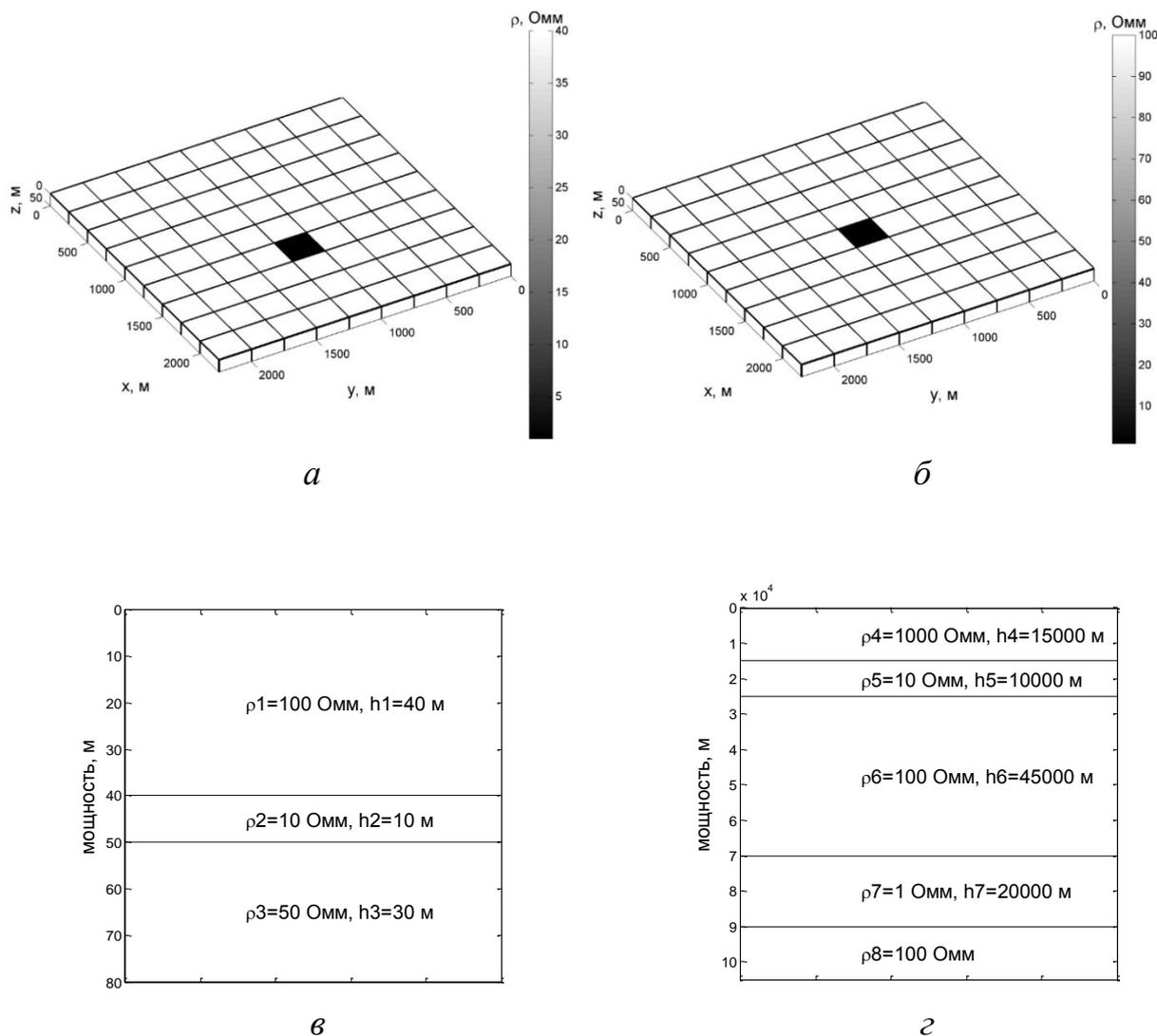


Рис. 1. Модель среды:

a – поверхностный неоднородный слой, *б* – глубинный неоднородный слой,
в – горизонтально-слоистая модель среды между неоднородными слоями,
г – горизонтально-слоистая модель среды под глубинным неоднородным слоем

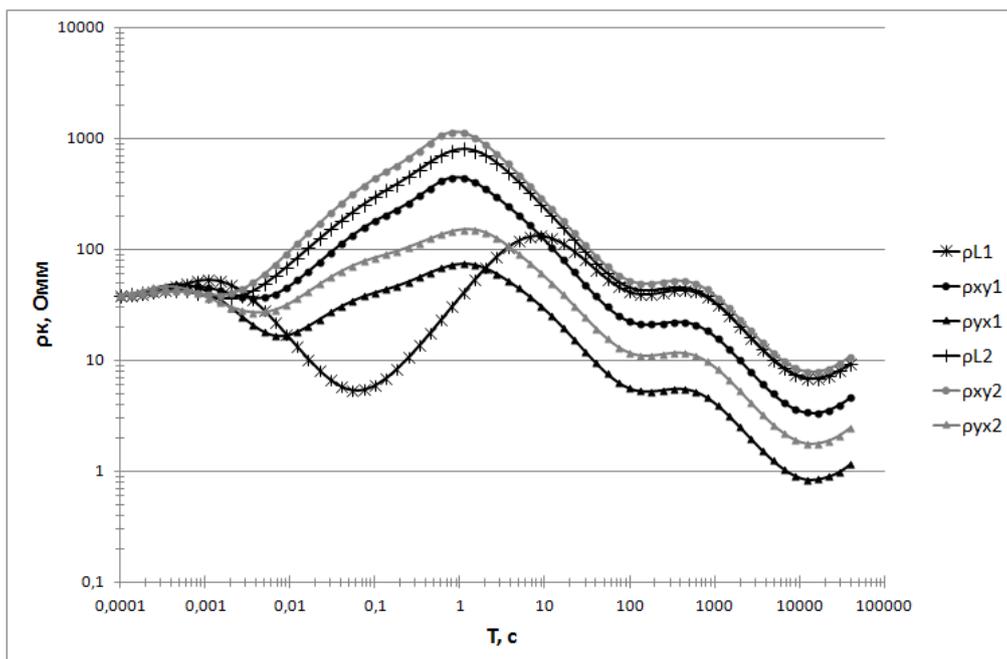


Рис. 2. Кривые кажущихся сопротивлений

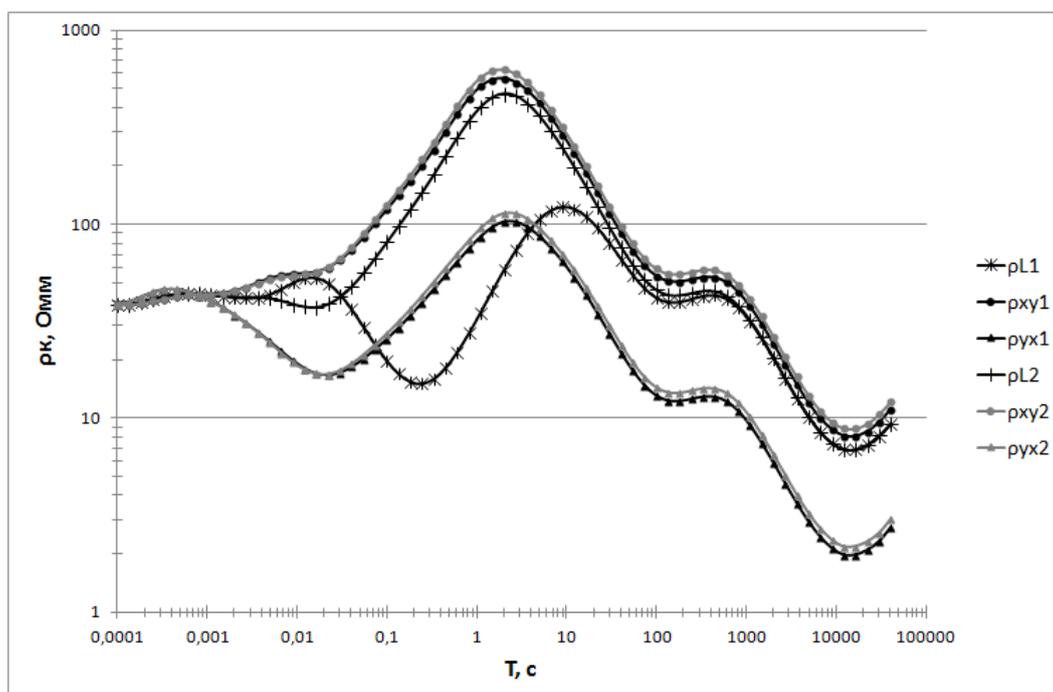


Рис. 3. Кривые кажущихся сопротивлений

На рис. 4 и 5 приведены распределения векторов электрического поля в плоскости $y=1250$ м от поверхности до уровня подошвы глубинного слоя (для двух моментов времени $t_1=66,2$ с и $t_2=66,3$ с модель среды, как на рис. 1, но в отсутствие аномалии в поверхностном неоднородном слое и однородной средой с УЭС 200 Ом/м и мощностью 400 м между неоднородными слоями). Поля

рассчитаны для периода зондирования 1000 с. Из рис. 4 и 5 видно, что в пространстве между неоднородными слоями возбуждается токовое кольцо, центр которого с течением времени колеблется между слоями.

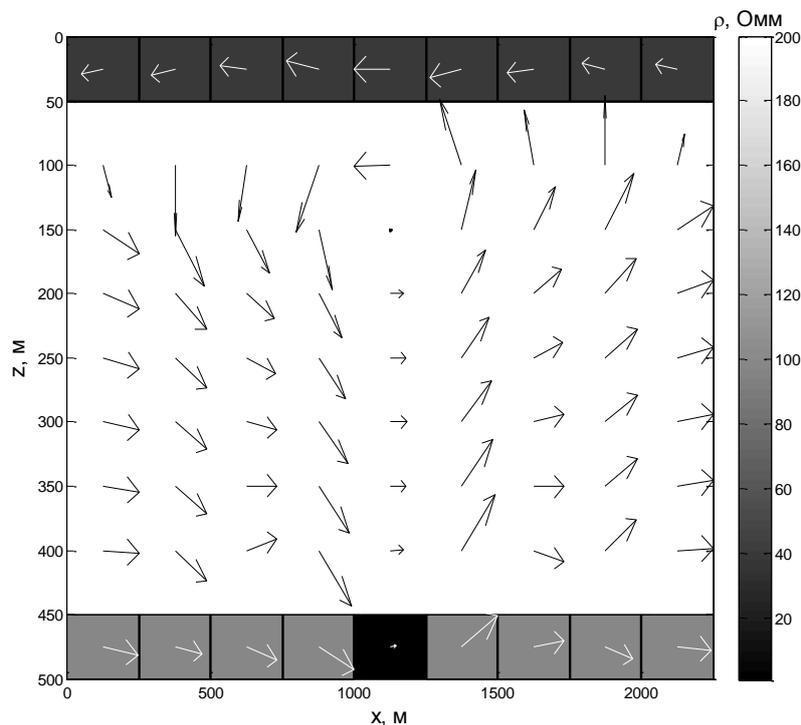


Рис. 4. Распределение направлений электрического поля в момент времени $t_1=66,2$ с

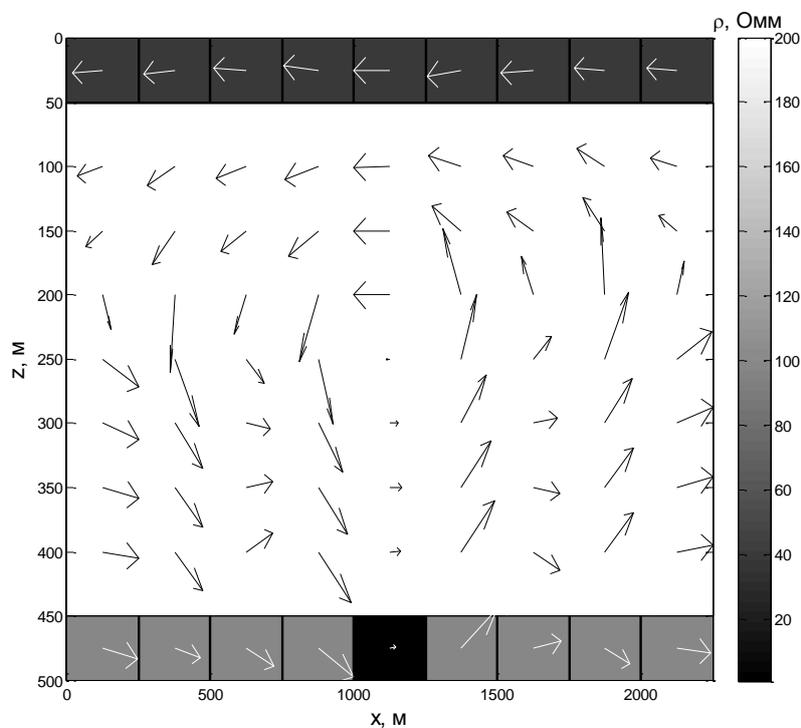


Рис. 5. Распределение направлений электрического поля в момент времени $t_2=66,3$ с

Можно видеть, что представленная модель пригодна для детального анализа искажений магнитотеллурических кривых над геоэлектрическим разрезом, осложненным латеральными и глубинными неоднородностями электропроводности. Проведенные расчеты указывают на сложный характер взаимодействия токов, возникающих в рассмотренных неоднородных слоях вблизи поверхности и в глубине среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. - 2011. - Т. 47, № 2. - С. 15–26.

2. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56.

© В. В. Плоткин, Д. И. Губин, 2015

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОРОД*

Альберт Дмитриевич Дучков

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

Никита Александрович Голиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)333-31-38, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Андрей Юрьевич Манаков

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, доктор химических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)316-53-46, e-mail: manakov@niic.nsc.ru

Михаил Евгеньевич Пермяков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, и.о. заведующего лабораторией, тел. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

Аркадий Николаевич Дробчик

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383) 333-14-18, e-mail: DrobchikAN@ipgg.sbras.ru

Сконструирована и изготовлена аппаратура, позволяющая в лабораторных условиях моделировать гидратосодержащие искусственные образцы и измерять их акустические свойства (скорости волн, их поглощение/затухание). Проведена серия успешных тестовых экспериментов по формированию образцов, содержащих гидраты метана, и по измерению скоростей акустических волн в консолидированных (оргстекло, песчаник) и неконсолидированных (кварцевый песок) образцах при разных давлениях и температурах.

Ключевые слова: гидраты метана, гидратосодержащие и мерзлые породы, акустические свойства пород, аппаратура для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их акустических свойств.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-14-00511) в ИНГГ и ИНХ СО РАН.

LABORATORY SETTING FOR THE STUDY OF ACOUSTIC PROPERTIES OF GAS HYDRATE-BEARING AND FROZEN ROCKS

Albert D. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Principal Scientist, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Nikita A. Golikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Scientist, tel. (383)333-31-38, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Andrei Yu. Manakov

Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Lavrentiev Prospect, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)316-53-46, e-mail: manakov@niic.nsc.ru

Mikhail E. Permyakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

Arkadii N. Drobchik

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptuyug Prospect, 3, Junior Researcher, tel. (383)333-14-18, e-mail: DrobchikAN@ipgg.sbras.ru

Equipment, allowing in laboratory the hydrate-bearing samples simulation and measuring their acoustic properties (velocity of the waves, their absorption/attenuation) have been designed and manufactured. A series of successful test experiments of the hydrate-bearing samples simulation and measuring of the acoustic waves velocity in the consolidated (plexiglas, sandstone) and unconsolidated (quartz sand) samples at different pressures and temperatures was carried out.

Key words: methane hydrates, hydrate-bearing and frozen rocks, acoustic properties of rocks, equipment for simulating hydrate-bearing samples and measuring their acoustic properties.

Сведения о физических свойствах горных пород, содержащих газы гидраты, необходимы для калибровки дистанционных геофизических методов (главным образом, сейсмических и электромагнитных) поисков и разведки скоплений газогидратов в донных осадках глубоких водоемов и в мерзлых породах криолитозоны. Обычно физические свойства гидратосодержащих пород изучаются в лабораторных условиях. За границей основное внимание уделяется акустическим свойствам, т. к. именно сейсмические методы в основном применяются при поисках и разведке скоплений газовых гидратов в морских осадках [1–3]. В России только в последнее десятилетие геологическими мето-

дами (подводное бурение, пробоотбор грунтовыми трубками) выявлено более 50 скоплений гидратов метана в поддонных осадках оз. Байкал [4] и Охотского моря [5]. Несомненно, что в ближайшие годы будут обнаружены гидратные месторождения в арктических окраинных морях. Весьма вероятно наличие реликтовых скоплений гидратов метана в криолитозоне Сибири [6]. Для поисков и оконтуривания гидратных тел в этих районах целесообразно использовать сейсмические методы, что, однако, требует предварительного изучения акустических свойств пород. Такая задача была поставлена в 2014 г. перед авторским коллективом. В итоге нами сконструирована и построена лабораторная установка, позволяющая моделировать гидратосодержащие образцы и измерять их акустические свойства (скорости продольных и поперечных волн). Аппаратура и результаты тестовых экспериментов описаны в данной статье. Схема установки показана на рис. 1.

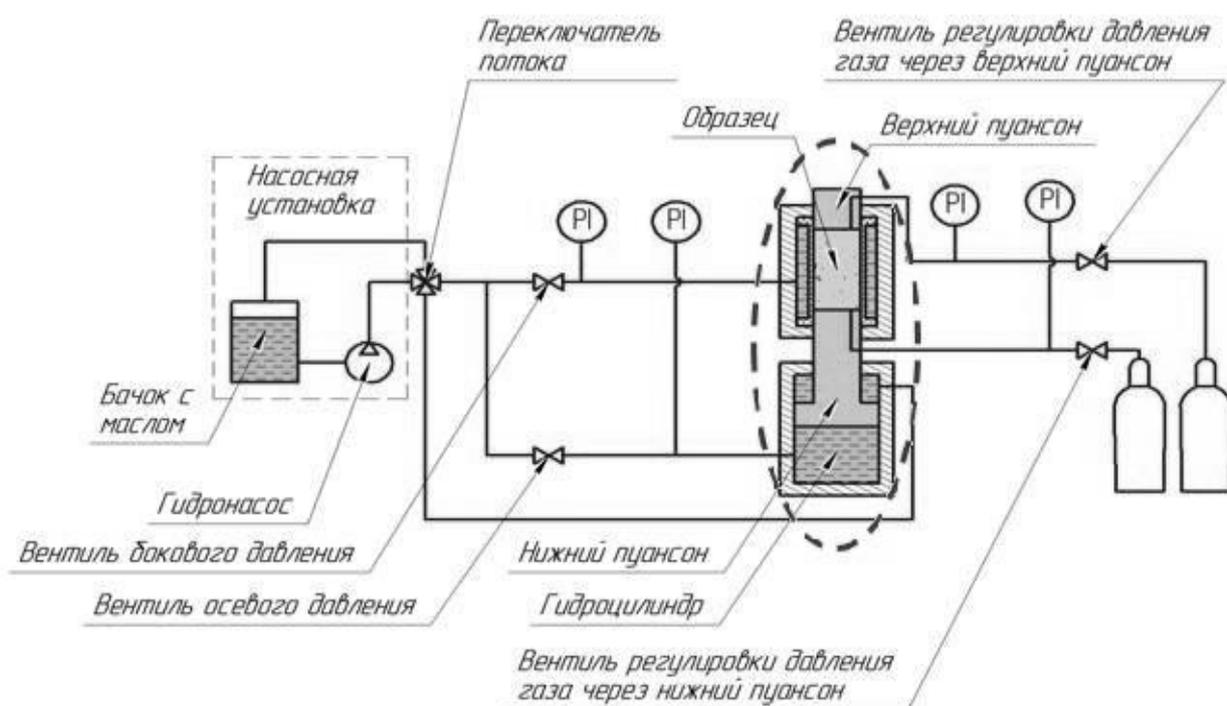


Рис. 1. Принципиальная схема установки
(пунктирным овалом отмечена камера высокого давления)

Основным узлом установки является камера высокого давления, в которой размещается исследуемый образец. Установка включает также блоки создания внешнего (осевого и бокового) давления на образец (насосная установка, переключатель потока, вентили, манометры), доставки газа/жидкости в образец, термостатирования и измерительную систему, предназначенную для возбуждения и приема акустических волн. Камера состоит из стального цилиндра с внутренней резиновой манжетой и двух пуансонов с акустическими датчиками. Размеры камеры позволяют работать с образцами диаметром 30 мм

и высотой 10–50 мм. Камера рассчитана на максимальное давление 45 МПа. Источником давления в магистрали служит насосная установка. Для охлаждения камеры до температуры, необходимой для образования в образце гидратов или льда, используется термостат Huber Ministat. Измерительная система установки состоит из генератора высоковольтных импульсов АКПП-3305, цифрового осциллографа АКПП-72208А, излучателя и приемника ультразвуковых импульсов. Последние имеют одинаковую конструкцию и вмонтированы в верхний и нижний пуансоны. Датчики продольных (Р) волн сделаны из дисков пьезокерамики ЦТС-9 диаметром 18 мм и толщиной 2 мм, поляризованной по толщине диска, датчики поперечных (S) волн – из дисков, поляризованных по диаметру.

Основными измеряемыми акустическими параметрами являются скорости Р и S волн. Источник ультразвуковых волн (генератор АКПП-3305) генерирует в излучателе прямоугольный импульс длительностью 1 мкс и амплитудой 150 В, который после прохождения образца фиксируется приемником и поступает на один из каналов (В) цифрового осциллографа. Одновременно генератор вырабатывает синхроимпульс, который подается на другой канал (А) и служит точкой отсчета при измерениях времени прихода волны. Такая методика позволяет избежать ошибок, связанных с возможной нестабильностью синхронизации осциллографа. Частота дискретизации сигнала 250 МГц, т. е. шаг записи равен 4 нсек. Скорости Р- и S-волн рассчитываются по формуле: $V = L / (t_u - t_3)$, где L – длина образца, t_u – время прихода ультразвукового импульса в приемник, t_3 – время задержки импульса в акустическом тракте «источник - приемник». Для нашей установки $t_3^P = 5.04$ мкс для Р-волны и $t_3^S = 8.68$ мкс для S-волны.

Для проверки работоспособности установки выполнены тестовые измерения скоростей прохождения акустических волн через консолидированные образцы (оргстекло и кварцевый песчаник) и образцы кварцевого песка (сухого, влажного, замороженного и содержащего гидраты).

Первым объектом измерений был эталонный образец из оргстекла. Измерения проводились при внешнем давлении 5 МПа и комнатной температуре. Получены значения скоростей $V_p = 2704$ м/с, $V_s = 1373$ м/с, которые практически совпадали со справочными данными ($V_p = 2724$ м/с и $V_s = 1365$ м/с). Более высокие значения скоростей получены при тестовых измерениях образца сцементированного мелкозернистого песчаника, отобранного с глубины 2700 м из пласта одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. В данном случае измерения акустических скоростей проводились при комнатной температуре и внешнем давлении 5, 10 и 15 МПа. Зафиксирован заметный (в пределах 10 %) рост скоростей V_p (от 4133 до 4511 м/с) и V_s (от 2607 до 2941 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. При давлении 15 МПа значения скоростей оказались практически идентичными (различие не более 1 %) полученным ранее на другой установке.

С наихудшими условиями для возбуждения акустического сигнала пришлось столкнуться в процессе измерений образцов сухого кварцевого песка при

температуре 15⁰С и давлении 5, 10, 15 МПа. Удалось отчетливо зафиксировать влияние внешнего давления на форму импульса и скорости распространения Р- и S-волн в сухом песке. Скорость Р-волны заметно изменяется (от 1069 до 1410 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. Скорость S-волны стабилизируется на уровне 799–868 м/с при давлении более 10 МПа. Эксперименты с сухим песком позволили определить минимальное давление (10–15 МПа) обжатия, которое обеспечивает необходимое сцепление датчиков с неконсолидированными образцами.

Мокрый песок измерялся при температурах 15⁰С и -7⁰С и при давлениях 5, 10 и 15 МПа. При положительных температурах насыщение песка водой не сказывалось заметно на скорости прохождения акустического сигнала. При замерзании воды скорости акустических волн резко увеличивались (примерно до уровня скоростей в образце консолидированного песчаника) и практически не изменялись с ростом давления. На записях хорошо заметно увеличение амплитуды сигнала при замерзании песка, что свидетельствует о повышении добротности образца. На записях Р-волны также фиксировался длинный цуг реверберационных помех (переотражения, резонансы и т.д. от всех границ как внутри датчиков, так и внутри установки).

Выполнено несколько успешных экспериментов по формированию песчаных образцов, содержащих гидраты метана. Для наработки метангидрата влажный песчаный образец подвергался многократным (4 цикла) изменениям температуры образца от 2 до -8⁰С и одновременно «промывался» метаном под давлением 8 МПа. Акустические измерения проводились после каждого цикла «замерзания-оттаивания».

В результате выполненных исследований сконструирована и изготовлена установка, предназначенная для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их акустических свойств. Проведено тестирование основных блоков установки (системы герметизации, давления, термостатирования, измерительной системы) в серии экспериментов по измерению скоростей акустических волн в консолидированных (оргстекло, песчаник) и неконсолидированных (песок) образцах при разных давлениях и температурах. Тестовые эксперименты показали пригодность установки для формирования синтетических образцов, содержащих газы гидраты, а также измерения акустических свойств гидратосодержащих и мерзлых образцов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D., Dugan B., Espinoza D.N., Germaine J., Jang J., Jung J.W., Kneafsey T.J., Shin H., Soga K., Winter W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments // *Reviews of Geophysics*. – 2009. - 47, RG4003. - P. 1–38.
2. Gabitto J.F., Tsouris C. Physical properties of gas hydrates: A review // *Journal of Thermodynamics*, vol. 2010, article ID 271291, 12 pages, doi:10.1155/2010/271291
3. Riedel M., Willoughby E.C., Chopra S. (Eds.). *Geophysical characterization of gas hydrates* (SEG geophysical developments series; no. 14). Tulsa: Society of exploration geophysicists. - 2010. - 390 p.

4. Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47, № 8. - С. 979–981.
5. Обжиров А.И., Коровицкая Е.В., Пестрикова Н.Л., Телегин Ю.А. Нефтегазоносность и газогидраты в охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2 (14). – С. 55–62.
6. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – М.: ВНИИГАЗ, 2009. – 192 с.

*© А. Д. Дучков, Н. А. Голиков, А. А. Дучков, А. Ю. Манаков,
М. Е. Пермяков, А. Н. Дробчик, 2015*

МЕТОДИКА УЧЕТА ИНТЕНСИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ*

Пётр Георгиевич Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент

Леонид Валерьевич Цибизов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант

Дмитрий Александрович Борисенко

ООО Новосибирская геолого-поисковая экспедиция (НГПЭ), Россия, г. Новосибирск, ул. Буровая партия, 12, директор, тел. (383)330-34-55, info@ngpe.ru

Исследовано пространственно-временное поведение интенсивных промышленных магнитных помех амплитудой до 150 нТл на участке планируемой магнитной съемки в районе долины р. Издревая вблизи от электрофицированной железной дороги. Предложена методика учета магнитных помех, которая позволяет снизить их уровень более чем на порядок и, таким образом, существенно повысить достоверность выделения реальных магнитных аномалий на данном участке планируемых работ.

Ключевые слова: промышленные магнитные помехи, магнитная съемка, методика учета помех, магнитометры.

METHOD OF THE INTENSIVE INDUSTRIAL NOISE REDUCTION DURING MAGNETIC SURVEY

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Leading Research Scientist, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str., Associate Professor

Leonid V. Tsibizov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str., Postgraduate student

Dmitriy A. Borisenko

ООО Novosibirsk geology-search expedition, Director, Russia, tel. (383)33-33-012, e-mail: info@ngpe.ru

* Работа выполнена при поддержке проекта VIII.70.2.3 Программы ФНИ и проекта 7.1 ОНЗ РАН.

Spatio-temporal behavior of the intensive industrial magnetic noises with amplitude up to 150 nT was studied for area of projected magnetic survey near the valley of Izdrevay river and electric railway. The proposed method of magnetic noise reduction make it possible to reduce the noise amplitude by more than 10 times. This method significantly increases reliability of allocation of real magnetic anomalies on this site of the planned works.

Key words: industrial magnetic noise, magnetic survey, method of noise reduction, magnetometer.

В связи с увеличением техногенных помех в низкочастотном диапазоне электромагнитных волн, связанным с повсеместным распространением энергетического и телекоммуникационного оборудования и увеличением количества и пропускной способности транспортных линий, всё более актуальным становится вопрос учета промышленных магнитных помех при проведении магнитометрической съёмки.

Это обстоятельство существенно сдерживает проведение магнитометрических съёмок и наблюдений и снижает достоверность их результатов при выполнении геологоразведочных работ, инженерных изысканий, археологических работах, проведении постоянных наблюдений в магнитных обсерваториях [1, 2].

В ноябре 2014 г. в долине р. Издревая между селами Издревая и Гусиный брод (Новосибирская область) на участке площадью ~ 2 км \times 3 км были проведены специальные работы по изучению промышленных магнитных помех в связи с планируемой магнитометрической съёмкой.

Территория с нескольких сторон окружена мощными источникам электромагнитных помех, таких как непосредственно примыкающая к участку электрофицированная железная дорога (рис. 1), строящаяся автомагистраль (в 2,5 км), дачные общества.

Для изучения пространственно-временных характеристик промышленных помех в пределах участка выбраны 3 пункта для размещения магнитовариационных станций. Первый из этих пунктов располагался в северо-восточной части участка, непосредственно вблизи железной дороги (~ 200 м), второй пункт располагался в 1650 м от первого в направлении запад-юго-запад и был наиболее удаленным от железной дороги – 1500 м, третий пункт находился в 1500 м от второго на юг, а расстояние до железной дороги составляло 750 м.

В качестве магнитовариационных станций использовались протонные магнитометры ММРОС-1 (на пунктах 1 и 2) и магнитометр-градиентометр ММРОС-2 (пункт 3). Измерялся модуль вектора магнитной индукции. Среднеквадратическая погрешность этих магнитометров составляет порядка 0.02 нТл, абсолютная точность – не хуже 1 нТл, долговременная стабильность в технических характеристиках прибора не приводится, но обычно для этого типа датчиков (эффект Оверхаузера) она не превышает 0,3 нТл.

Магнитовариационные станции работали одновременно в течение 30 минут. Результаты измерений магнитного поля (Т) на 3 пунктах участка проведения работ и на магнитной обсерватории Новосибирск показаны на рис. 2.

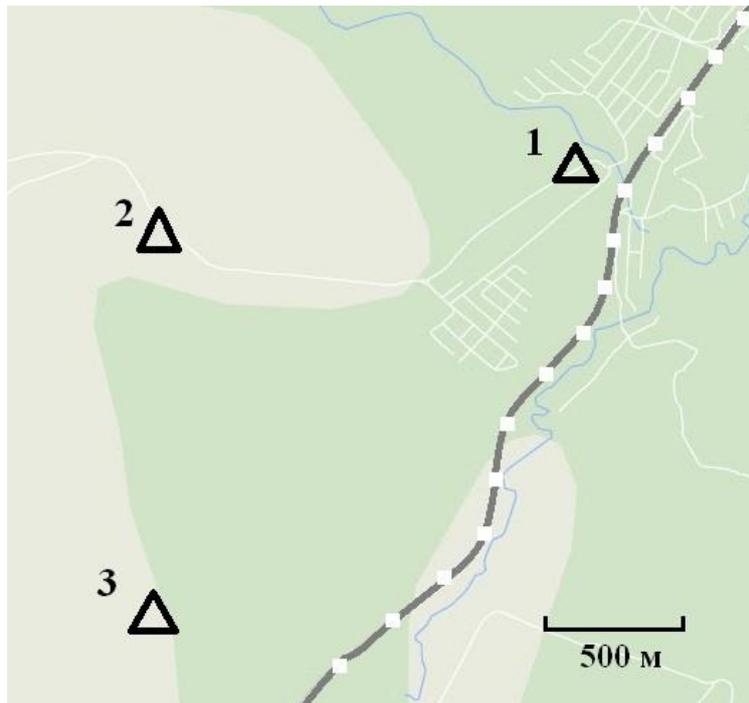


Рис. 1. Схема расстановки магнитовариационных станций (треугольники) и расположения электрофицированной железной дороги (прерывистая линия) на участке работ

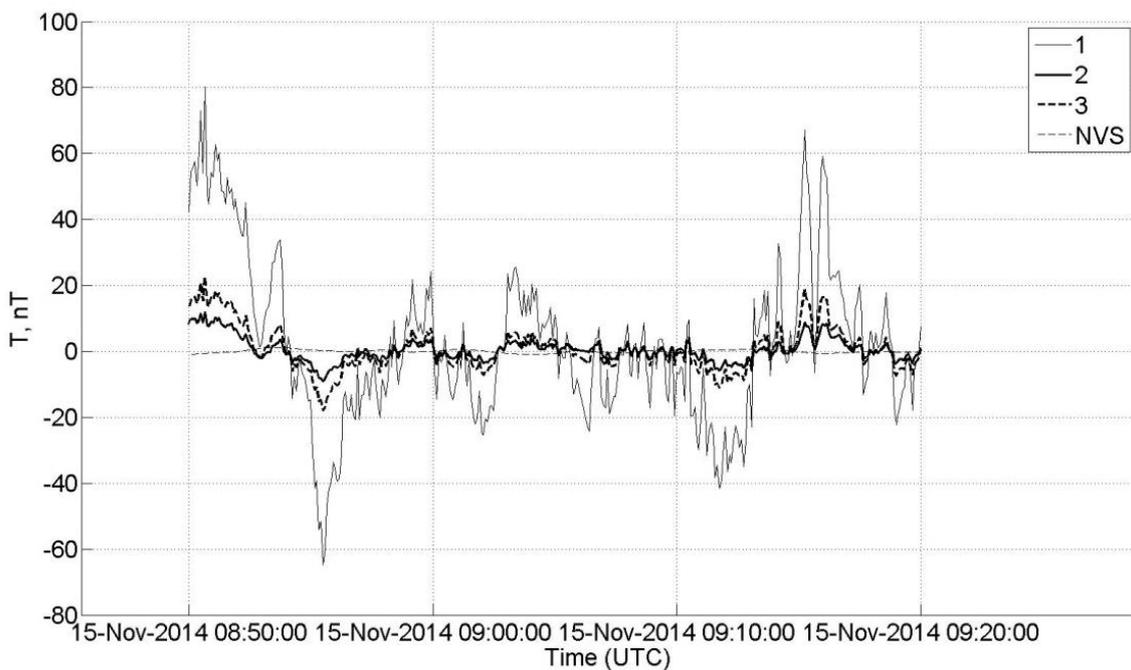


Рис. 2. Изменения модуля вектора магнитной индукции T в пунктах 1, 2, 3 и в магнитной обсерватории Новосибирск (NVS). Средний уровень поля приведён к нулю (вычтена константа, равная среднему для каждой станции уровню)

Реальные вариации магнитного поля за этот 30-минутный период по данным обсерватории не превышали ± 2 нТл и они не коррелировали с наблюдаемыми на пунктах 1, 2, 3 помехами. Наибольшая амплитуда помех наблюдалась в пункте 1, ближайшем к железной дороге, где она составила ± 70 нТл. В пункте 3, на расстоянии 750 м от железной дороги, величина помехи равнялась ± 20 нТл. В пункте 2, в полутора километрах от железной дороги, зарегистрирована наименьшая амплитуда промышленных помех $\sim \pm 10$ нТл.

Обращает на себя внимание подобие форм вариаций, зарегистрированных на всех 3-х пунктах, и отсутствие сдвига по фазе (рис. 2). При этом амплитуда зарегистрированных помех существенно различается. Эти характеристики позволили нам предложить методику учета магнитных помех на этом участке, которая заключается в определении коэффициентов линейной связи (k_{1-2} , k_{3-2}) между значениями амплитуд магнитных помех, регистрируемых в этих пунктах.

Возможности реализации такой методики иллюстрируют рис. 3 и 4, которые показывают, что неучтенная часть промышленной магнитной помехи составляет $\pm (2-3)$ нТл, что составляет около 5 % от величины максимальной помехи на этом участке (пункт 1).

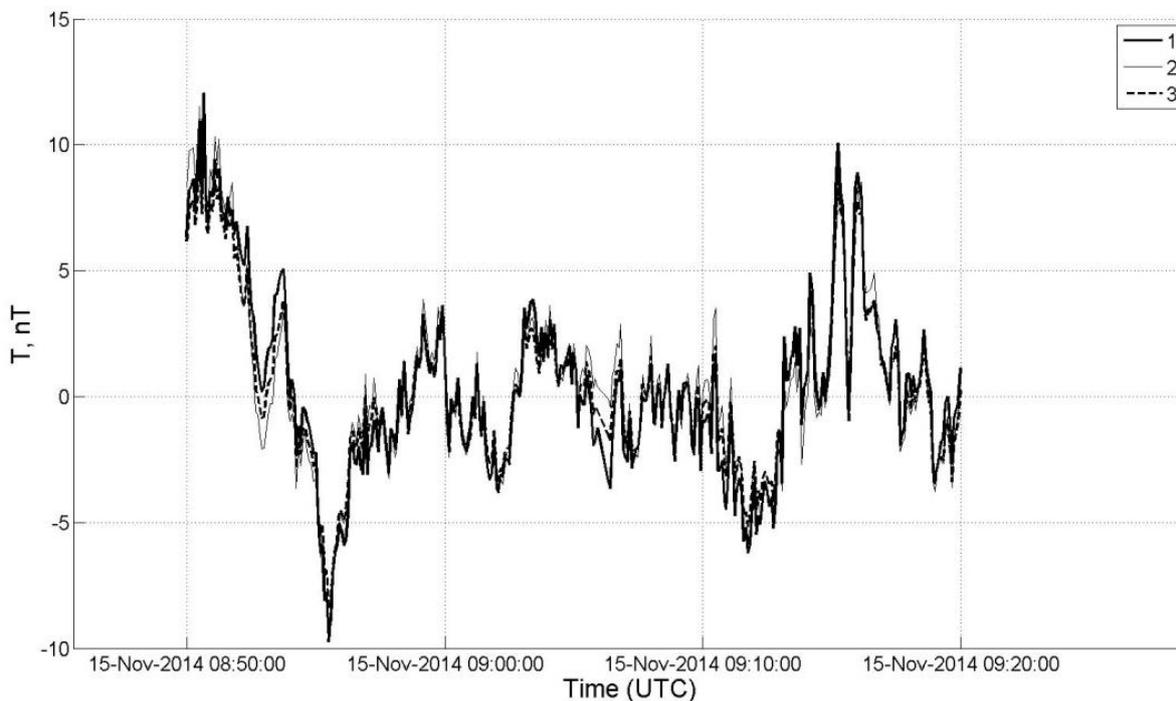


Рис. 3. Значения модуля вектора магнитной индукции промышленной помехи, зарегистрированные в пункте 2, и значения помехи 1-го и 3-го пунктов, приведённые к пункту 2 путем умножения на соответствующие коэффициенты линейной зависимости k_{1-2} и k_{3-2}

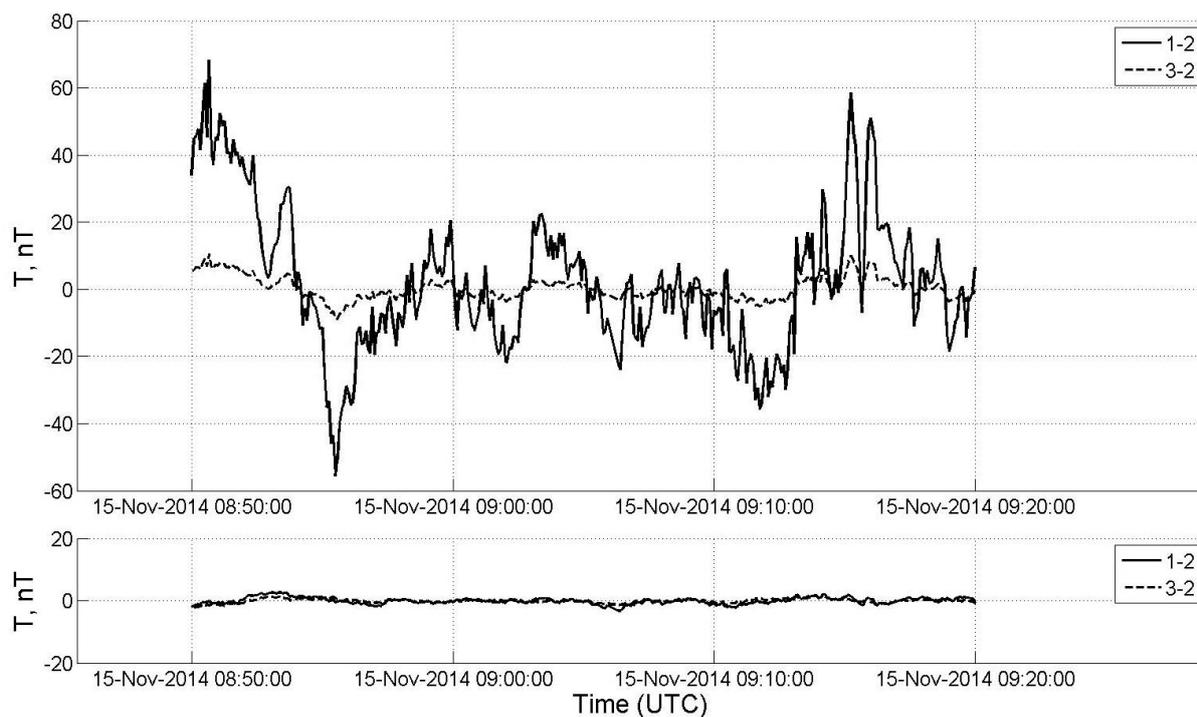


Рис. 4. Разности модуля вектора магнитной индукции между пунктами 1 и 2 и 3–2 (верхний график) и эти же разности после применения предлагаемой методики учета промышленных помех (нижний график)

Для реализации предлагаемой методики учета магнитных помех при проведении магнитной съемки необходимо будет знать пространственное распределение значений коэффициентов линейной зависимости на этом участке относительно, например, пункта 2, если этот пункт будет выбран в качестве базового вариационного пункта. Пространственное распределение коэффициентов на территории участка работ может быть установлено заблаговременно, до начала магнитной съемки, путем проведения одновременной регистрации вариаций помех в ряде пунктов участка (подобно выполненным наблюдениям). При этом может быть выявлена пространственная закономерность уменьшения амплитуды помех с расстоянием, например, от железной дороги либо от более локализованного источника. Базовая вариационная станция, к которой будет осуществляться приведение значений помех, должна работать в одном и том же пункте в течение всех этапов работ.

Следует отметить возможность использования этой методики при проведении магнитной съемки и наблюдений с различными целями, в том числе при выполнении тектономагнитных исследований на геодинамических полигонах, при аэромагнитной съемке, включая съемку с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гершанок Л.А. Малоглубинная магниторазведка в условиях промышленных помех // Вестник Пермского университета. – 2013. – Вып. 1 (18). – С. 34–51.
2. P'adua M.B., Padilha A.L. and Vitorello I. Disturbances on magnetotelluric data due to DC electrified railway: A case study from southeastern Brazil // Earth Planets Space. – 2002. – 54. – P. 591–596.

© П. Г. Дядьков, Л. В. Цибизов, Д. А. Борисенко, 2015

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ ПРИ ГЛУБИННОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ВИБРОИСТОЧНИКОВ

Семён Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-20-21, e-mail: Elagin.Semion@gmail.com

Разработанный алгоритм позволяет эффективно бороться с нестационарными шумами на сейсмограммах, полученных от больших виброисточников. Применяется при работах ГСЗ и вибромониторинге.

Ключевые слова: глубинное сейсмическое зондирование, сейсморазведка, обработка цифровых сигналов, ГСЗ, фильтрация нестационарных шумов.

NON-STATIONARY NOISE REDUCTION METHOD IN DEEP SOUNDING USING BIG VIBRATORS

Semion A. Elagin

Altay-Sayan branch, Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, tel. (383)333-20-21, e-mail: Elagin.Semion@gmail.com

Developed method used for effective filtration of non-stationary noise seismograms from big vibrators. Filtration applied on Deep Sounding exploration and vibro-monitoring data.

Key words: deep sounding, digital signal processing, non-stationary noise filtering, vibrators, seismogram processing.

При обработке длинных (более 30 мин) сеансов от больших виброисточников, применяемых при ГСЗ и активном вибрационном мониторинге, существует задача фильтрации нестационарных шумов на повторяющихся сеансах [1]. Предлагаемый метод позволяет увеличить сигнал/шум и тем самым улучшить разрешенность коррелограмм и прослеживаемость первых вступлений на бо'льших удалениях. Алгоритм проверялся на данных ГСЗ, полученных на профиле 1СБ Северо-восточный участок в 2014 г.

Параметры системы регистрации: расстояние между приемниками – 3–6 км, расстояние между источниками – 20–35 км. Число свипов на одном вибрационном пункте возбуждения (ПВ) – 10–24 шт. при одновременной работе двух вибрационных установок.

Одним из эффективных способов подавления нестационарных шумов является фильтр Винера. Вместе с ним может быть применен предлагаемый способ подавления нестационарных шумов. Для наглядности процесса построения фильтра ("шумовой кривой") представим наблюдаемый сигнал в дальней зоне в виде:

$$A(t) = F(t) + N(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ – наблюдаемый сигнал, F – полезный сигнал, N – шум.

$$N(t) = A(t) - F(t), \quad (2)$$

допустим, что $F(t) = S(A(t))$, где S – следящий фильтр по рабочей частоте свипа, тогда "чистый шум" без сигнала:

$$N'(t) = A(t) - S(A(t)) \quad (3)$$

Получим "шумовую кривую" как огибающую $N'(t)$: $Nc(t_j) = \sum_{i=j-k}^{j+k} N'(t_i)$, k – размер окна. Сглаживание применяем для уменьшения резких скачков и, следовательно, артефактов FFT.

$$A'(t) = A(t)/Nc(t), \quad (4)$$

где A' – виброграмма с пониженными шумами. Т. к. (1) и $N'(t) \sim Nc(t)$, то

$$A'(t) = F(t)/Nc(t), \quad (5)$$

т. е. "шумовая кривая" уменьшает амплитуду полезного сигнала пропорционально амплитуде широкополосного шума.

Рассмотрим упрощенный граф построения Nc на рис. 1.

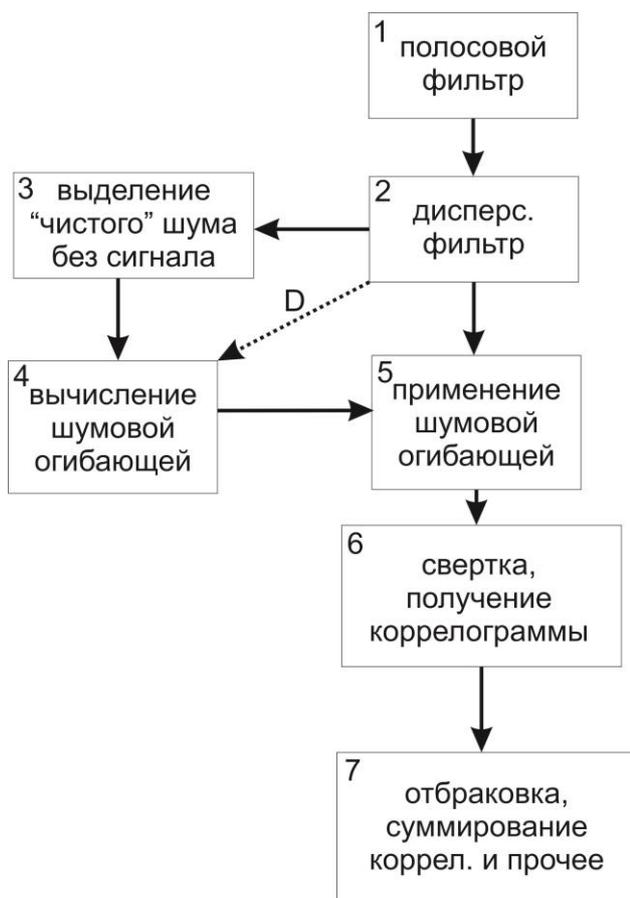


Рис. 1. Граф построения и применения "шумовой кривой"

1. Полосовой фильтр по рабочей частоте свипа 6–12 Гц.

2. Дисперсионный фильтр ("демпфирование" при $\text{rms}(A(t)) > 3$). Дополнительно на выходе выдается матрица D , где "сработал" фильтр, которая используется на шаге 4 для построения шумовой огибающей.

3. Вычитание области полезного сигнала $S(A)$ из исходного $A(3)$, в итоге получаем "чистый шум" $N(t)$ без полезного сигнала.

4. Построение шумовой кривой Nc .

Этап 1. Построение сглаженной огибающей $N(t)$.

Этап 2. "Дэмпинг", или "демпфирование" самых шумных участков по матрице D (из шага 2)

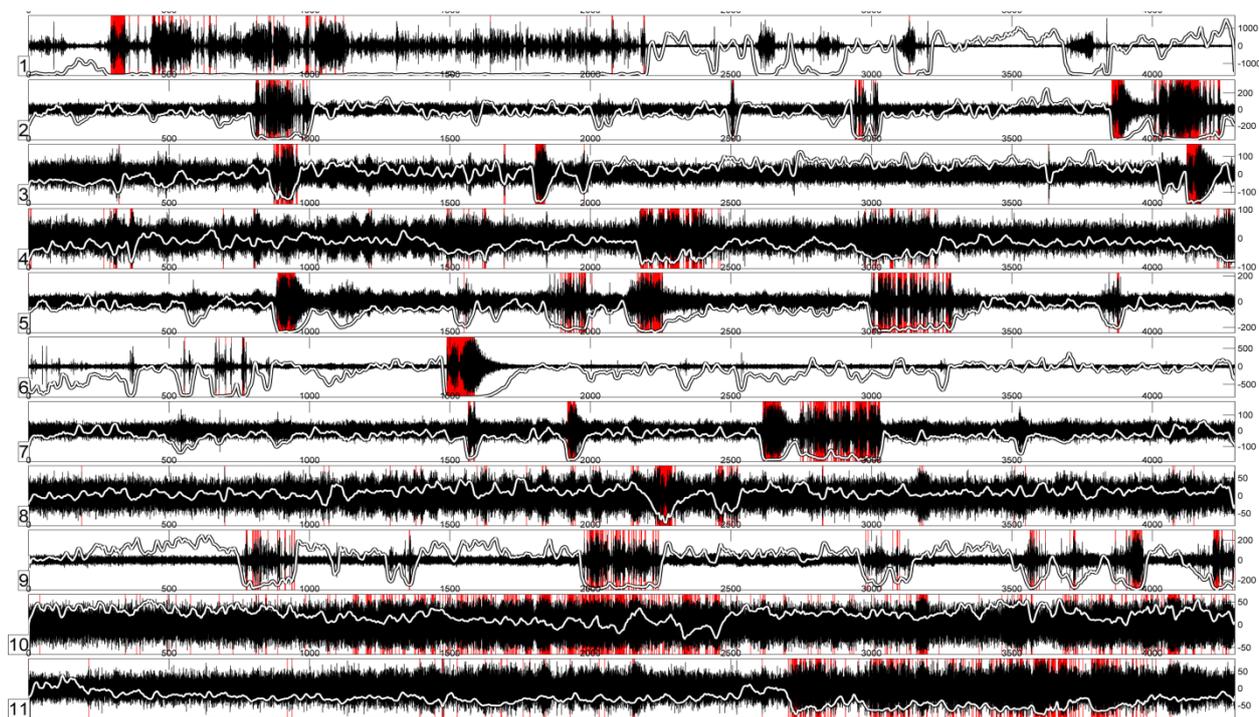
5. Перемножение шумовой кривой и исходного сигнала во временной области.

6–7. Стандартные шаги обработки.

Некоторые свойства фильтрации:

- применяется независимо к разным сеансам. Работает одинаково хорошо для разных (параметров) свипов;
- вычисленная шумовая кривая применяется к "временной области" сейсмограммы;
- требуется параметры свипа и расстояние ПП-ПВ;
- работает при любом уровне полезного сигнала;
- необходима калибровка (характеристика) регистрирующего тракта для однозначного перехода к смещениям;
- скорость вычисления сравнима с подсчетом коррелограммы (в 2–3 раза дольше). Применяемый до этого метод работал в более чем в 10 раз медленней [2];
- количество входных параметров минимально;
- менее эффективен в случае монохроматических шумов.

Характер нестационарных шумов можно оценить на рис. 2. От сеанса к сеансу участки с сильным широкополосным шумом находятся в случайных местах сейсмограммы. Из этого можно сделать предположение, что при достаточном количестве шумных сеансов можно составить один "не шумный", используя огибающие шумов.



Время, сек

Рис 2. Сейсмограммы 11 сеансов после полосовой и дисперсионной фильтрации, свип 6.5–11.5 Гц, продолжительность – 1 час, удаление 101 км (пв11, пп26). Черным – волновая форма, красным – места применения дисперсионного фильтра, белым – «шумовая» огибающая трассы

Результаты применения фильтрации в виде суммированных коррелограмм приведены на рис. 3 а) и б).

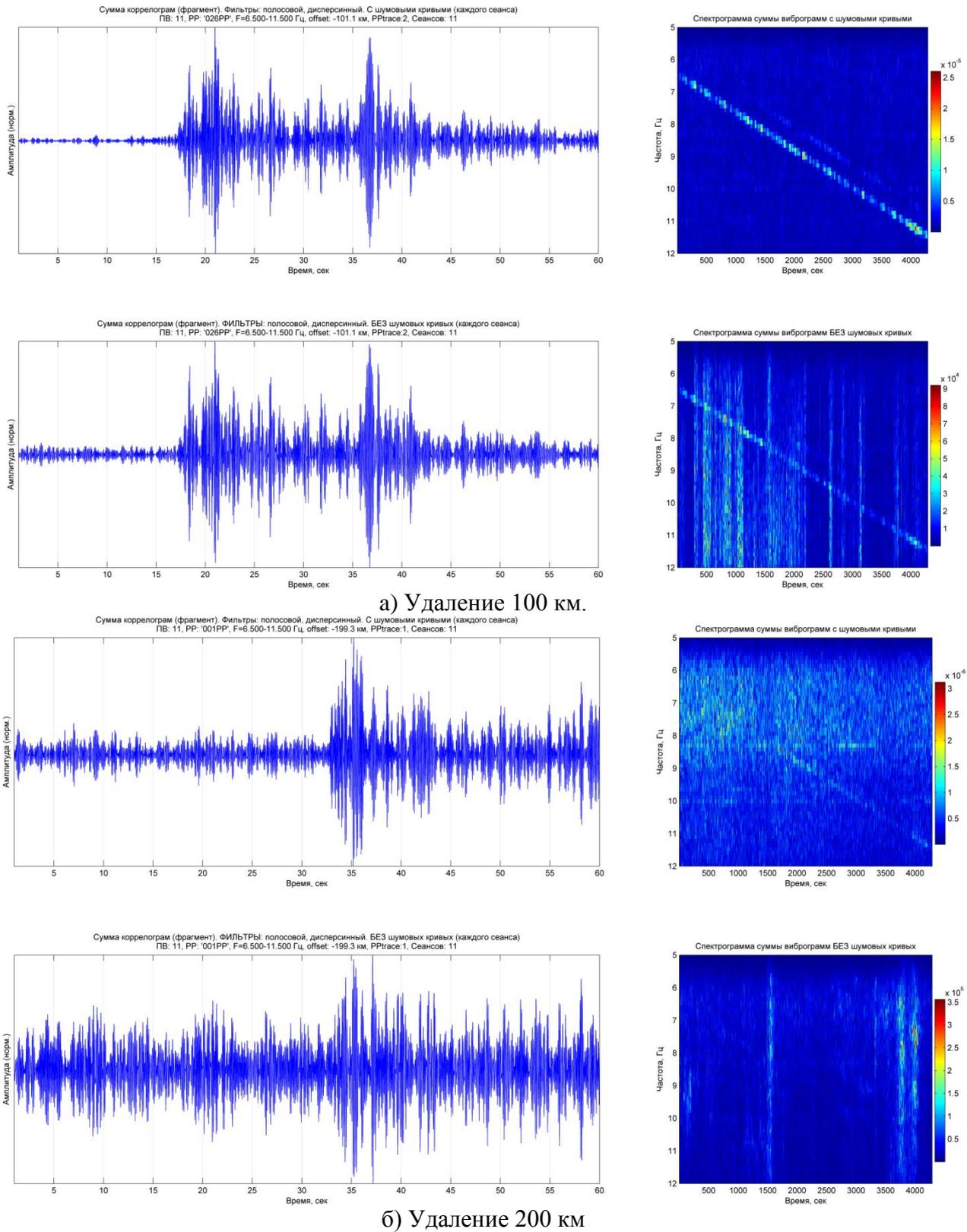


Рис. 3. Сравнение результирующих суммированных коррелограмм на разных удалениях а) и б), с применением "шумовой" кривой и без применения

Видно явное подавление шумов и улучшение качества первых вступлений на различных удалениях источник–приемник. Для дальнейшего улучшения суммы применяются дополнительные методы "выбраковки" шумных коррелограмм.

Предлагаемый метод позволяет эффективно подавлять нестационарные шумы, улучшая качество и дальность получаемых коррелограмм от вибрационных источников. Качественная эффективность метода подтверждается на полевых материалах ГСЗ 2014 года, но количественную оценку эффективности предстоит уточнить на моделировании при разных уровнях шума. Метод может применяться при активном вибромониторинге земной коры [3, 4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сержников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем востоке России // Проблемы информатики. - 2013. - №3 (20). - С. 30–41.

2. Романенко И.Е., Елагин С.А., Выделение участков полезного сигнала в виброграммах на фоне нестационарного шума (для суммирования коррелограмм по частям при работах ГСЗ с виброисточником ЦВ-40). // 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: тезисы докладов Всерос. конф. с междунар. участием (21–25 октября 2013 г., Новосибирск). - Новосибирск: Полиграфика, 2013.

3. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Елагин С.А., Романенко И.Е., Шенмайер А.Е., Сержников Н.А. Методика и результаты режимных вибросейсмических наблюдений в Алтае-Саянском регионе // X Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014». Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.

4. Соловьев В. М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Елагин С.А., Романенко И.Е., Шенмайер А.Е., Сержников Н.А., Галева Н.А. Режимные вибросейсмические наблюдения в Алтае-Саянском регионе: методика, результаты, перспективы. // 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: тезисы докладов Всерос. конф. с междунар. участием (21–25 октября 2013 г., Новосибирск). - Новосибирск: Полиграфика, 2013. - С. 214–217.

© С. А. Елагин, 2015

ОСНОВЫ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КУЗБАССА

Александр Фёдорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-12-61, e-mail: emanov@gs.sbras.ru

Алексей Александрович Еманов

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

Александр Владимирович Фатеев

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

Владимир Васильевич Ситников

Администрации Кемеровской области, 650064, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 62, начальник Департамента по чрезвычайным ситуациям

Екатерина Викторовна Лескова

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, старший научный сотрудник; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383) 330-60-14, e-mail: katya@gs.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Корабельщиков

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: korabel@gs.sbras.ru

Алексей Валерьевич Дураченко

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: durachenko@gs.sbras.ru

Создана система мониторинга наведенной сейсмичности в Кузбассе. Поставлены под контроль наиболее сильные сейсмические активизации в районе горнодобывающих предприятий. Доказано, что в Кузбассе наведенная сейсмичность существенно превышает природную.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, Кузбасс, мониторинг сейсмичности, сеть сейсмических станций.

BASIS OF THE SEISMOLOGICAL MONITORING SYSTEM IN KUZBASS

Aleksandr F. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Senior Researcher, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.sbras.ru

Aleksey A. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Head of the Laboratory; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.sbras.ru

Aleksander V. Fateev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Senior Researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Senior Engineer, tel. (383)330-52-66, e-mail: fateev@gs.sbras.ru

Vladimir V. Sitnikov

Kemerovo Region Administration, 650064, Russia, Kemerovo, 62 Sovetskiy Prospect, Head of the Department for Emergency Situations

Ekaterina V. Leskova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Senior Researcher; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Researcher, tel. (383)330-60-14, e-mail: katya@gs.sbras.ru

Dmitriy G. Korabel'schikov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: korabel@gs.sbras.ru

Aleksey V. Durachenko

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: durachenko@gs.sbras.ru

Monitoring system of induced seismicity has been created in Kuzbass. The strongest seismic activity in the area of mining factories brought under control. It is proved that in the Kuzbass induced seismicity greatly exceeds the natural seismicity.

Key words: induced seismicity, Kuzbass, seismological monitoring, network of seismic stations.

Территория Кузбасса всегда проявляла себя как район с редкими крупными землетрясениями и умеренной сейсмичностью, большая часть которой приурочена к горным обрамлениям Кузнецкой котловины. Региональная сеть сейсмических станций развивалась с ориентацией на природную сейсмичность, с размещением станций в основном в горном обрамлении в тихих условиях. Та-

ким образом, слабая сейсмичность в местах добычи полезных ископаемых оставалась необнаруженной, а более крупные события не выделялись в массе промышленных взрывов.

Доказательством существования наведенной сейсмичности в Кузбассе служат исследования локальными сетями станций, проводимые здесь с 2005 г. в районах активной добычи угля, таких как г. Осинники, г. Полысаево, шахт «Распадская», «Березовская» и др. Во всех отмеченных районах получены данные о протекании сейсмического процесса, вызванного техногенным воздействием на недра [1-7].

Создание системы мониторинга наведенной сейсмичности в Кузбассе включает в себя увеличение сети станций с передачей информации в реальном времени в центр обработки данных, а также развитие программно-аппаратного обеспечения для сбора, хранения и обработки данных.

Решение вопроса, связанного с развитием сети мониторинга с созданием десятков станций в Кузнецкой впадине, оснащенных современными сейсмографами и аппаратурой, ведется совместно с Администрацией Кемеровской области и Угольными компаниями.

Сейсмологическая сеть Кузбасса формируется как двухуровневая: первый уровень нацелен на обнаружение техногенных сейсмических активизаций; второй уровень – на конкретную активизированную зону.

В настоящий момент запуск в работу новых станций только начат (рис. 1), но система регистрации и обработки уже позволяет осуществлять мониторинг наведенной сейсмичности в Кузбассе на новом уровне. Преимуществом новой системы стала высокая скорость обработки и возможность быстро корректировать автоматическую обработку в ручном режиме.

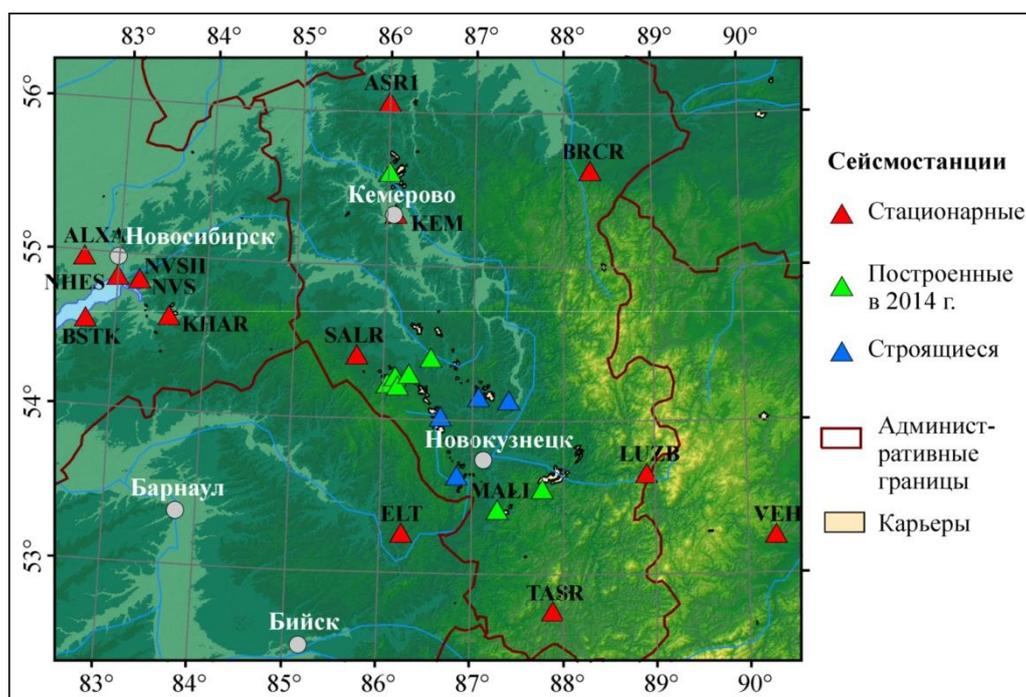


Рис. 1. Сеть сейсмологических станций в Кузбассе на конец 2014 г.

Благодаря развитию системы регистрации и обработки данных и расширению сети сейсмических станций в Алтае-Саянском регионе появилась реальная возможность быстро и качественно получать информацию о сейсмических событиях вплоть до энергий $ML=1-2$. Вместе с тем количество зарегистрированных событий увеличилось в разы по сравнению с предыдущими годами (до 2012 г.). Все это позволяет выявлять ряд локальных участков, где помимо промышленных взрывов фиксируется и сейсмический процесс. Приуроченность этого процесса к областям добычи полезных ископаемых позволяет отнести его к разряду наведенной сейсмичности.

На рис. 2 представлены эпицентры сейсмических событий, зарегистрированных в Кузбассе в 2014 г. и начале 2015 г. в зависимости от времени суток. Такое разделение имеет смысл, так как осуществление промышленных взрывов проводится только в светлое время суток, и в последние годы это правило строго соблюдается. Отдельно выделена активизация в районе разреза Бачатский, где в 2013 г. произошло крупное техногенное землетрясение [4].

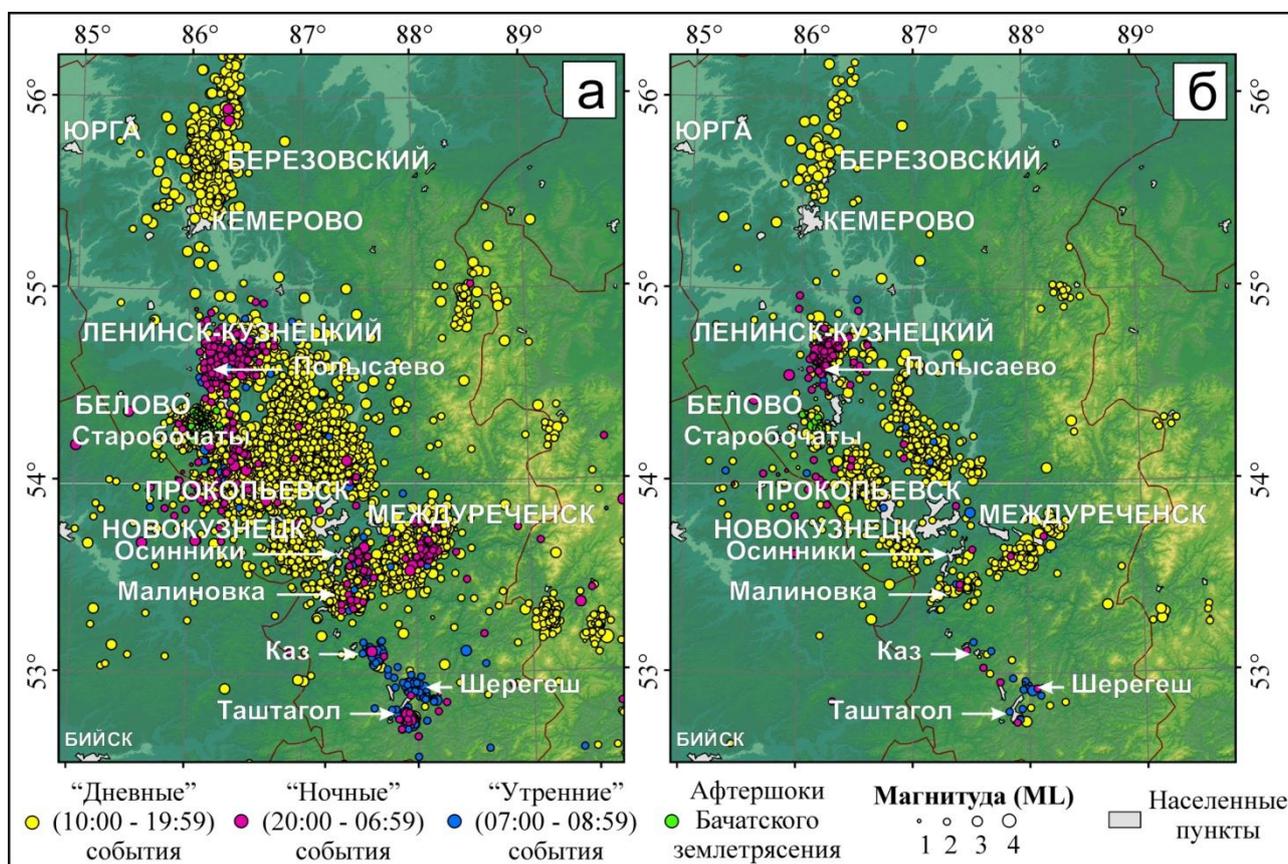


Рис. 2. Карта эпицентров сейсмических событий в Кузбассе в 2014 г. (а) и начале 2015 г. (б)

Как видно из рисунка, эпицентры «дневных» событий покрывают весь Кузбасс, а «ночные» – только локальные участки. Самое большое скопление «ночных» событий соответствует району г. Полысаево, г. Междуреченска,

пос. Малиновка и г. Осинники. Для большинства этих районов имеются подтверждения факта существования наведенной сейсмичности исследованиями с временными сетями сейсмостанций [1-7]. Обнаружены сейсмические активизации меньшего энергетического уровня, требующие подтверждения с использованием локальных сетей. Однозначно установлено, что наведенная сейсмичность в Кузбассе доминирует над природной сейсмичностью, и сейсмическая опасность в значительной степени должна корректироваться с учетом наведенной сейсмичности. В январе–феврале 2015 г. техногенная сейсмичность особо возросла в районе г. Полысаево (рис. 2б)

Районы рудников Таштагол, Шерегеш, Каз заполнены в основном «утренними» (7–8 ч) событиями (рис. 2а, б). Это подземные промышленные взрывы. Кроме того, отмечается небольшая по энергии круглосуточная фоновая сейсмичность.

В Кузбассе созданы основы системы мониторинга наведенной сейсмичности, которая позволяет обнаруживать возникновение и развитие техногенных сейсмических процессов, являющихся откликом геологической среды на процесс добычи полезных ископаемых. В целом сейсмологическая сеть Кузбасса формируется как сейсмологический полигон для изучения наведённой сейсмичности, вызванной сильным техногенным воздействием на земную кору, и для разработки методов прогноза техногенной сейсмической опасности в районах добычи полезных ископаемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / Еманов А. Ф. [и др.] // Физическая мезомеханика. - 2009. - Т. 12, № 1. - С. 37–43.
2. Наблюдения с временными сетями. Техногенная сейсмичность в Кузбассе / Еманов А. Ф. [и др.] // Землетрясения России в 2007 году. - Обнинск: ГС РАН, 2009. - С. 86–93.
3. Наблюдения временными сетями: Экспериментальные исследования триггерных эффектов в развитии наведенной сейсмичности в Кузбассе / Еманов А. Ф. [и др.] // Землетрясения России в 2009 году. - Обнинск: ГС РАН, 2011. - С.92–102.
4. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г., $M_L=6.1$) / Еманов А. Ф. [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2014. - № 2. - С.59–67.
5. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Опарин Н. В. [и др.]. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. - 449 с.
6. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин Н. В. [и др.]. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. - 632 с.
7. Эксперименты по обнаружению наведённой сейсмичности на севере Кузбасса / А.В. Фатеев, А.Ф. Еманов, В.Г. Подкорытова, Е.В. Лескова // Землетрясения России в 2010 году. - Обнинск: ГС РАН, 2012. - С.87–89.

© А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев, В. В. Ситников, Е. В. Лескова,
Д. Г. Корабельщиков, А. В. Дураченко, 2015

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ТЕ И ТМ-ПОЛЯРИЗАЦИИ, ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аркадий Владимирович Злобинский

«Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, 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, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, профессор кафедры геофизики НГУ

Электроразведку широко применяют для исследований хорошо проводящих объектов в непроводящей среде. При исследовании слабоконтрастных объектов электроразведочные методы испытывают трудности. Для устранения трудностей предлагается использовать ТМ-поляризацию электромагнитного поля. Наземный метод геоэлектрики, использующий ТМ-поляризацию, называется зондирование вертикальными токами – ЗВТ. В докладе обсуждаются новые возможности выделения слабоконтрастных объектов при использовании ЗВТ.

Ключевые слова: переходные процессы, электроразведка, поиски слабоконтрастных объектов, ЗВТ, ТМ-поляризация.

USING ELECTRICAL PROSPECTING TE&TM – POLARIZATION FOR TESTING WEAK CONTRAST OBJECTS

Arkadiy V. Zlobinskiy

«STC ZaVeT-GEO», 630102, Russia, Novosibirsk, 26/1 Voskhod St., of. 56, Ph. D., 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 Koptuyug Prospect, Ph. D., Principal Scientist Officer of the Laboratory of geoelectrics, tel. (913)912-43-36, e-mail: vecs@yandex.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Professor of geophysics

Electrical prospecting is used for testing of good conductive objects in non conductive medium. If difference of conductivity of objects and medium are little then electrical prospecting have problems. For removing problems we propose to use TM-polarization of electromagnetic field. Ground electrical method using TM-polarization of electromagnetic field is named vertical electric current sounding – VECS. We discuss new properties for testing weakly contrasting objects by VECS.

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

Физические предпосылки

Традиционно при работах методами импульсной индуктивной электроразведки в качестве источника электромагнитного поля используют незаземленную петлю. Незаземленная петля и круговой электрический диполь возбуждают совершенно разные системы электрических токов в изучаемой среде. Знаменитое «токовое кольцо» [10], возбуждаемое петлей, образуется только горизонтальными токами и характеризуется широким латеральным распространением. При использовании петли сигналы на дневной поверхности определяются всей вмещающей толщей.

Возможность регистрировать отклик только от локального трехмерного объекта предоставляет электромагнитное поле, возбуждаемое круговым электрическим диполем – КЭД [4, 6, 8]. 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 зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

При проведении работ методом ЗВТ применяются хорошие возможности восстановления параметров среды по измеренным магнитным данным. Эта методика используется на рудных месторождениях и при экологических работах [1, 2, 3].

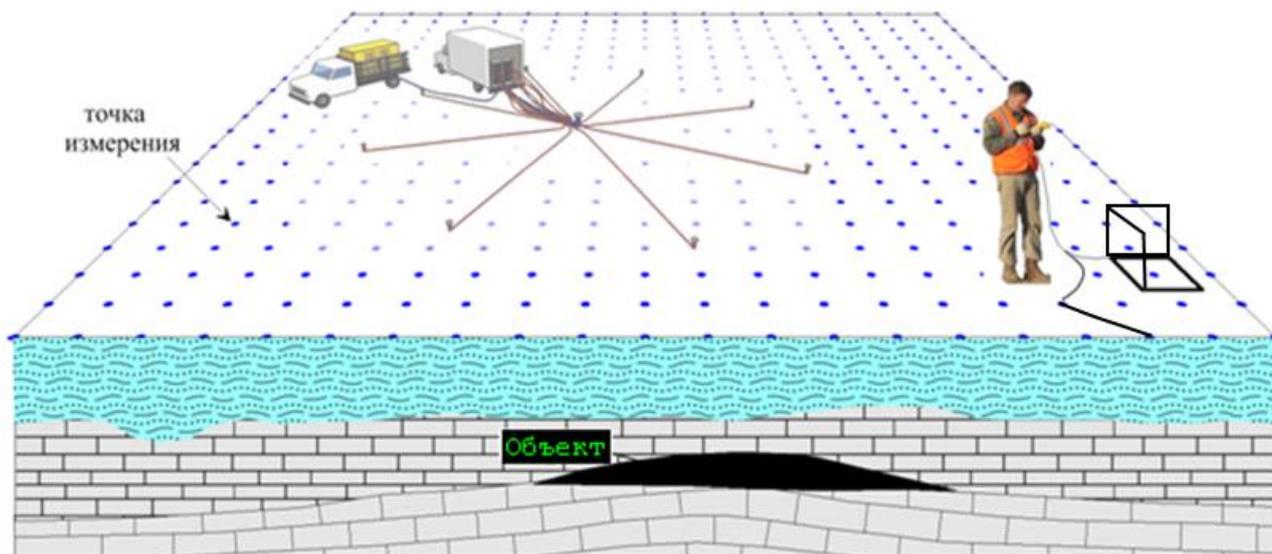


Рис. 1. Общая схема работ зондирования вертикальными токами.

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 заземлен-

ных электрических линий, сходящихся к центру под углом 45 градусов. Радиус (или длина каждой из 8 радиальных линий) был от 200 до 1750 м. Идея такого источника подразумевает, что геометрия его правильная, а токи в лучах выровнены.

Измерительный комплекс включает один или несколько компактных индукционных датчиков и измерителей, а также одну или несколько приемных линий и измерителей. Операторы с измерительным комплексом свободно перемещаются по площади исследований. Синхронизация между генераторной установкой и измерителями выполняется с использованием спутниковой синхронизации. 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.

Сравнение применимости классической электроразведки и ЗВТ на основе численного трехмерного моделирования

При изучении возможностей разных методов по исследованию слабоконтрастных объектов нас прежде всего интересует влияние на измеряемый сигнал небольшого изменения удельного сопротивления среды и локализация этого изменения. Одним из примеров такого рода задач по выявлению трехмерных слабоконтрастных объектов является выделение кимберлитовых трубок на территории республики Саха (Якутия), Россия.

Рассмотрим задачу по локализации кимберлитовой трубки с использованием классической электроразведки. Обычной задачей при поиске кимберлитовых трубок на территории республики Саха (Якутия) является выделение на фоне вмещающей среды с сопротивлением 70 Ом*м кимберлитовой трубки с удельным сопротивлением 40 Ом*м. Кимберлитовую трубку зададим в виде параллелепипеда с удельным сопротивлением 40 Ом*м, помещенную в полупространство с удельным сопротивлением 70 Ом*м. Размер объекта в плане – 200 на 200 м, глубина залегания кровли – 60 м, мощность объекта – 440 м.

Углы объекта имеют координаты X1=-930, Y1=-750; X2=-730, Y2=-750; X3=-730, Y3=-950; X4=-930, Y4=-950. Работы ведутся по прямоугольной сетке с шагом 50 м. Используется соосная установка МПП со стороной петли 50 м. Ток в петле – 10 А, эффективная площадь датчика – 2500 м², измерения – до 1 мкВ. Результаты расчетов для такой модели приведены на рис. 2, расчеты приведены на временах а) 216 мкс б) 508 мкс в) 1058 мкс. Мы использовали систему Подбор [7], в которой процедура трехмерного моделирования основана на Борновском приближении [5].

На рис. 2 приведены 3 цветовых шкалы для каждого времени – на 1-ой шкале значения ЭДС, на 2-ой шкале значения отклонения сигналов от референтного сигнала на данном времени, на 3-ей шкале значения кажущегося сопротивления.

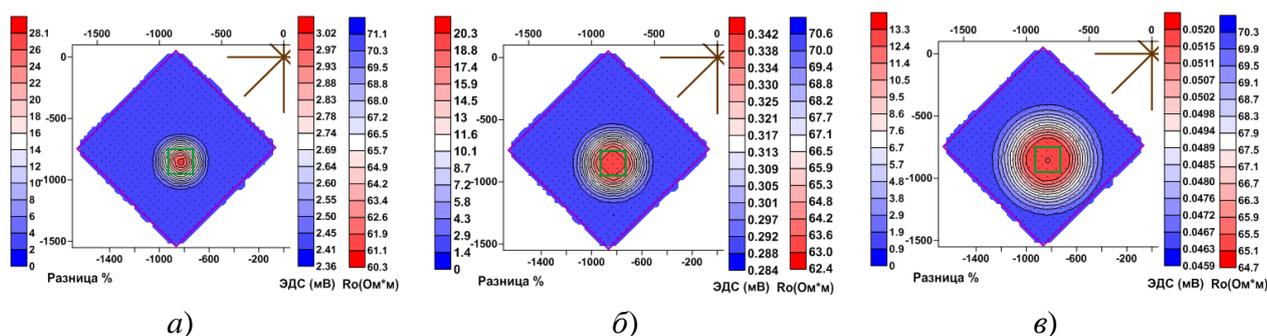


Рис. 2. Площадное распределение сигналов МПП времени:
а – 0.216 мс, *б* – 0.508 мс, *в* – 1.058 мс

Сигнал МПП превышает уровень в 1 мкВ до времени 5 мс. Наибольшее отклонение в сигнале от референтного сигнала зафиксировано над центром аномалии на времени 216 мкс, изменения отклонение в сигнале – 22 %, а наименьшее удельное сопротивление – 63 Ом*м. С увеличением времени количество точек, в которых фиксируется аномалия, растет, а величина аномального сигнала уменьшается. На времени 1058 мкс аномалия составляет менее 10 %, минимальное кажущееся сопротивление – 65 Ом*м. Все это хорошо объясняется тем фактом, что при увеличении времени в измеряемом сигнале содержится осредненная информация по все большей площади.

Для расчетов сигналов ЗВТ мы использовали программу «GeoPrep», в которой используется метод конечных элементов [9]. Модель среды полностью соответствует модели, приведенной выше. В качестве источника электромагнитного поля используем КЭД с центром в начале координат, радиусом 450 м и полным током в 25 Ампер. В качестве приемников используем датчики с площадью в 10000 м*м. На рис. 3 приведено распределение компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ на временах *а* – 1.021 мс, *б* – 2.041 мс, *в* – 4.06 мс. Сигналы превышают 1 мкВ до времени 10 мс. Сигналы хорошо визуализируют искомый объект на всех временах, соответствующих различным глубинам.

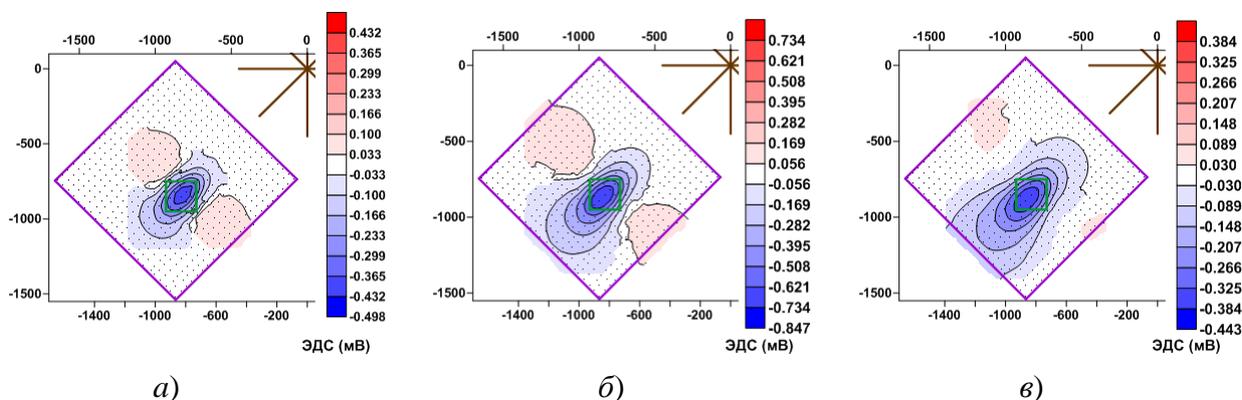


Рис. 3. Площадное (нормированное) распределение компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ сигналов ЗВТ. Времена *а* – 1.021 мс, *б* – 2.041 мс, *в* – 4.06 мс.

На рис. 4 приведены модель кимберлитовой трубки и изоповерхность нормированной на расстояние компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ сигналов ЗВТ.

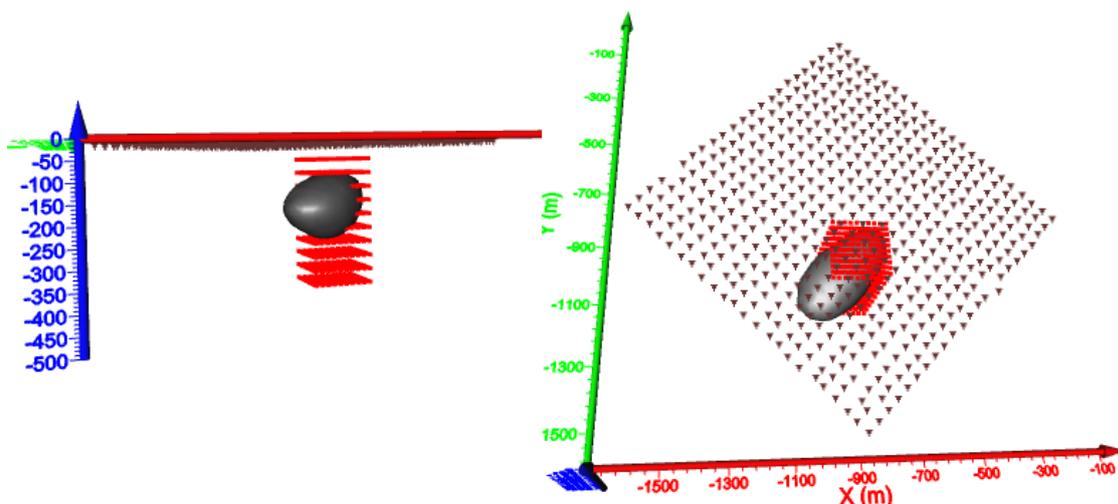


Рис. 4. Модель кимберлитовой трубки и изоповерхность нормированной на расстояние компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ сигналов ЗВТ

Выводы

1) Слабоконтрастные объекты не выделяются при возбуждении в среде электромагнитного поля ТЕ-поляризации. На практике сигнал от трубки будет проинтерпретирован как небольшое по площади понижение сопротивления вмещающей среды до 67–65 Ом*м (при сопротивлении трубки 40 Ом*м) в узком диапазоне глубин. Изменения в сигнале хотя и превышают 1 %, но соответствуют локальной флуктуации сопротивления референтной среды. Это объясняется тем, что в сигналах, фиксируемых при возбуждении среды петель, информация о среде усредняется по большой площади, причем чем больше времена исследований (глубины исследований), тем по большей площади усредняется информация, и влияние трехмерных объектов на сигнал уменьшается.

2) Несмотря на слабый контраст в удельном сопротивлении вмещающей среды и исследуемого объекта, при работе методом ЗВТ объект хорошо визуализируется. Кроме того, измерения разных компонент электромагнитного поля позволяют существенно уменьшить эквивалентность при полноценной трехмерной интерпретации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Злобинский А.В., Квашнин К.А., Могилатов В.С. Электроразведка методом ЗВТ. Рудные работы в Финляндии // Геофизика – 2010. - №6. - С. 53–57.
2. Злобинский А.В., Могилатов В.С. Электроразведка методом ЗВТ в рудной геофизике. // Геофизика. – 2014. - № 1. - С. 26–35.

3. Злобинский А.В., Могилатов В.С., Шишмарев Р.А. Использование метода зондирования вертикальными токами при изучении кимберлитовых трубок и рудных объектов // ГЕО-Сибирь-2014: тезисы докладов конф. - Новосибирск, 2014. - Т. 2 - С. 85–90.
4. Могилатов В.С. Круговой электрический диполь новый источник для электроразведки // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. – 1992. - №6. - С. 97–105.
5. Могилатов В.С. Вторичные источники и линеаризация в задачах геоэлектрики // Геология и геофизика. - 1999. - №7. - С. 1102–1108.
6. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирования вертикальными токами. : монография - Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. - 207 с.
7. Могилатов В.С. Захаркин А.К. Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». : монография. - Новосибирск, Изд. СО РАН, 2007 – 157 с.
8. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Свойства кругового электрического диполя как источника поля для электроразведки // Геология и Геофизика. - 2014. - Т. 55, N 11. – С. 1692–1700.
9. Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г., Рояк М. Э., Тригубович Г. М., Конечноэлементное моделирование электромагнитного поля для кругового электрического диполя в трехмерных средах // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2004 - № 1. - С. 114–129.
10. Nabighian M.N., Quasi-static transient response of a conducting half-space – An approximate representation // *Geophysics*. - 1979. - N 44. - 1700–1705.

© А. В. Злобинский, В. С. Могилатов, 2015

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ DS18B20

Сергей Алексеевич Казанцев

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

В докладе описывается методика дополнительной градуировки термометрических кос на основе цифровых датчиков DS18B20 с целью повышения точности измерения температуры.

Ключевые слова: датчики температуры, термостат, калибровка, разрешающая способность, поправки.

IMPROVING THE ACCURACY OF DIGITAL TEMPERATURE SENSORS DS18B20

Sergey A. Kazantsev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Research Scientist, tel. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

The report describes how the additional calibration of wire sensors based on digital temperature DS18B20 to improve the accuracy of temperature measurement.

Key words: digital temperature, thermostat, calibration, resolution, correction.

Научная и практическая важность температурного мониторинга в последнее десятилетие значительно выросла. Давно известна высокая информативность временных характеристик теплового поля Земли при решении задач современной геодинамики. Практический же интерес данные о температуре грунтов представляют при проектировании и строительстве оснований и фундаментов сооружений на многолетнемерзлых грунтах, находящихся в мерзлом состоянии.

Для целей высокоточного температурного мониторинга в ИНГГ СО РАН разработан и активно используется аппаратный комплекс для долгопериодных измерений и регистрации температуры. Одной из составных частей комплекса являются высокоточные многоканальные автономные регистраторы температуры. Как правило, они работают в комплексе с длинными геотермическими косами, располагаемыми в скважинах

В последнее время для монтажа термокос все большее распространение получают цифровые датчики фирмы Dallas Semiconductor DS18B20. Их достоинствами являются: широкая доступность; датчики сертифицированы в России как средство измерения; выходные температурные данные датчика калиброваны в градусах Цельсия; прибор использует исключительно 1-Wire протокол обмена. Это позволяет собирать датчики DS18B20 в косы, состоящие всего из трех проводов. Поскольку каждый прибор имеет уникальный 64-битовый код,

число датчиков, к которым можно обратиться на одной шине, фактически не ограничено.

В геотермических исследованиях применение DS18B20 ограничено их сравнительно низкой точностью градуировки производителем. Она устанавливается на уровне $0,5^{\circ}\text{C}$. Максимальная же разрешающая способность температурного преобразователя DS18B20 в 12-битном режиме составляет $0,0625^{\circ}\text{C}$ [1]. Такое разрешение можно использовать, применив дополнительную высокоточную калибровку приборов.

В температурном мониторинге скважин измеряемая температура меняется, как правило, незначительно, в подавляющем числе случаев это первые градусы. В таком диапазоне датчики DS18B20 имеют практически линейную характеристику. Поэтому достаточно определить корректировочные поправки в одной температурной точке. Такую градуировку можно провести в высокоточном жидкостном термостате [2]. На практике самой доступной температурной точкой является точка таяния льда. Тогда, имея термоизолированную емкость, можно отградуировать уже смонтированную температурную косу. К тому же датчики, имеющие уникальный код, должны быть однозначно привязаны в косе по глубинам. Эти задачи решаются специально созданной программой «Meridian». Работает программа следующим образом. Термокоса подключается к компьютеру через адаптер шины однопроводного интерфейса DS9490R. Адаптер USB-1-WIRE DS9490R служит основным элементом для создания микросети 1-wire и необходим для связи компьютера и датчиков, подключается в USB-разъем компьютера. На первом этапе программа «Meridian» распознаёт датчики, считывает их температуру и выстраивает в порядке возрастания их номерного кода (нижний левый угол рис. 1). На рис. 1 приведен пример с распознаванием 10 датчиков.

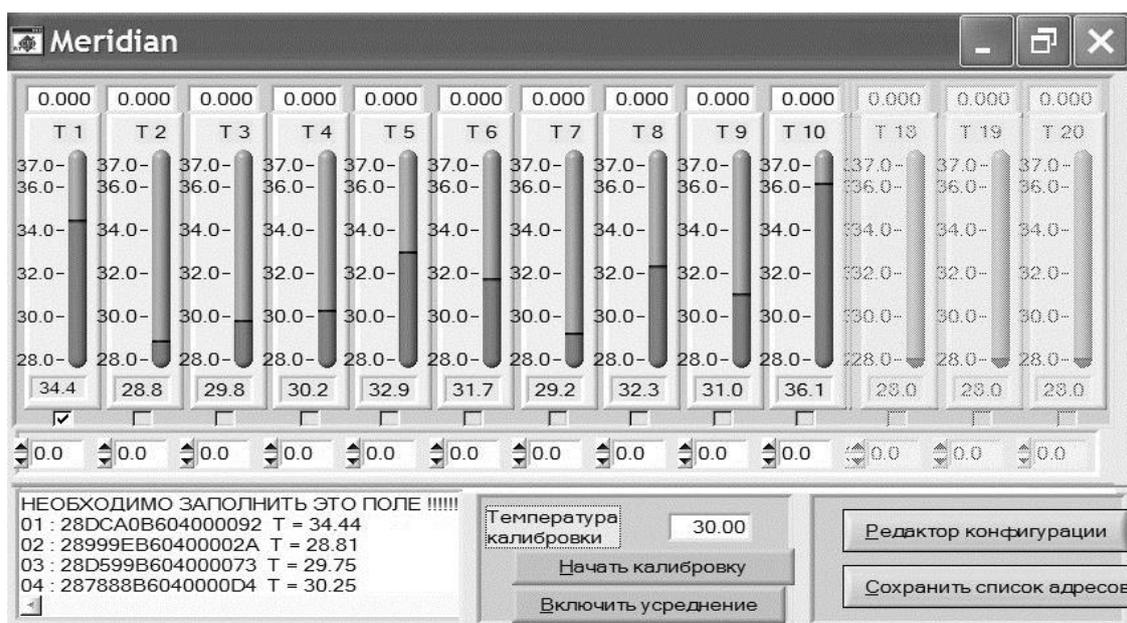


Рис. 1. Работает программа «Meridian»

Далее, прогревая поочередно датчики в косе, отмечаем их на экране, программа сортирует датчики по порядку расположения в косе. Затем вводим в соответствующее окно температуру, при которой производим вычисление поправки. После соответствующей команды программа начинает калибровку. Значение поправок усредняется, и их значения выводятся на экран. В завершении работы по команде программа «Meridian» записывает порядок датчиков в косе и поправки каждого из них в энергонезависимую память DS28EC20. Эта память является неотъемлемым компонентом, своего рода ярлыком каждой косы.

Таким образом, каждая из кос несет в себе и порядок расположения датчиков, и температурную поправку каждого из датчиков. Этим достигается полная взаимозаменяемость кос для Станций температурного мониторинга [3], а точность измерения температуры повышается по сравнению с декларированной почти в десять раз и совпадает с практической разрешающей способностью датчиков, и составляет $0,0625^{\circ}\text{C}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцев С. А. Датчики в геотермии, сравнительный анализ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 4. – С. 97–100.

2. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: материалы Междунар. конф. - Тюмень: Институт криосферы Земли СО РАН, 2008. - С. 236–239.

3. Казанцев С. А., Пермяков М. Е., Дучков А. Д. Устройство для оперативного температурного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 203–207.

© С. А. Казанцев, 2015

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СЛАБОСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ПОРОД

Сергей Алексеевич Казанцев

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

Ирина Игоревна Фадеева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. 8-953-763-95-28, e-mail: Step_by_day@mail.ru

В докладе приводится описание разработанного в институте двухзондового устройства для оперативного измерения температуропроводности и теплопроводности слабосцементированных пород. С помощью устройства проведены тестовые измерения температуропроводности льда.

Ключевые слова: игольчатый зонд, прибор для измерения температуропроводности и теплопроводности, лабораторный эксперимент.

DEVICE FOR FAST MEASUREMENT OF THERMAL DIFFUSIVITY OF LOOSE ROCK

Sergey A. Kazantsev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Research Scientist, tel. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

Irina I. Fadeeva

Chinackal Institute of Mining SB RAS, Russia, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt 54, Research Scientist, tel. 8-953-763-95-28, e-mail: Step_by_day@mail.ru

The description of the two-probe construction and performance of a device for measuring thermal properties using the line source method is given. The results of measurements of the thermal diffusivity of ice are given.

Key words: needle probe, thermal conductivity, thermal diffusivity.

Задача определения тепловых свойств разного рода сред (теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость) состоит, главным образом, в измерении двух параметров и расчете оставшегося неизвестного. Прямые измерения теплоемкости представляют собой довольно сложную и трудоемкую процедуру, а также исключают возможность определения параметра на месте (in situ). Теплопроводность и температуропроводность являются наиболее важными параметрами веществ и материалов, поскольку они описывают процесс переноса теплоты и скорость изменения температуры в них.

$$\chi = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (1)$$

где χ – температуропроводность, λ – теплопроводность, c_p – изобарная удельная теплоёмкость, ρ – плотность.

Теплофизические параметры связаны между собой соотношением (1). В ИНГГ СО РАН ранее был разработан аппаратный комплекс регистрации температуры и определения коэффициента теплопроводности среды [1]. Измеритель теплопроводности использует метод игольчатого зонда постоянной мощности [2]. Зонд представляет собой стальную трубку (диаметр 2 мм, длина 120 мм), внутри которой по всей длине размещен нагреватель (манганиновая проволока сопротивлением ~ 44 Ом), а в средней части зонда расположен температурный датчик (термистор ММТ-6 с сопротивлением ~ 10 кОм). На основе этого портативного измерителя теплопроводности было разработано устройство с двумя игольчатыми зондами (рис. 1) для измерения температуропроводности.

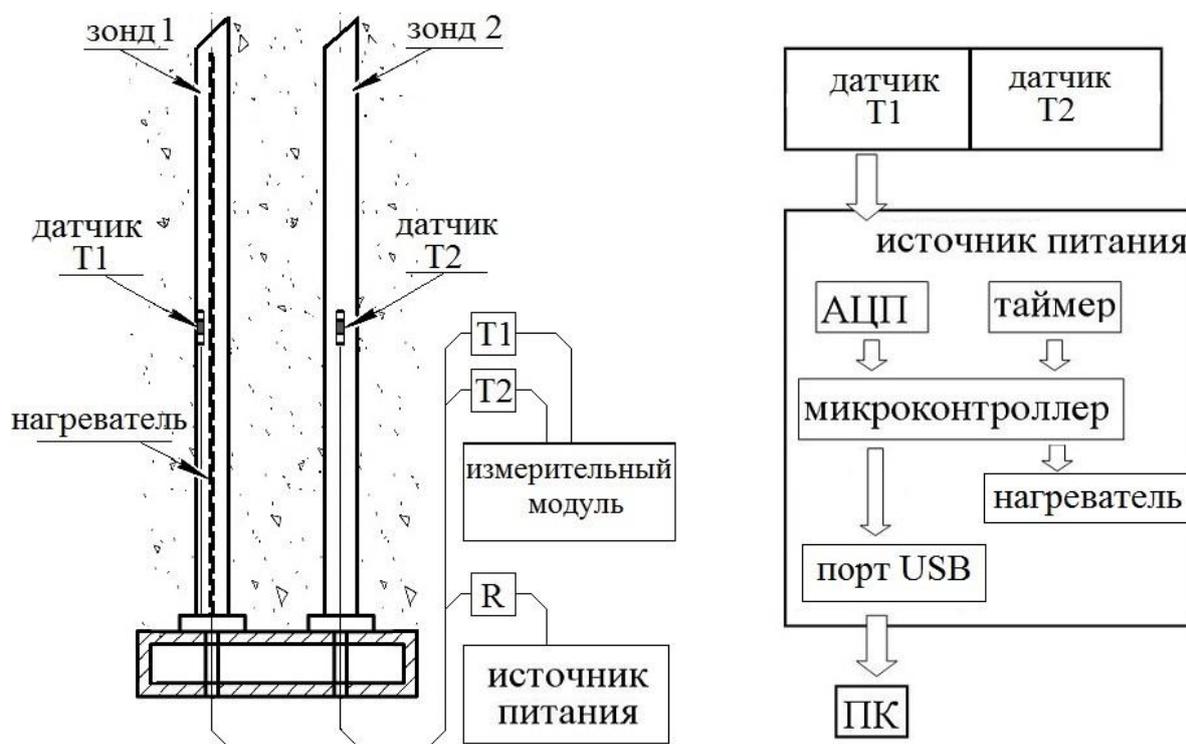


Рис. 1. Схема двухигольчатого зонда (слева);
блок-схема измерительного устройства (справа)

В одной трубке, как и ранее, размещались нагреватель и датчик температуры, в другой только температурный датчик. Датчики находятся в обеих трубках на одном уровне. Трубки двухигольчатого зонда отстоят друг от друга на 7 мм.

В основе метода измерения температуропроводности лежит теория распространения тепла от мгновенного линейного источника [3]. Измерения проводятся следующим образом. На нагреватель зонда 1 подается короткий, калиброванный импульс напряжения, фиксирующийся датчиком 1. Одновременно датчик 2 начинает запись изменения температуры. По этой записи можно определить время прихода максимума тепловой волны в точку, где расположен датчик 2. На рис. 2 представлены экспериментальные кривые, с помощью которых определялась температуропроводность льда ($1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). На врезке рисунка в другом масштабе приведен график изменения температуры игольчатого зонда 2.

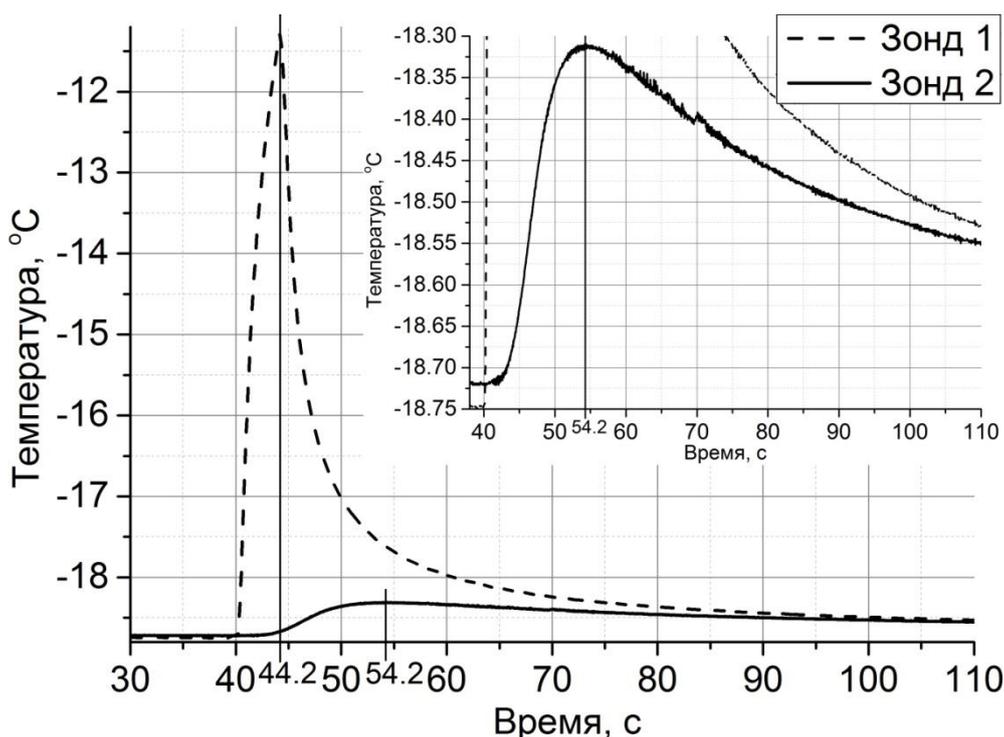


Рис. 2. Термограммы в эксперименте со льдом. Импульсный нагрев

Коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле:

$$\chi = \frac{r^2}{4 \cdot \tau_{\max}} \quad (2)$$

где r – расстояние между зондами, в долях метра (в нашей установке $r = 7$ мм); τ_{\max} – время прохождения максимума тепловой волны от зонда 1 к зонду 2, в секундах (для приведенной термограммы $\tau_{\max} = 10,0$ с).

Конструктивно устройство отличается от измерителя теплопроводности, описанного в [1], тем, что все функции управления и обработки информации переданы в компьютер. Выносной блок представляет собой два игольчатых зонда, сигналы с которых поступают на АЦП, преобразуются в цифровой код и

с помощью кабеля USB передаются на компьютер. Измерительное устройство собрано на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 со встроенным двухканальным АЦП. Процессор управляет работой АЦП, регулирует питание нагревателя и передает данные на компьютер. Блок схема устройства приведена на рисунке 1. Специализированная программа управления считывает поток данных с двух резистивных температурных датчиков, преобразует омический сигнал в градусы Цельсия, сохраняет данные в виде табличного файла и отображает процесс на графике. Форма и амплитуда сигнала, подаваемого на нагреватель (постоянный или импульсный, моменты его включения-выключения), задается по команде с компьютера.

Разработанное устройство выгодно отличается от измерителя теплопроводности тем, что значительно упрощен измерительный блок. Устройство совмещает функции измерения и теплопроводности, и температуропроводности. Все данные напрямую документируются в компьютере. К этому можно добавить, что характеристики датчиков зондов заносятся в компьютерную программу, что позволяет оперативно заменять зонды в случае выхода их из строя. В настоящее время ведутся работы по адаптации устройства для работы с планшетными компьютерами и смартфонами. Это позволит расширить возможности применения измерителя в полевых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: материалы Междунар. конф. - Тюмень: Институт криосферы Земли СО РАН, 2008. - С. 236–239.
2. R. Von Herzen, and A.E. Maxwell A.E. Journal of Geophysical Research. - 1959. - V. 1, No.10. - P. 1557–1563.
3. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964.

© С. А. Казанцев, И. И. Фадеева, 2015

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ ПО ИМПУЛЬСНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ НАМАГНИЧЕННОСТИ: ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Ярослав Константинович Камнев

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

Николай Олегович Кожевников

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

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)330-79-08, e-mail: AntonovEU@ipgg.sbras.ru

В статье обсуждается численный эксперимент по определению параметров логнормального распределения размеров суперпарамагнитных частиц по численно рассчитанным и искусственно зашумлённым переходным процессам релаксации их намагниченности.

Ключевые слова: переходные процессы, магнитная вязкость, суперпарамагнетизм.

ESTIMATING SUPERPARAMAGNETIC PARTICLE SIZE DISTRIBUTION FROM MAGNETIZATION IMPULSE RESPONSE: NUMERICAL EXPERIMENT

Yaroslav K. Kamnev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Ph. D., student, tel. (383)330-79-08, e-mail: KamnevYK@ipgg.sbras.ru

Nikolai O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Doctor of Science, Professor, General Researcher, tel. (383)333-28-16, e-mail: Kozhevnikov-NO@ipgg.sbras.ru

Evgenii U. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)330-79-08, e-mail: AntonovEU@ipgg.sbras.ru

The paper discusses numerical experiment aimed at evaluation of superparamagnetic particle size distribution using modeling impulse magnetization response with account for measuring system noise.

Key words: transient response, magnetic viscosity, superparamagnetism.

Магнитная вязкость, или магнитное последствие, является одним из фундаментальных свойств ферромагнитных минералов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков (намагниченности и магнитной проницаемости) по отношению к изменениям напряжённости внешнего магнитного поля. Магнитная вязкость имеет различную природу. Например, мельчайшие однодоменные ферромагнитные частицы могут менять направление своего магнитного момента под действием тепловой энергии в отсутствие внешнего магнитного поля. Это позволяет намагничиваться ансамблю однодоменных частиц под действием полей, много меньших критических. После выключения магнитного поля под действием тепловых флуктуаций намагниченность релаксирует. Намагничивание и релаксация намагниченности в таком случае описывается экспоненциальной зависимостью $J = J_0 \exp(-t/\tau)$. Здесь J_0 – намагниченность в момент выключения внешнего поля, t – время после выключения поля, τ – постоянная времени релаксации намагниченности: $\tau = \tau_0 \exp(KV/kT)$, где K – постоянная магнитной анизотропии, V – объем частицы, T – температура, k – постоянная Больцмана, $\tau_0 \approx 10^{-9}$ с. В геологических средах присутствуют однодоменные частицы разного размера, поэтому становление и спад намагниченности характеризуются спектром времен релаксации [1].

Несмотря на то, что магнитная вязкость отражает особенности генезиса и строения природных и антропогенных сред и объектов, в большинстве случаев проявление магнитного последствия рассматривают как геологическую помеху. В палеомагнитных исследованиях присутствие вязкой намагниченности препятствует определению первичной естественной остаточной намагниченности, поэтому измерение магнитной вязкости образцов является важной составляющей исследований. Магнитная вязкость оказывает влияние на ЭДС, измеряемую в методе переходных процессов (МПП), причём доля сигнала от релаксации намагниченности может быть преобладающей и превышать вклад в сигнал отклик от вихревых токов. По мере совершенствования аппаратуры для МПП магнитная вязкость проявляется всё чаще, и её уже невозможно игнорировать.

Для исследования магнитной вязкости во временной области была разработана лабораторная установка на основе полевой аппаратуры для зондирования методом переходных процессов FastSnap. Установка позволяет измерять переходные процессы образцов во временном диапазоне от 100 мкс до 0.5 с; динамический диапазон – от 1 В до десятых долей мкВ (120 дБ) [2].

Распределение размеров суперпарамагнитных частиц в природных средах обычно описывается функцией Фрелиха [3]. При таком распределении импульсная характеристика намагниченности имеет вид: $a \cdot t^{-1}$. На самом деле переходные процессы, измеренные лабораторной установкой, аппроксимируются степенной функцией вида $a \cdot t^{-b}$, где показатель степени b близок к единице, но не равен ей. Поэтому такая функция распределения не подходит для описания переходных процессов релаксации намагниченности.

При выборе модели, которая адекватно описывает переходные процессы, мы использовали опубликованные данные магнитной гранулометрии [4], согласно которым распределение объемов частиц в геологических средах близко к логнормальному:

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

здесь V_m – математическое ожидание, σ – стандартное отклонение логарифмов объемов V . Для проверки применимости такой функции распределения было проведено математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности при различных параметрах распределения. Чтобы результаты моделирования не были «привязаны» к какой-то конкретной измерительной системе и/или образцу, т.е. носили по возможности общий характер, рассчитывалась производная по времени вязкой остаточной намагниченности $J_r(t)$ ансамбля однодоменных частиц с логнормальным распределением объемов. $J_r(t)$ вычислялось по формуле [5]:

$$J_r(t) = \frac{\int_0^\infty J_0 \exp[-t/\tau(V)] VP(V) dV}{\int_0^\infty VP(V) dV}, \quad \tau(V) = \tau_0 \exp \left(\frac{\mu_0 H_k J_s V}{kT} \right),$$

где J_0 – начальная намагниченность (т.е. в момент, когда выключается намагничивающее поле). При расчете характерного времени релаксации частиц τ использовались параметры магнетита: $\mu_0 H_k = 25$ мТ, $J_s = 478$ кА/м [6] при комнатной температуре ($T = 293$ °К). При расчете $J_r(t)$ нормировалась на суммарный объем частиц (интеграл в знаменателе), начальная намагниченность J_0 принималась равной 1; значения ЭДС при этом «получались» в условных единицах. Полученный таким образом модельные переходные процессы аппроксимировались степенной функцией $U \propto at^{-b}$, с показателем степени b близким к единице. Параметры a и b зависели от параметров распределения частиц σ и V_m . Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что логнормальное распределение частиц может использоваться для моделирования импульсных характеристик вязкой намагниченности [7].

Используя модель логнормального распределения частиц для описания переходных процессов магнитной вязкости, мы попытались восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. В этом случае параметры подбирались почти однозначно. При измерении импульсных характеристик намагниченности погрешность примерно 1–5 % в зависимости от количества суперпарамагнитных частиц в образце. Для оценки возможности восстановления параметров распределения по зашумлённым переходным процессам был проведён численный эксперимент. На рассчитанный модельный переходный процесс с параметрами $\sigma = 1$ и $V_m = 2,4 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ (диаметр частицы среднего объема $d_m = 20 \text{ нм}$) был наложен нормальный шум со среднеквадра-

тичным отклонением $\sigma = 3 \%$. При определении параметров минимизировалась целевая функция:

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

где $u(t)$ – искомая функция, а $v(t)$ – функция, рассчитанная при заданных параметрах σ и V_m . Целевая функция реагирует только на форму переходного процесса, а не на амплитуду, зависящую от количества магнитных частиц.

На рис. 1 представлена карта целевой функции, где просматривается область минимума, в которую «падают» параметры исходной модели.

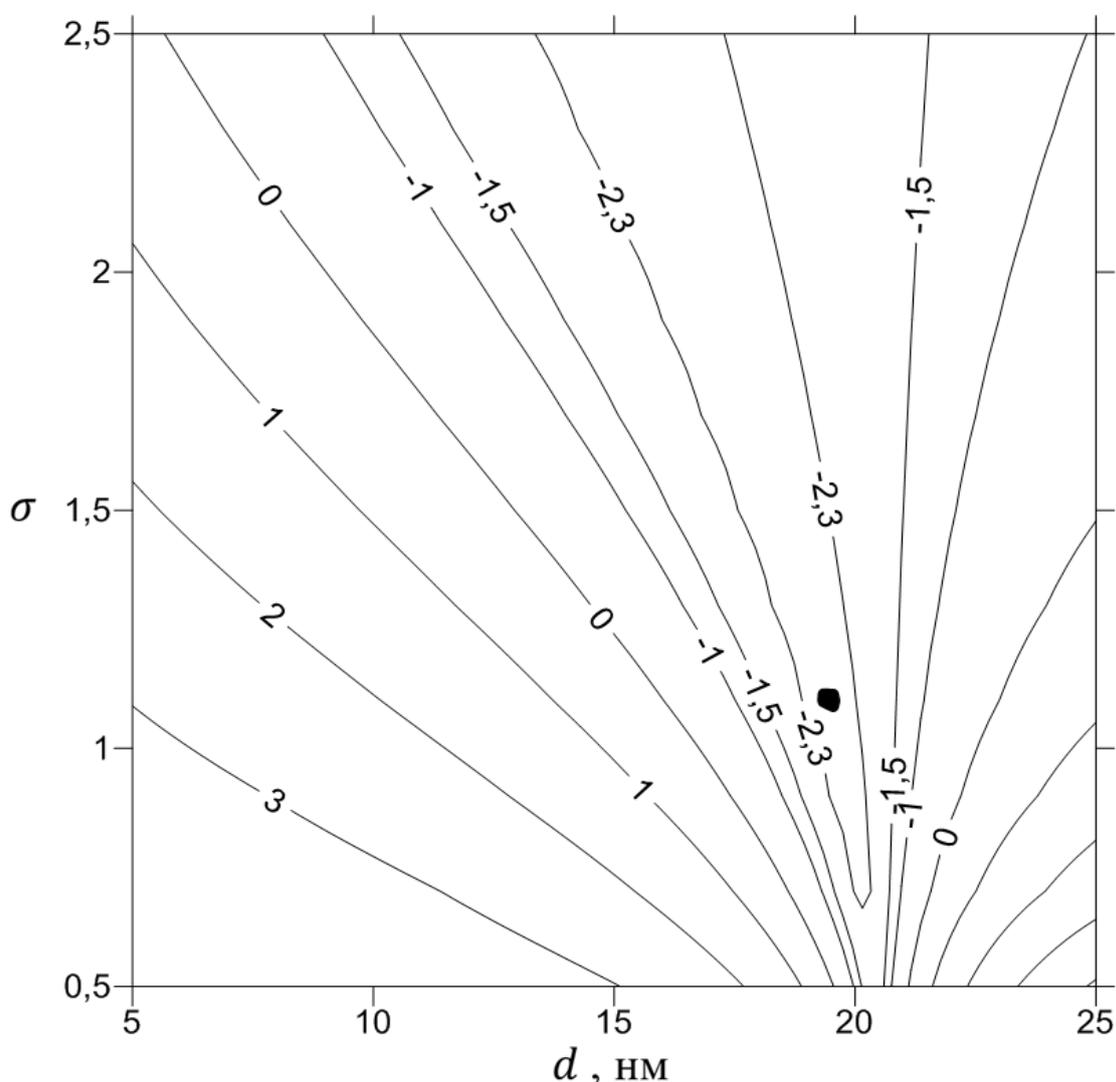


Рис. 1. Карта целевой функции в координатах σ (стандартное отклонение логарифмов объёмов) и d (диаметр частицы среднего объёма). Значения изолиний приведены в логарифмах от значений целевой функции

Решением считаются параметры, при которых целевая функция минимальна. Из-за случайного шума найденные таким образом параметры распределения отличаются от истинных. Численный эксперимент проводился при различных параметрах функции распределения и при различных шумах. В результате численного моделирования было установлено, что погрешность определения параметров σ и d зависит не только от уровня шумов, но и от параметров распределения. Целевая функция не всегда имеет минимум, и иногда решение найти не удаётся. В подобных случаях для оценки параметров распределения необходима дополнительная информация.

Численный эксперимент показал, что, исследуя с помощью лабораторной индукционной установки импульсную характеристику вязкой намагниченности, в принципе, можно оценивать параметры логнормального распределения размеров ультрадисперсных магнитных частиц. Отличие распределения от логнормального затрудняет решение обратной задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Néel, L., Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites, Ann. Géophys. - 1949. - 5. - P. 99–136.

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

3. Fannin P.C. and Charles S.W. On the influence of distribution functions on the after-effect function of ferrofluids // J. Phys. D. Appl. Phys. - 1995. - V. 28. P. 239–242.

4. Worm, H.-U. Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry // Geophys. Res. Lett. - 1999. - V. 26, N 16. - P. 2557–2560. - doi:10.1029/1999GL008360.

5. Wang, X., R. Løvlie, X. Zhao, Z. Yang, F. Jiang, and S. Wang. Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism // Geochem. Geophys. Geosyst. - 2010. - 11. - Q10008. - doi:10.1029/2010GC003194. ISSN 1525–2027.

6. Dunlop, D.J., and Ö.Özdemir. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. - Cambridge University Press, New York, London and Cambridge. - 1997. - 573 p.

7. Камнев Я. К., Кожевников Н. О., Стефаненко С. М. Первые результаты математического моделирования индукционных переходных характеристик магнитовязких геологических сред // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 101–105.

© Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, 2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ВСП

Иван Андреевич Карпов

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, тел. (952)925-70-97, e-mail: ivkarpov7@gmail.com

Сергей Борисович Горшкालёв

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, заведующий лабораторией многоволновой сейсморазведки, тел. (383)330-77-55, e-mail: GorskalevSB@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Михайлович Вишневецкий

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории численного моделирования геофизических полей, тел. (383)333-00-54, e-mail: VishnevskyDM@ipgg.sbras.ru

В работе представлены результаты обработки синтетических данных ВСП в модели с неоднородными азимутально-анизотропными слоями. С помощью поляризационного анализа методом псевдповоротов было определено переменное направление трещиноватости в исследуемом анизотропном слое.

Ключевые слова: многоволновая сейсморазведка, анизотропия, поляризация.

DETERMINATION OF VARYING FRACTURING DIRECTION WITHIN RESERVOIR ON THE BASIS OF VSP DATA

Ivan A. Karpov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogov St., MSc student, tel. (952)925-70-97, e-mail: ivkarpov7@gmail.com

Sergei B. Gorshkalev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory of Multi-wave seismic exploration, tel. (383)330-77-55, e-mail: GorshkalevSB@ipgg.sbras.ru

Dmitriy M. Vishnevskiy

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Scientist in the Laboratory of Numerical modelling of geophysical fields, tel.: +7 (383) 333-00-54, e-mail: VishnevskyDM@ipgg.sbras.ru

This article presents the results of processing of synthetic VSP data acquired in model comprising two inhomogeneous azimuthally anisotropic layers. Using the pseudo-rotation method of polarization analysis the varying fracturing direction in one of the anisotropic strata was assessed.

Key words: multicomponent seismic exploration, anisotropy, wave polarizations.

Юрубчено-Тохомская зона нефтегазонакопления (ЮТЗ) – месторождение на юге Сибирской платформы, приуроченное к эрозионной поверхности рифейских отложений, представленных карбонатными породами, фильтрационно-ёмкостные свойства которых определяются кавернозно-трещинной пористостью. Для ЮТЗ характерно латеральное изменение направления трещиноватости. Таким образом, актуальна задача выявления геофизическими методами вариации этого направления на площади.

Моделирование волновых полей

Для изучения возможности решения данной задачи методами сейсморазведки в ИНГГ СО РАН была построена трехмерная модель. За основу была взята горизонтально-слоистая скоростная модель ЮТЗ с двумя трансверсально-изотропными слоями с горизонтальной осью симметрии бесконечного порядка (НТІ). Эти слои имитируют пласты с направлением трещиноватости, перпендикулярным оси симметрии бесконечного порядка. Рифейские карбонаты соответствуют интервалу глубин 2300–2760 м (табл. 1).

Таблица 1

Упругие параметры модели

Глубина подошвы, м	V_P , м/с	V_S , м/с	ρ , т/м ³	K_P	K_{SV}	K_{SH}
170	2000	900	2.10	1.13	1.07	1.13
470	3600	1700	2.40			
870	5600	3100	2.65			
1070	6500	3500	2.75			
1320	4800	2700	2.50			
1600	6100	3200	2.70			
2100	5250	2850	2.60			
2220	6300	3400	2.75			
2300	5300	2800	2.60			
2760	6900	3400	2.80	1.1	1.05	1.1
∞	3700	1500	2.40			

Направление оси симметрии бесконечного порядка в анизотропных слоях изменялось в зависимости от X-координаты по закону $\varphi = 45 \pm (15 + X/50)$, где «+» соответствует нижнему слою, «-» – верхнему. φ – угол от оси X к оси Y в градусах.

По конечно-разностной схеме Лебедева [3] моделировалось полное волновое поле с источниками типа вертикальной силы в координатах $X = 0$ м, $Y = \pm 900$ м с регистрацией трехкомпонентных данных в вертикальной скважине $X = 900$ м, $Y = 0$ м (рис. 1) в интервале глубин 0–2850 м с шагом 10 м. Компоненты приема совпадают с глобальной системой координат.

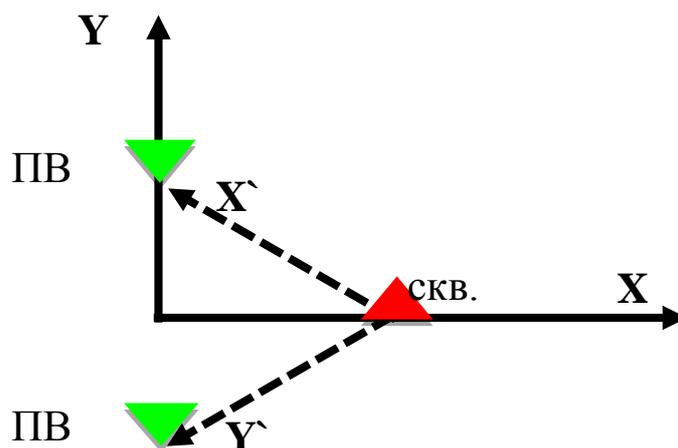


Рис. 1. Схема расположения пунктов возбуждения (ПВ) и скважины. XY – глобальная система координат. X'Y' – система координат, связанная с направлениями на ПВ

Обработка данных

Восходящие обменные волны, образовавшиеся на подошве рифейского коллектора, обеспечивают наибольшую область освещения рифейских карбонатов по сравнению с нисходящими волнами. Задачей обработки является определение векторов смещения образовавшихся квазипоперечных волн, на основании которого прогнозируется направление трещиноватости рифейского коллектора.

Чтобы избавиться от интерференции анализируемого сигнала с другими типами волн, проведено параметрическое разделение волновых полей, в результате которого удалось выделить поле восходящих поперечных волн (рис. 2).

Исследование проводилось методом псевдovращений [2, 4], в котором два источника продольных волн, вынесенных в ортогональных направлениях, используются для расчета синтетического воздействия на границу в любом направлении. Основанием для выбора метода стала его помехоустойчивость: когда азимут источника близок к плоскостям симметрии среды, одна из квазипоперечных волн обладает незначительной интенсивностью, что приводит к несостоятельности методов, использующих один источник [1].

Четырехкомпонентная матрица данных для i -го отсчета по времени:

$$A_i = \begin{pmatrix} X'x'_i & X'y'_i \\ Y'x'_i & Y'y'_i \end{pmatrix},$$

где $X'x'_i$, $X'y'_i$, $Y'x'_i$ и $Y'y'_i$ – амплитуды сигнала на соответствующих компонентах (рис. 1). Большими символами обозначены направления на источники, а малыми – направление приемников. Вращаем матрицу A_i как $A_i' = R \cdot A_i \cdot R^T$, где $R = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$, а φ – направление синтетического воздействия.

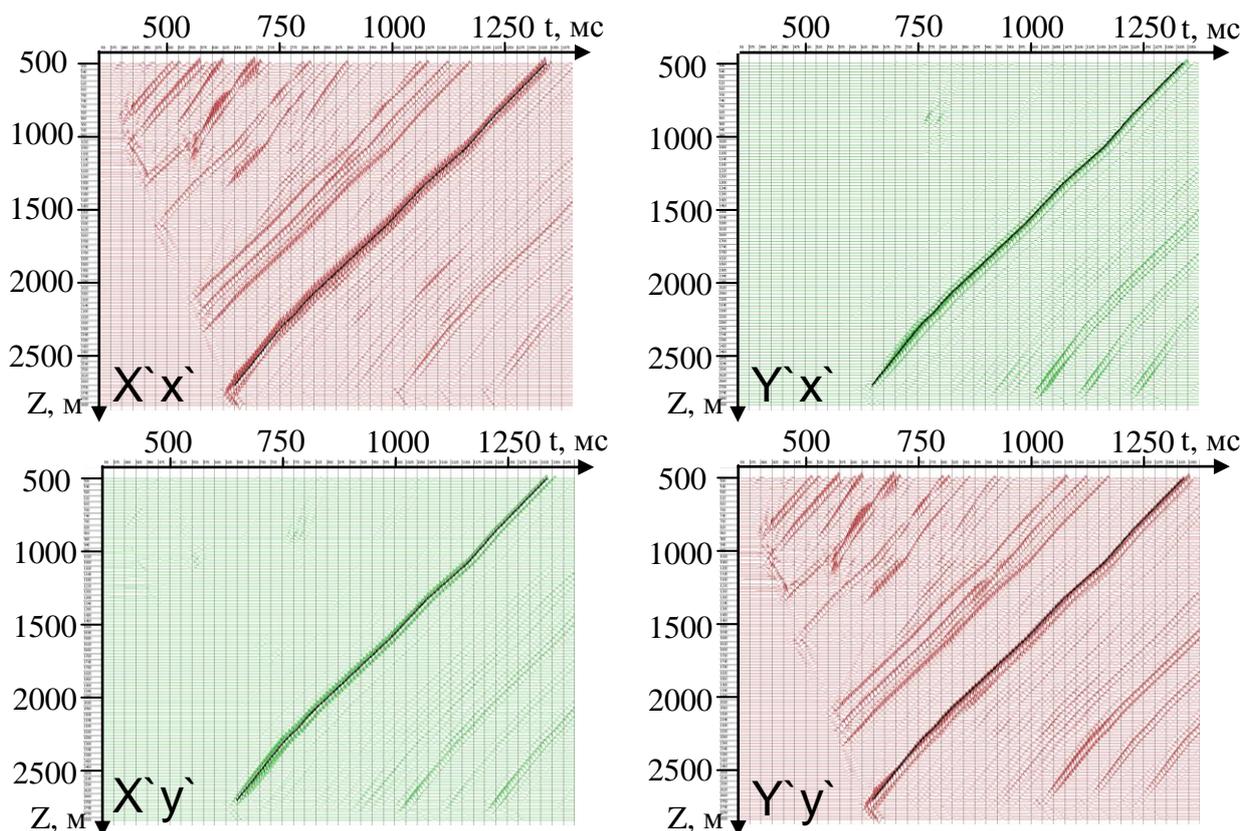


Рис. 2. Результаты параметрического разделения волновых полей – восходящие поперечные волны

В верхней части рис. 3 изображена четырехкомпонентная сейсмограмма, соответствующая матрице A , а в нижней – азимутальные сейсмограммы, представляющие зависимость компонент A'_{11} и A'_{12} матрицы A' от азимута синтетического воздействия. Компонента A'_{11} параллельна воздействию, A'_{12} ортогональна ему.

Матрица энергий компонент матрицы A' :

$$E'_{kl} = \sum_i (A'_i)_{kl}^2$$

Минимизируя недиагональные компоненты E' , находим направления горизонтальных проекций векторов смещений волн S_1 и S_2 , распространяющихся от границы как квазипоперечные (рис. 3).

Очевидно существование зависимости между глубиной регистрации и удалением от скважины точки обмена: чем выше приемник, тем дальше от скважины происходит отражение от подошвы неоднородного анизотропного слоя, и поперечные волны пересекают анизотропный слой на разных удалениях. Это приводит к изменению поляризации квазипоперечных волн в зависимости от глубины регистрации. Согласно лучевой схеме, в скоростной модели ЮТЗ при

выносе ПВ 1270 м область освещения рифейского коллектора отраженными от его подошвы обменными волнами ограничена 430 м.

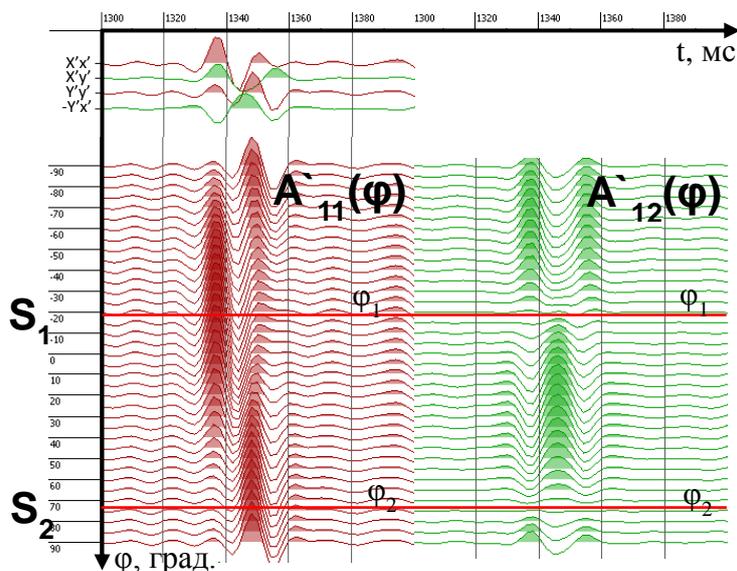


Рис. 3. Четырехкомпонентная сейсмограмма (сверху) и азимутальные сейсмограммы A_{11}' и A_{12}' для $Z = 500$ м. Линии ϕ_1 и ϕ_2 – направления горизонтальной проекции поляризации квазипоперечных волн

На рис. 4 представлены результаты поляризационного анализа методом псевдовращений. Пунктирные линии – модельные параметры, где нижняя показывает направление оси симметрии O_∞ в точке обмена, верхняя – направление оси симметрии O_∞ в точке пересечения лучом кровли слоя рифейских карбонатов (и в координате скважины при $Z > 2300$ м).

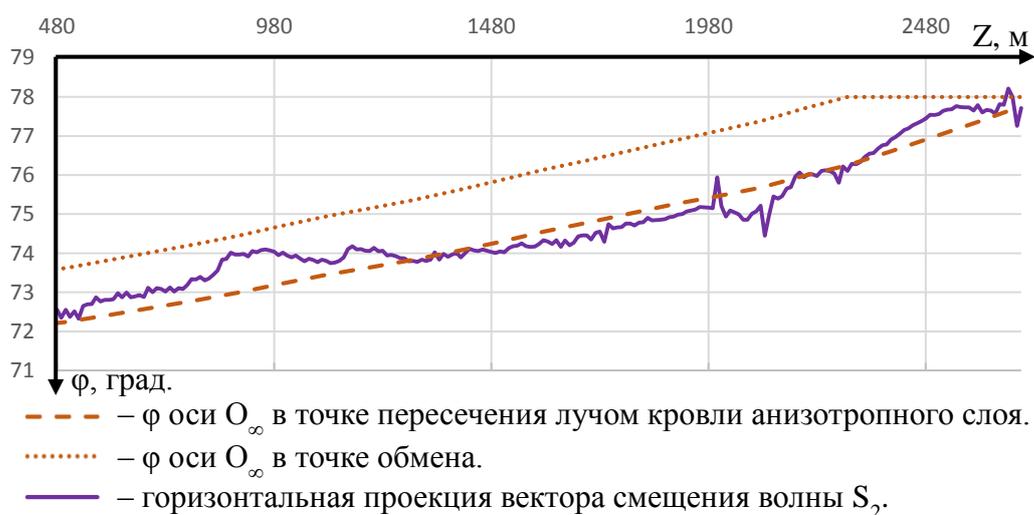


Рис. 4. Поляризация квазипоперечных волн, определенная по методу псевдовращений, в сравнении с параметрами модели

Результаты поляризационного анализа характеризуются стабильностью и положительным трендом, описывающим изменение направления трещиноватости в рифейском коллекторе. При субвертикальном распространении вектор смещения быстрой квазипоперечной волны параллелен направлению трещиноватости. Видно хорошее совпадение направления трещиноватости, определенного по минимизации $E'_{12} + E'_{21}$, с направлением трещиноватости в модели.

Заключение

Была проведена обработка данных по модели, содержащей НТТ-слои с переменным по латерали направлением оси симметрии бесконечного порядка. Показана принципиальная возможность, определения изменений направления трещиноватости рифейских карбонатов, которая позволяет получать достоверные результаты до удаления 430 м от скважины, при выносе ПВ 1270 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оболенцева И.Р., Горшкалев С.Б. Алгоритм разделения квазипоперечных волн в анизотропных средах // Физика Земли. - 1986. - № 2. - С. 101–105.
2. Gorshkalev S.B., Karsten W.V., Lebedev K.A., Trigubov A.V., Volkov G.V. Polarization processing of PS waves for estimation of anisotropy in fractured reservoirs, the Yurubchen-Tokhomo petroleum province: testing new algorithm // Russian geology and geophysics. - 2004. - V.45, N6. - P. 716–728.
3. Lisitsa V.V., Vishnevsky D.M. Lebedev type scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity // Geophysical Prospecting. - 2010. - V.58. - P. 619–635.
4. MacBeth C. Shear wave analysis for azimuthal anisotropy using pseudo rotation of marine VSP // Extended Abstracts 58-th EAGE Meeting. - 1996. - V.2 - C022.

© И. А. Карпов, С. Б. Горшкалёв, Д. М. Вишневский, 2015

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ДЛЯ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПО ЛЕВОМУ БЕРЕГУ АНГАРДАМСКОЙ ПРОТОКИ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ

Евгений Валерьевич Карташов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер лаборатории геохимии нефти и газа, тел. (383)330-26-76, e-mail: KartashovEV@ipgg.sbras.ru

Владимир Аркадьевич Маринов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории палеонтологии и стратиграфии мезозоя и кайнозоя, тел. (383)333-23-06, e-mail: MarinovVA@ipgg.sbras.ru

Александр Николаевич Фомин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа, тел. (383)330-93-26, e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

В статье рассмотрены аппаратура и методика для геохимической съемки с использованием пассивных концентраторов на ароматические углеводороды С6-С8. Описание полевых экспериментов. Результаты.

Ключевые слова: пассивные концентраторы, геохимическая съемка, поиск залежей нефти и газа.

EXPERIENCE OF USING THE PASSIVE CONCENTRATORS FOR GEOCHEMICAL SURVEY ON THE ANGARDAM FLOW LEFT BANK OF THE LENA RIVER DELTA

Eugene V. Kartashov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Chief Engineer of the Laboratory of Petroleum geochemistry, tel. (383)330-26-76, e-mail: KartashovEV@ipgg.sbras.ru

Vladimir A. Marinov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher of the Laboratory of Mesozoic and cenozoic paleontology and stratigraphy, tel. (383)333-23-06, e-mail: MarinovVA@ipgg.sbras.ru

Alexander N. Fomin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Head of the Laboratory of oil and gas geochemistry, tel. (383)330-93-26, e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

In article is considered equipment and method for geochemical surveys using passive concentrators for C6-C8. Description of field experiments. Results.

Key words: passive concentrators, geochemical survey, searching for oil fields.

Впервые газовая съемка была предложена в 1930-31 гг в СССР В. А. Соколовым как метод поисков залежей нефти и газа на основе определения следов мигрирующих из глубин углеводородных газов в почвенном воздухе. Традиционная съемка осуществляется методом отбора проб снега, почвы, грунта, илов и других естественных концентраторов с последующим извлечением из них углеводородов методами термовакуумной, механической и химической дегазации и хроматографическим определением их состава.

Аппаратура и методика геохимической съемки по ароматическим углеводородам $C_6 - C_8$ с применением искусственных сорбентов были разработаны в ИНГГ СО РАН [1]. В этом случае пассивные концентраторы (ПК) представляют собой стеклянные или металлические трубки с сорбентом на внутренней поверхности. Длина трубок – 40–60 мм, наружный диаметр – 6 мм, внутренний диаметр – 4 мм. Концентратор помещается в индивидуальный чистый контейнер емкостью 15 мл и закрывается крышкой с непроницаемыми вкладышами. При проведении съемки концентраторы помещаются на глубину 0,5–1,5 м на 1–2 суток, затем вынимаются и доставляются в полевой лагерь, где содержимое концентраторов анализируется на полевом хроматографе ЭХО-ФИД (рис. 1), в результате составляется электронный журнал с результатами анализа углеводородов в каждой точке профиля.



Рис.1. Портативный хроматограф ЭХО-ФИД

Для очистки ПК перед их установкой в контейнер используется специальное портативное десорбирующее устройство – десорбер. Для проведения пробоотбора (патент РФ №81344) на ПК контейнеры с ПК закрепляются в пробоотборной емкости. Емкость с контейнерами устанавливается в шурф диаметром 12 см на глубину 50 см. Для пробоотбора непроницаемый вкладыш крышки контейнера заменяют на тефлоновый пористый фильтр, который предохраняет концентратор от попадания в контейнер воды, земли и грязи. При геохимиче-

ской съемке контейнеры с ПК помещаются в грунт на время экспозиции. После извлечения контейнеров они герметично закрываются. Концентраторы в закрытых контейнерах доставляются к анализатору, где анализируется их содержание в полевых условиях. На профиле ПК закладываются в запланированных точках с заданными координатами. Выход на точки осуществляется с использованием GPS-навигатора. Погрешность определения места положения точек на местности не превышает, как правило, 4 м.

Геохимическая съемка с применением пассивных концентраторов была проведена в дельтовой части р. Лена на абразивной террасе к востоку от пос. Ыстаннах-Хочо вдоль прибрежного кряжа, известного как горы Ангардам-Таса. Горы Ангардам-Таса протягиваются по левому берегу Ангардамской протоки дельты р. Лена и являются выходом на дневную поверхность складки предплатформенного прогиба, окаймляющего северную часть Сибирской платформы. В разрезе мезозоя, выполняющего прогиб, присутствуют высокобитуминозные, предположительно нефтематеринские породы (чекановская свита, триас). Съемка охватила участок побережья длиной более 20 км. Всего было выполнено 300 замеров концентраций углеводородов. Закладка концентраторов производилась с шагом 250 м.

Для того чтобы определить пороговые границы (фон, превышение фона и аномалия) изменений концентраций, использовали общепринятую методику определения этих границ по распределению на рис. 2 количества точек от условной концентрации, выражающейся натуральным логарифмом относительной концентрации, нормированной на множитель 10^{-12} .

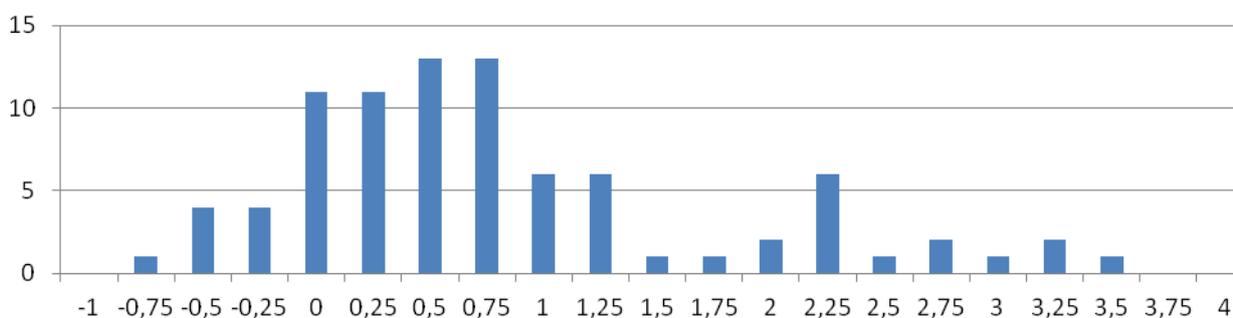


Рис. 2. Распределение количества точек от условной концентрации бензола

Например, значения концентраций бензола, определенные по рис. 2, были разделены на фоновые (до $3,96 \cdot 10^{-12}$ г/мл, логарифм 1,375), повышенные ($3,96$ – $17,73 \cdot 10^{-12}$ г/мл, логарифм 1,375–2,875) и аномальные (выше $17,73 \cdot 10^{-12}$ г/мл, логарифм 2,875).

Результатом проведенной газовой съемки является карта пространственного распределения абсолютных значений отмеченных выше интервалов содержания углеводородов: бензола, толуола и м-ксилола для территории изученного участка.

На карте (рис. 3) изображен изученный район. На нижнем рисунке показано прямоугольником место расположения изученного района. На верхнем показана

береговая линия, изолинии, точки пробоотбора, изолинии одинаковых пороговых концентраций. Область аномальных концентраций находится в левом верхнем углу верхнего рисунка. Статистическая обработка проводилась в Microsoft Excel. Создание изолиний концентраций и привязка точек пробоотбора по координатам GPS к топокарте произведены в картографическом пакете GoldenSoftware Surfer. Точки пробоотбора были выбраны из условия доступности с учетом рельефа местности, поэтому схема расположения точек нерегулярная.

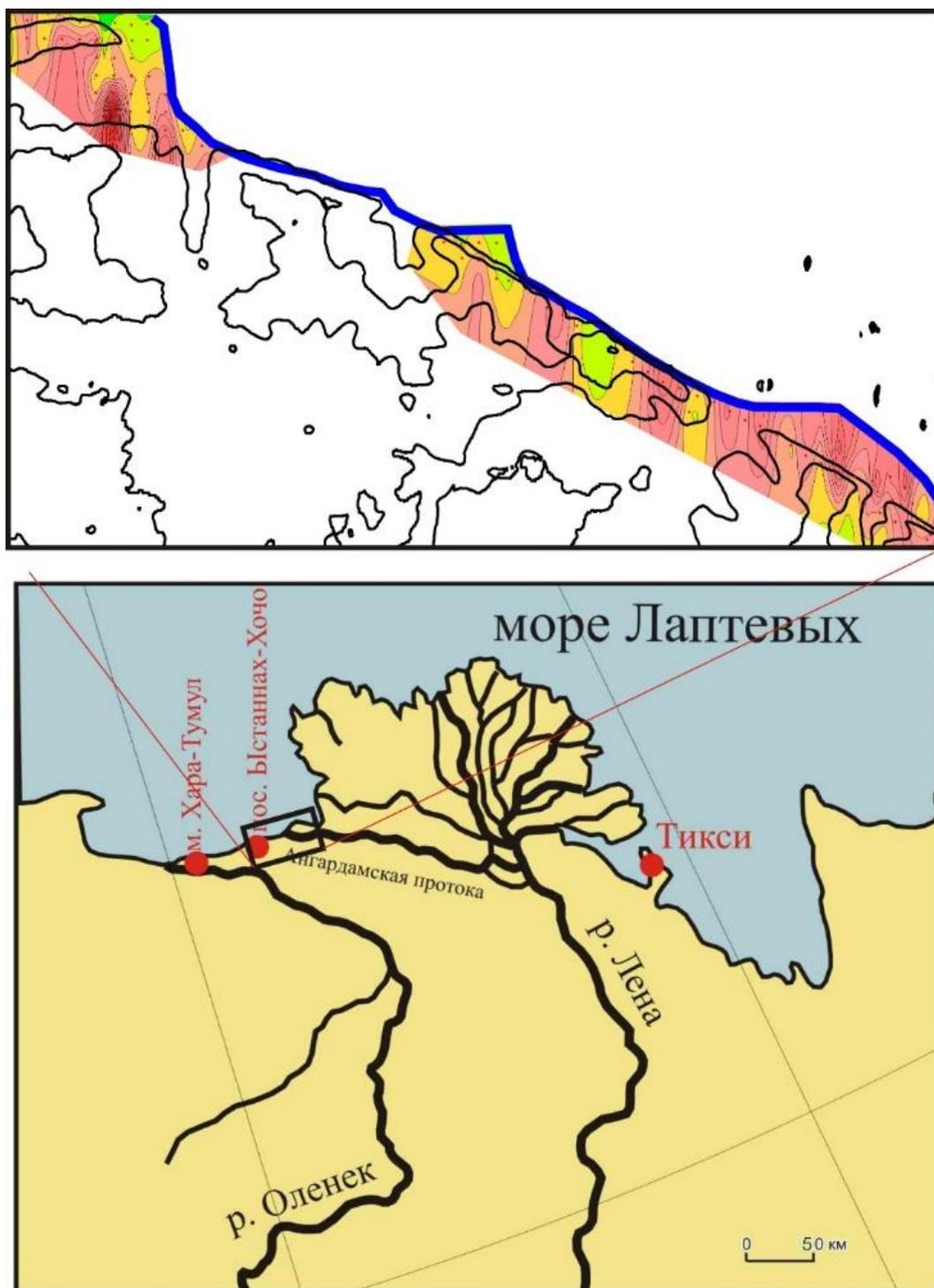


Рис. 3. Карта распределения концентраций бензола

Основной целью проведенного оперативного картирования площадного распределения концентраций ароматических углеводородов являлось получение закономерности распределения геохимических аномалий. Для определения геологических причин измеренных распределений необходимо увязать пространственное распределение мигрирующих углеводородов с геологическим строением района. Это следующий этап исследования.

Объективность полученных результатов геохимической съемки контролировалась их стабильностью и повторяемостью. В каждой точке делалось не менее трех замеров.

Отработана последовательность действий на точках экспозиции концентраторов, определено оптимальное время экспозиции – сутки.

Установлено, что время хранения пробы при изменении окружающей температуры во время эксперимента в интервале $-2..+14^{\circ}\text{C}$ не превышает 5 суток.

Вывод: впервые получено распределение на территории гор Ангардам-Таса углеводородов $\text{C}_6\text{--C}_8$, мигрирующих из глубин. Наличие мигрирующих из глубин углеводородов свидетельствует о том, что на этой территории в глубинах существуют источники углеводородов, потенциальные залежи углеводородов в какой-то форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Е. В., Балдин М. Н., Грузнов В. М. Особенности применения пассивных концентраторов для геохимической съемки при поиске залежей нефти и газа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 177–182.

© Е. В. Карташов, В. А. Маринов, А. Н. Фомин, 2015

ПРОЦЕСС ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТОКА В НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛЕ: ОТ ЧЕГО ОН ЗАВИСИТ И НАСКОЛЬКО МЫ МОЖЕМ ЕГО КОНТРОЛИРОВАТЬ*

Николай Олегович Кожевников

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

На ранних временах и/или высоких частотах незаземленная горизонтальная петля, используемая в качестве источника первичного поля в методе переходных процессов, может быть представлена в виде комбинации двух длинных линий, образованных проводом петли и подстилающей его геологической средой. Параметры линий зависят от частоты/времени и удельного сопротивления подстилающей среды. Модель петли, основанная на теории длинных линий, позволяет решить обратную задачу, а именно: подобрать параметры линий и сопротивление подстилающей среды, при которых модельные графики выключения тока близки к измеренным. Поскольку на ранних временах параметры генераторной петли зависят от геоэлектрического разреза и окружающей обстановки, такое понятие, как «первичное поле источника», применительно к измерениям на ранних временах теряет смысл.

Ключевые слова: метод переходных процессов, горизонтальная петля, выключение тока, ранние времена, длинная линия, обратная задача, первичное поле.

CURRENT TURN-OFF IN A HORIZONTAL TRANSMITTER LOOP: ON WHAT DOES IT DEPEND AND TO WHAT EXTENT WE CAN CONTROL IT

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the current turn-off in a horizontal 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. In modeling the current turn-off process, the loop was simulated as a symmetrical combination of two identical transmission lines with shorted outputs. Modeling was performed in the frequency domain with subsequent transformation into the time domain. Parameters of the lines and, hence, of the whole loop depend on frequency, ground conductivity and the loop environment. On the one hand, this allows inferring the near-surface conductivity from the current turn-off response. On the other hand, it limits the possibility of the current-off to be controlled which implies that at very early times the concept of a loop primary field lose its meaning. control the current turn-off in a loop

Key words: TEM sounding method, horizontal loop, current torn-off, early times, transmission line, inverse problem, primary field.

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

Незаземленная горизонтальная петля, используемая для возбуждения индукционных переходных процессов в земле, является неотъемлемым элементом систем 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 измеряется создаваемое этими токами вторичное магнитное поле или чаще – с помощью приемной петли или рамки – его производная.

В процессе измерения переходная характеристика земли сворачивается с переходными характеристиками генераторной и приемной петель. Поэтому при решении прямых и обратных задач импульсной индуктивной электроразведки необходимо учитывать особенности выключения тока в генераторной петле и собственный переходный процесс – в приемной. В большинстве случаев при моделировании и/или экспериментальном изучении собственного отклика незаземленной петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

В последние 10–15 лет в связи с потребностями малоглубинной геофизики становятся актуальными измерения переходных характеристик на все более ранних временах. Очевидно, снижение начального времени регистрации влечет за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле или по меньшей мере предполагает, что мы в состоянии контролировать этот процесс. Однако на этом пути имеются ограничения как технического [1], так и принципиального характера. К числу последних следует отнести тот факт, что на ранних временах и/или высоких частотах петля проявляет себя как система с распределенными параметрами, характеризующаяся свойствами, типичными для длинной линии. Благодаря симметрии петля в совокупности с подстилающей ее верхней частью разреза (ВЧР) может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, соединенных последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена [2]. Подобное представление петли позволяет воспользоваться для ее анализа хорошо разработанной теорией длинных линий. Основные положения теории применительно к анализу и расчету выключения тока в горизонтальной незаземленной петле подробно изложены в упомянутых публикациях.

Рис. 1 иллюстрирует этот подход применительно к импульсной индуктивной электроразведке. Последовательно с петлей включены источник напряжения U и ключ (рис. 1а). В петле протекает установившийся ток I_0 . Для подавления собственных колебаний тока и/или напряжения, возникающих в петле после отключения от батареи, к ней может быть подключен шунтирующий резистор с сопротивлением R_1 . В момент времени t_0 ключ размыкается и ток, поступающий от батареи, становится равным нулю. Эта же петля в виде комбинации двух линий показана на рис. 1б. К входу каждой из линий подключен источник с напряжением $U/2$, резистор с сопротивлением $R_1/2$ и ключ. В момент времени $t=0$ каждый из ключей отсоединяет «свою» линию от «своего» источника. Поскольку вследствие симметрии петли точки O и $P/2$ имеют одинаковый потен-

циал, их можно заземлить. Это позволяет свести задачу выключения тока в петле к его выключению в длинной линии (рис. 1в).

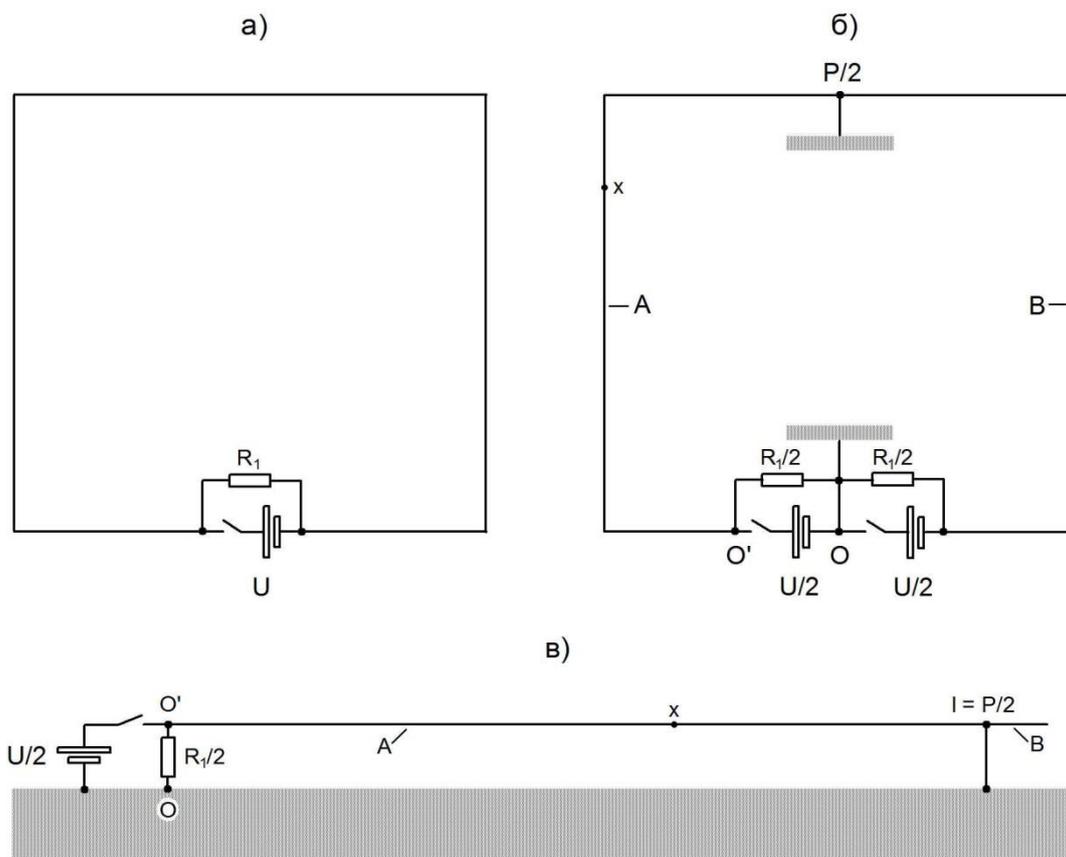


Рис. 1. Горизонтальная незаземленная петля с источником напряжения U , ключом и шунтирующим резистором R_1 (а); та же петля, источник и шунтирующий резистор, представленные в виде двух идентичных линий А и В, источников и резисторов (б); закороченная на выходе линия А (в)

Реальные линии, образующие петлю, характеризуются потерями, а также частотной дисперсией первичных и, соответственно, вторичных параметров. Методы расчета таких линий в частотной области подробно описаны в литературе [3]. Поэтому при расчете переходного процесса тока в петле сначала отыскивалось решение в частотной области, которое затем преобразовывалось во временную область.

Как показано [2], погонные емкость C и проводимость изоляции G провода петли не изменяются при изменении удельного сопротивления ρ земли и частоты ω . Однако погонные сопротивление R и индуктивность L зависят от ρ и ω , и это необходимо учитывать при расчете выключения тока в петле.

Сопоставление результатов измерений и моделирования процесса выключения тока, как в режиме свободных колебаний, так и при шунтировании петли согласующим резистором, показало хорошее соответствие между экспериментальными и модельными данными [2, 4]. В числе прочего тем самым была по-

казана принципиальная возможность использовать процесс выключения тока в петле для оценки удельного электрического сопротивления и, возможно, поляризуемости [5] ВЧР. Вместе с тем эти результаты свидетельствуют о том, что на процесс выключения тока влияют факторы, которые невозможно полностью контролировать.

На рис. 2 приведены результаты расчетов, показывающие, как изменяется форма и длительность выключения тока $I_0=0.09$ А в центральной ($x=200$ м) точке периметра петли размером 100м x 100м в зависимости от удельного сопротивления подстилающей среды (рис. 2а), погонной емкости C провода (рис. 2б) и сопротивления резистора R_1 , шунтирующего петлю (рис. 2в). Каждый из рисунков иллюстрирует влияние одного параметра, остальные остаются фиксированными.

Рисунки иллюстрируют, как изменение того или иного параметра влияет на процесс выключения тока в петле и, на первый взгляд, не требуют комментариев. Тем не менее необходимо отметить один момент. Как показывает рис. 2в, при фиксированном удельном сопротивлении подстилающей среды и емкости провода можно подобрать такое сопротивление шунтирующего резистора, что время выключения близко к минимальному.

Однако при раскладке петли в другом месте погонная емкость (зависящая от эффективной высоты провода, особенностей микрорельефа, растительности, влажности) окажется другой. Удельное электрическое сопротивление земли также будет другим, а это значит, что при фиксированном сопротивлении шунтирующего резистора ($R_1=400$ Ом) изменится и процесс выключения тока, который зависит от сопротивления подстилающей среды (рис. 2а) и погонной емкости провода (рис. 2б). Таким образом, подобранный на каком-либо пункте зондирования

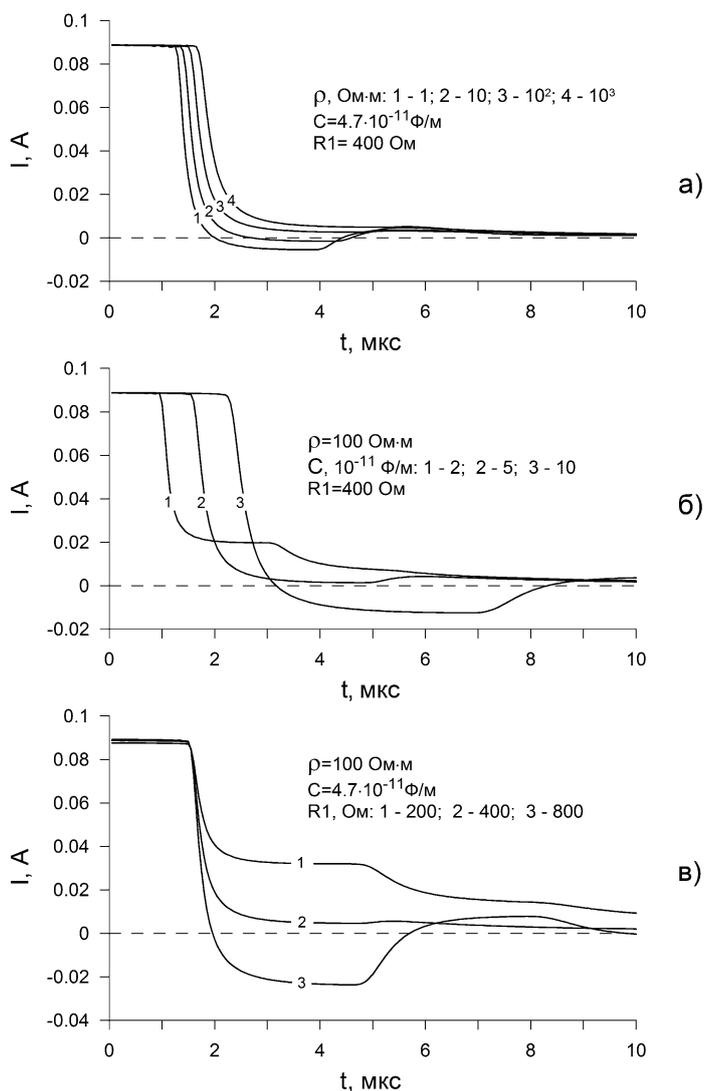


Рис. 2. Выключение тока в средней точке ($x = 200$ м) петли размером 100 м x 100 м в зависимости от удельного сопротивления земли (а), погонной емкости провода (б) и сопротивления шунтирующего резистора (в)

шунтирующий резистор при перемещении в другое место уже не обеспечит согласование и поэтому не будет оптимальным.

Сказанное не означает, что петлю не следует шунтировать. Как показывает практика полевых работ, путем подбора сопротивления шунтирующего резистора можно добиться того, что выключение тока не носит колебательный характер и при этом не является чрезмерно «затянутым». Однако такой способ применим лишь при условии, что измерение индукционной переходной характеристики начинается не слишком рано. Стремление продвинуться в область как можно более ранних времен наталкивается на принципиальное ограничение. Его суть заключается в том, что на ранних временах параметры петли зависят от геоэлектрического разреза и окружающей обстановки, в частности метеоусловий [5]. Таким образом, в области ранних времен использование такого понятия, как первичное поле источника, теряет смысл. В настоящей и предшествовавшей работах [2, 4, 5] показано, что, в принципе, можно подобрать модель подстилающей среды, наилучшим образом объясняющую процесс выключения тока в петле. Однако такая возможность не может быть реализована в рамках традиционной теории импульсной индуктивной электроразведки.

Заканчивая обсуждение, необходимо отметить, что результаты моделирования соответствуют мгновенному отключению петли от источника; в этом случае выключение тока контролируется только параметрами образующих петлю длинных линий и сопротивлением шунтирующего резистора. В экспериментах величина установившегося тока составляла около 0.1 А, что позволяло обойтись без элементов, защищающих электронный ключ от перенапряжений, и тем самым обеспечить близкое к идеальному отключение петли от источника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плотников А. Е. Оценка ограничений метода переходных процессов при исследовании малых глубин: численный эксперимент // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 7. – С. 1144–1152.
2. 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.
3. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.
4. Kozhevnikov N. and Helwig S. Very early time response of an ungrounded horizontal loop: theory and experiment // Extended Abstracts, 22nd EM Induction Workshop Weimar, Germany, August 24–30. – 2014. – 4PP.
5. Кожевников Н. О. Затухающие колебания тока в незаземленной горизонтальной петле и их связь с инфильтрацией грунтовых вод // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 437, № 6. – С. 820–823.

© Н. О. Кожевников, 2015

РЕГИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПРИОЛЬХОНЬЯ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И МЕТОДА ЕП*

Николай Олегович Кожевников

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

Известно, что в метаморфических породах Чернорудской тектонической зоны Приольхонья отмечаются значительные проявления графитовой минерализации. Согласно результатам электроразведочных исследований методами ЗСБ и ЕП, породы Чернорудской зоны имеют высокую электропроводность, поскольку графит образует здесь непрерывную, связанную систему, что привело к драматическому понижению модуля сдвига пород Чернорудской зоны. Поэтому под действием субвертикальных сдвиговых напряжений, инициированных в кайнозой, именно в Чернорудской зоне происходили и происходят сдвиговые перемещения большой амплитуды. Чернорудской грабен и, возможно, Маломорский рифт являются одним из проявлений этого процесса.

Ключевые слова: Приольхонье, тектоника, ЗСБ, ЕП, проводящая зона, графит.

REGIONAL SCALE STRUCTURE OF PRIOLKHONYE FROM ELECTROMAGNETIC SOUNDING AND SP SURVEYS

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Metamorphic rocks of the Chernorud zone (Priolkhonye) are known to contain significant amounts of graphite mineralization. TEM and SP surveys in Priolkhonye have shown that rocks of the Chernorud zone have high conductivity, for graphite forms here continuous, electrically conductive network which resulted in dramatic decrease in shear modulus of the rocks. As a consequence under the action of near-vertical shear stress initiated since Cenozoic it is just the Chernorud zone where significant near-vertical deformations were and still are occurring. The Chernorud graben and, apparently, the Maloe more rift are manifestation of the above process.

Key words: Priolkhonye, tectonics, TEM, SP, electrically conductive zone, graphite.

Электроразведочные исследования методами естественного электрического поля (ЕП) и зондирования 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 [1]. Согласно результатам этих работ, региональная структура Приольхонья носит двумерный характер и определяется наличием северо-западного и

* Работа выполнена при финансовой поддержке ОНЗ РАН.

юго-восточного тектонических блоков, граница между которыми проходит по Кучулгинскому региональному разлому (рис. 1).

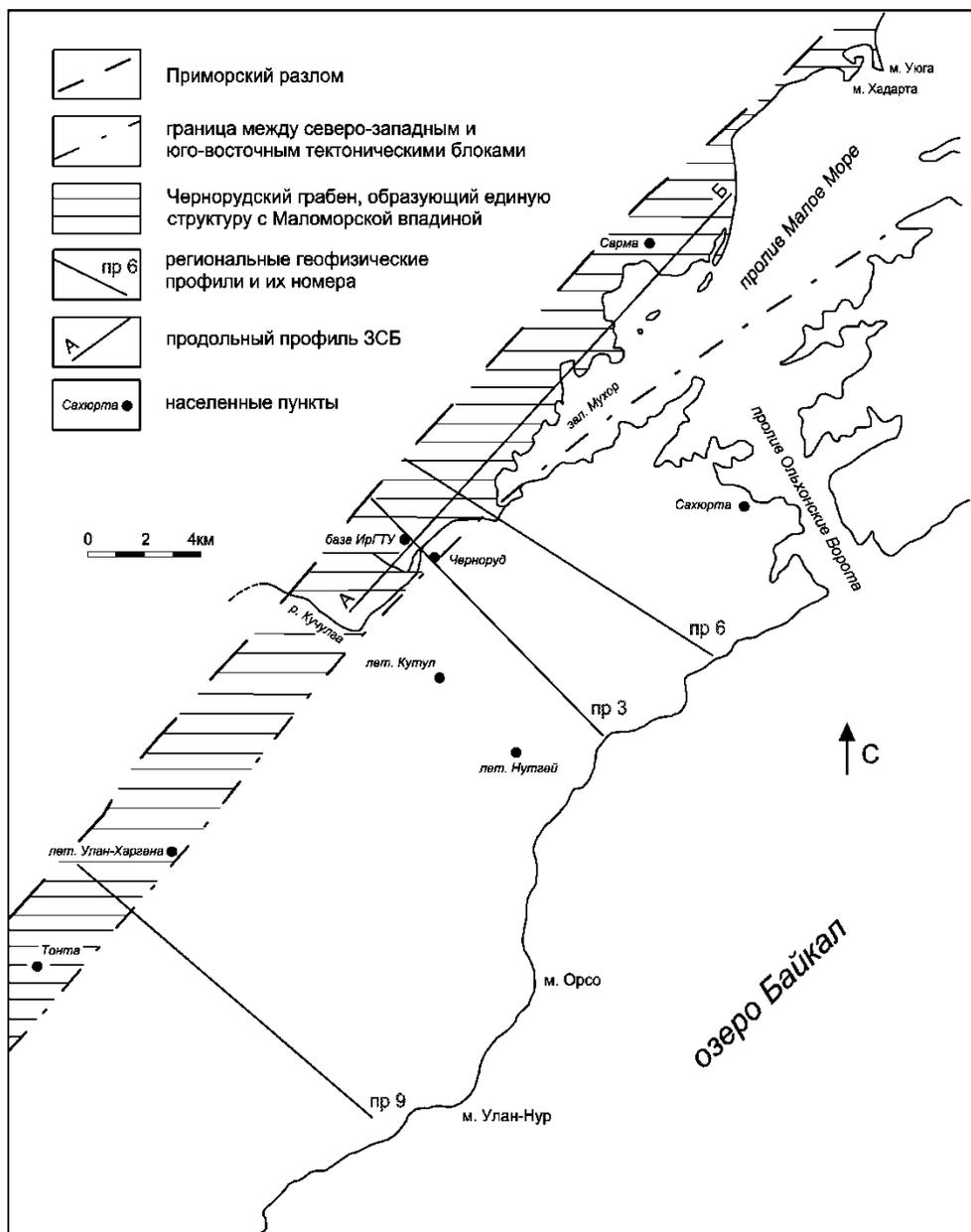


Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей и элементы региональной структуры Приольхонья

Северо-западный блок представлен Чернорудской тектонической зоной, в пределах которой породы ольхонского метаморфического комплекса подверглись максимальной тектонической проработке. По результатам ЗСБ зона отмечается низким (от 0.1 до 10 Ом·м) удельным электрическим сопротивлением (рис. 2), а по данным метода ЕП – проявляется в виде отрицательных аномалий потенциала U (рис. 3), создаваемых геобатареей, неотъемлемым элементом которой являются круто падающие проводящие пласты.

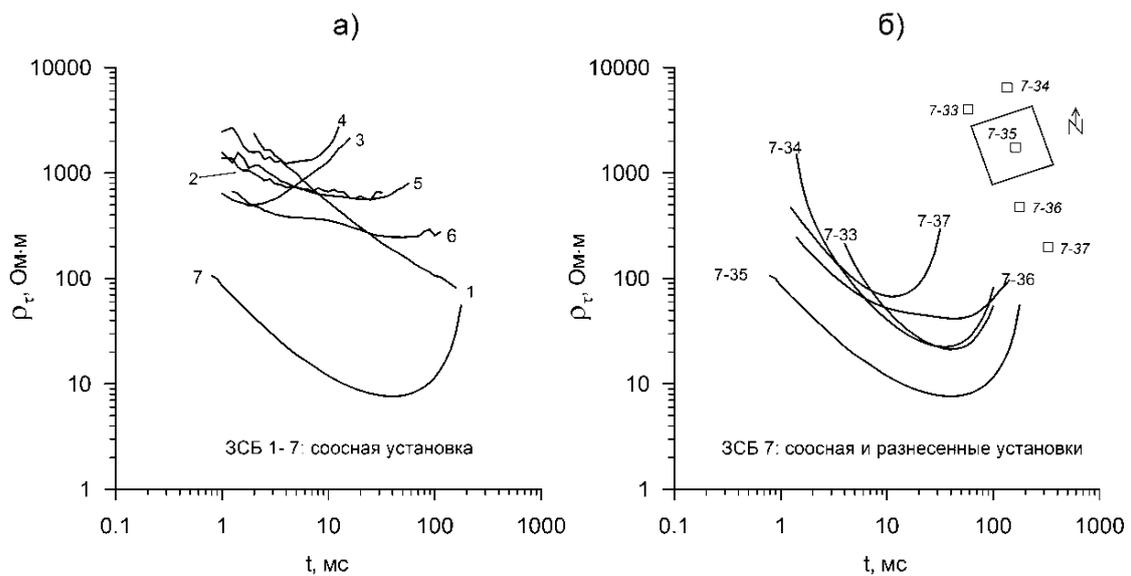


Рис. 2. Кривые кажущегося удельного сопротивления метода ЗСБ (см. рис. 1, ПР 6):

а – измеренные соосной установкой в пределах юго-восточного блока (ЗСБ 1 - 6) и Чернорудской зоны (ЗСБ 7); б – измеренные соосной и разнесенными установками в Чернорудской зоне. Размер генераторной петли – 400 м х 400 м, приемной – 18 м х 18 м (показана не в масштабе)

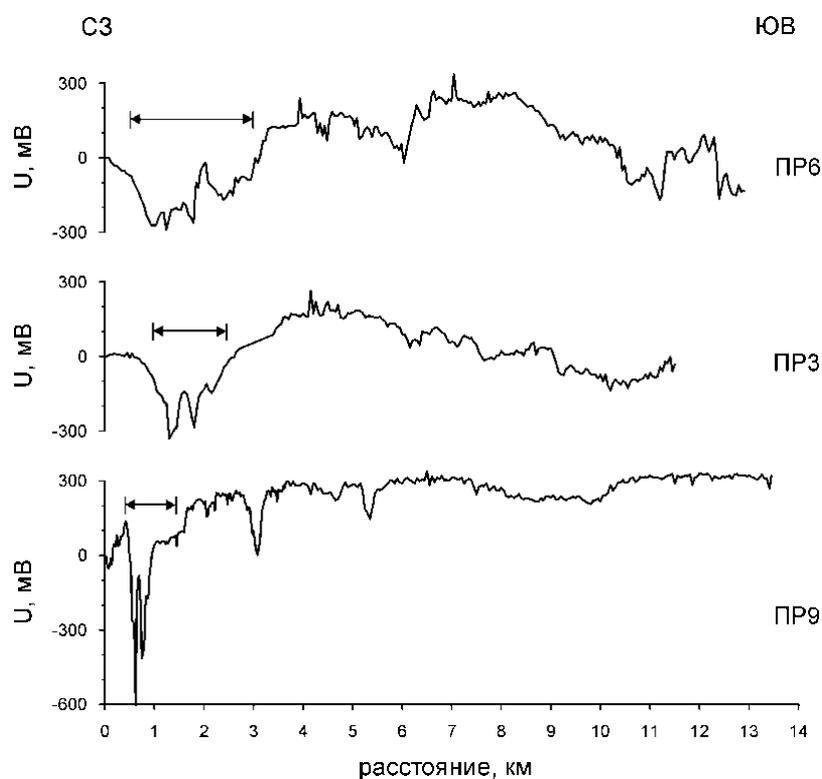


Рис. 3. Графики потенциала ЕП вдоль региональных профилей, пересекающих Приольхонье (см. рис. 1). Горизонтальными стрелками показано положение и ширина отрицательных аномалий ЕП, «трассирующих» Чернорудскую зону

Несколько неожиданным оказалось обнаружение здесь методом ЗСБ пологих проводников, кровля которых залегает на глубинах 100–400 м. Юго-восточный блок включает широкую полосу пород между Кучулгинским разломом и побережьем о. Байкал. По сравнению с Чернорудской зоной, этот блок более «спокоен» в тектоническом отношении. Здесь нет аномалий потенциала ЕП большой амплитуды (см. рис. 3), а субгоризонтальные проводники, подобные тем, которые выделены в Чернорудской зоне, не обнаружены.

Высокая электропроводность полого- и крутопадающих структур, которыми «трассируется» Чернорудская зона, объясняется присутствием здесь графита, который образует протяженные электрически проводящие системы. Возраст формирования зоны оценивается примерно в 400–500 млн. лет. Таким образом, по сравнению с Байкальским рифтом она представляет собой древнюю структуру.

В то же время по данным геологического картирования и геофизических съемок методами ЕП и ЗСБ положение Чернорудской зоны в плане совпадает с контуром неотектонической структуры, известной как Мухор-Таловский блок [2]. Последний представляет собой грабенообразный прогиб, протягивающийся в виде узкой полосы вдоль Приморского разлома от р. Бугульдейки до залива Мухор и далее в Малое Море. Тектонический уступ Приморского разлома является северо-западной границей прогиба. С юго-востока прогиб ограничен менее значительным по высоте уступом Кучулгинского разлома. В пределах суши ширина прогиба 1.5–3 км, за пределами суши, постепенно возрастая, она достигает в Малом Море напротив острова Ольхон 10 км и больше. На участке между р. Ангой и заливом Мухор прогиб известен также как Чернорудский грабен (см. рис. 1).

Поскольку, с одной стороны, Чернорудская зона существовала до появления Чернорудского грабена, а с другой – положение этих структур в плане совпадает, логично предположить, что они связаны отношением причина-следствие. В этой связи возникает вопрос: почему наибольшие нарушения и вертикальные перемещения линейных блоков, в результате которых в новейшее время образовался Чернорудский грабен, наблюдается именно в пределах древней Чернорудской зоны?

Как уже упоминалось, в породах Чернорудской зоны отмечаются значительные проявления графитовой минерализации. Согласно литературным данным, графит пользуется репутацией выдающегося «смазчика» [3]. Присутствие в породах графита, особенно в виде непрерывной, связанной системы, приводит к драматическому понижению их модуля сдвига. Напомним, что результаты электроразведочных исследований со всей определенностью говорят о том, в Чернорудской зоне графит представлен такой системой. Поэтому при возникновении субвертикальных сдвиговых напряжений, которые были инициированы в кайнозое, именно в Чернорудской зоне произошли и происходят сдвиговые перемещения большой амплитуды.

Известно, что напряжения сдвига способствуют преобразованию содержащих углерод флюидов в графит, образующий электрически-связанные си-

стемы с высокой электропроводностью [4], которые можно «увидеть» с помощью электроразведочных методов. Однако в литературе почему-то не нашел отражения тот факт, что максимальные сдвиговые деформации должны происходить именно там, где уже присутствует связанная в единую систему графитовая минерализация. Очевидно, коль скоро речь идет о формировании грабена, наибольший интерес представляют круто падающие зоны, в которых сконцентрирован графит, образующий протяженные, непрерывные системы. Такие зоны выделены и прослежены с помощью метода ЕП в протяженной полосе между Приморским и Кучулгинским разломами (см. рис. 3).

Поведение кровли субгоризонтальных проводящих тел также отражает некоторые особенности неотектоники Приольхонья. На рис. 4 показано, как абсолютные отметки кровли полого залегающего проводника, прослеженного в пределах северо-западного тектонического блока методом ЗСБ, изменяется по направлению ЮЗ-СВ вдоль профиля АБ, между падью Харьян на юго-западе и дельтой р. Сармы на северо-востоке (см. рис. 1). Кровля зоны погружается в северо-восточном направлении, средний уклон составляет 20 м/км. В этом же направлении и примерно под таким же углом наклонена поверхность рельефа Ангино-Маломорского блока, которая местами подходит к берегу Байкала и далее скрывается в его водах [2]. Очевидная корреляция между двумя поверхностями – современного рельефа и кровли проводящей зоны – свидетельствует о том, что при изучении структуры Приольхонья и Маломорского рифта с помощью электроразведки кровля проводящей зоны может быть использована в качестве маркирующего горизонта, «встроенного» в породы ольхонского метаморфического комплекса.

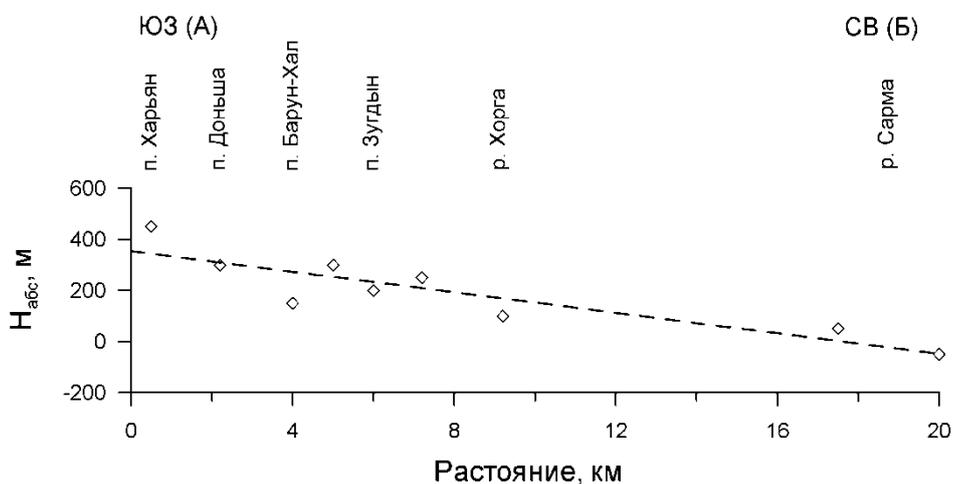


Рис. 4. Положение кровли проводящей зоны (маленькие ромбы) по данным ЗСБ и аппроксимирующий ее линейный тренд (штриховая линия)

Как показано выше, графит маркирует именно те участки земной коры, где наиболее легко происходят сдвиговые перемещения. В результате таких перемещений, направленных преимущественно вертикально, сформировались со-

временный рельеф Приольхонья и Маломорский рифт. Известно, что Маломорский рифт и Приольхонье развиваются как единая структура [2]. Это находит отражение в геоэлектрической модели: северо-восточный фланг показанной на рис. 4 проводящей зоны может быть отнесен как к собственно Приольхонью, так и Маломорскому рифту. По данным электроразведки глубина залегания кровли субгоризонтального проводящего маркирующего горизонта, в том числе на участках ее резкого изменения, может быть прослежена и на акватории Малого моря. С учетом общности геологической истории Приольхонья (где электроразведка показала высокую эффективность) и Маломорской впадины можно ожидать, что постановка электроразведочных работ на акватории Малого моря и на прилегающей территории о. Ольхон открывает дополнительные возможности для изучения структуры Маломорского рифта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Смолянский Е.Н., Гончар Г.А. Основные черты неотектоники Приольхонья // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Труды второй Байкальской молодежной школы-семинара. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. - С. 5–21.
3. Kiyokazu Oohashi, Takehiro Hirose, and Toshihiko Shimamoto. Graphite as a lubricating agent in fault zones: An insight from low- to high-velocity friction experiments on a mixed graphite-quartz gouge *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. - 2013.- V. 118. - P. 2067–2084. - doi:10.1002/jgrb.50175.
4. Nover G., Stoll J.B., and Gönna J. Promotion of graphite formation by tectonic stress – a laboratory experiment // *Geophys. J. Int.* - 2005. - 160. - P. 1059–1067.

© Н. О. Кожевников, 2015

ЖЕСТКИЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮГО-ЗАПАДА БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ*

Пётр Георгиевич Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент

Марина Петровна Козлова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, e-mail: KozlovaMP@ipgg.sbras.ru

Леонид Валерьевич Цибизов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант

Анна Владленовна Михеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: anna@omzg.sccc.ru

Юлия Михайловна Романенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, e-mail: Romanenko-UM@ipgg.sbras.ru

Разработана методика выделения жестких структурных элементов в литосфере на основе расчета пространственного распределения сейсмической активности. Для выделения этих структурных элементов использовалась геоинформационная система EEDB (Expert Database of Earthquakes). Выполненный анализ показал, что эпицентры сильных землетрясений в большинстве случаев расположены вблизи жестких тектонических структур. Два жестких блока с размерами $\sim (130 \text{ км} \times 55 \text{ км})$ и $\sim (40 \text{ км} \times 20 \text{ км})$ выделены вблизи юго-западного окончания Байкальской впадины. Эти блоки асейсмичны и обнаружены на основе анализа сейсмической активности A_8 и выделяемой сейсмической энергии.

Ключевые слова: жесткие структуры в земной коре, сейсмическая активность, сильные землетрясения, геоинформационная система EEDB.

* Работа выполнена при частичной поддержке проекта VIII.70.2.3 Программы ФНИ, гранта РФФИ 14-05-00688а и Программы 18 Президиума РАН.

RIDGID CRUSTAL STRUCTURAL ELEMENTS ON THE SOUTH-WEST PART OF BAIKAL RIFT BASED ON SEISMIC ACTIVITY

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Leading Research Scientist, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Associate Professor

Marina P. Kozlova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist, e-mail: KozlovaMP@ipgg.sbras.ru

Leonid V. Tsibizov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Engineer, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Postgraduate Student

Anna V. Mikheeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, e-mail: anna@omzg.sssc.ru

Yuliya M. Romanenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

The method of finding of rigid structural elements in lithosphere has been developed on the basis of calculation of spatial distribution of seismic process intensity. Software for analyses of seismological information EEDB (Expert Database of Earthquakes) was used to find these structural elements. Epicentres of strong earthquakes are in most cases located near the rigid tectonic structures. Two rigid blocks were found in the Earth crust near south-western end of the Baikal basin. These blocks are aseismic structural elements and its were found on the base of analyses seismic activity A8 and released seismic energy.

Key words: rigid crustal blocks, seismic activity, strong earthquakes, geoinformation system EEDB.

Реологическая неоднородность земной коры и литосферы в целом во многом определяет характер пространственно-временного развития сейсмического процесса и процессов подготовки сильных землетрясений. Несомненно, что пространственная неоднородность распределения сейсмической активности в земной коре зависит от прочностных свойств тех или иных составляющих ее структурных элементов. Актуальность разработки методов выделения жестких структур также определяется необходимостью построения близких к реальности геомеханических моделей сейсмогенной среды, что существенно расширяет возможности исследования геодинамических и сейсмических процессов методами численного моделирования.

Ряд методов анализа сейсмического режима был включен нами в геоинформационную систему EEDB [1] и использован в ряде работ для выделения структурных элементов литосферы, например, в некоторых районах Централь-

ной Азии [2]. В данной работе объектом исследования выбран район юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы, включающий юг Байкальской впадины, Тункинскую впадину и прилегающие к ним территории. Выбор этого района определяется, во-первых, необходимостью построения геомеханической и тектономагнитной моделей этого участка земной коры для интерпретации результатов комплексного геофизического и геодезического мониторинга, в том числе тектономагнитных наблюдений, выполняемых в этом районе. Во-вторых, важным представляется необходимость определения геодинамических причин и особенностей подготовки Култукского землетрясения 2008 г. с $M=6.3$, наиболее сильного события в Байкальской впадине за последние пятьдесят лет.

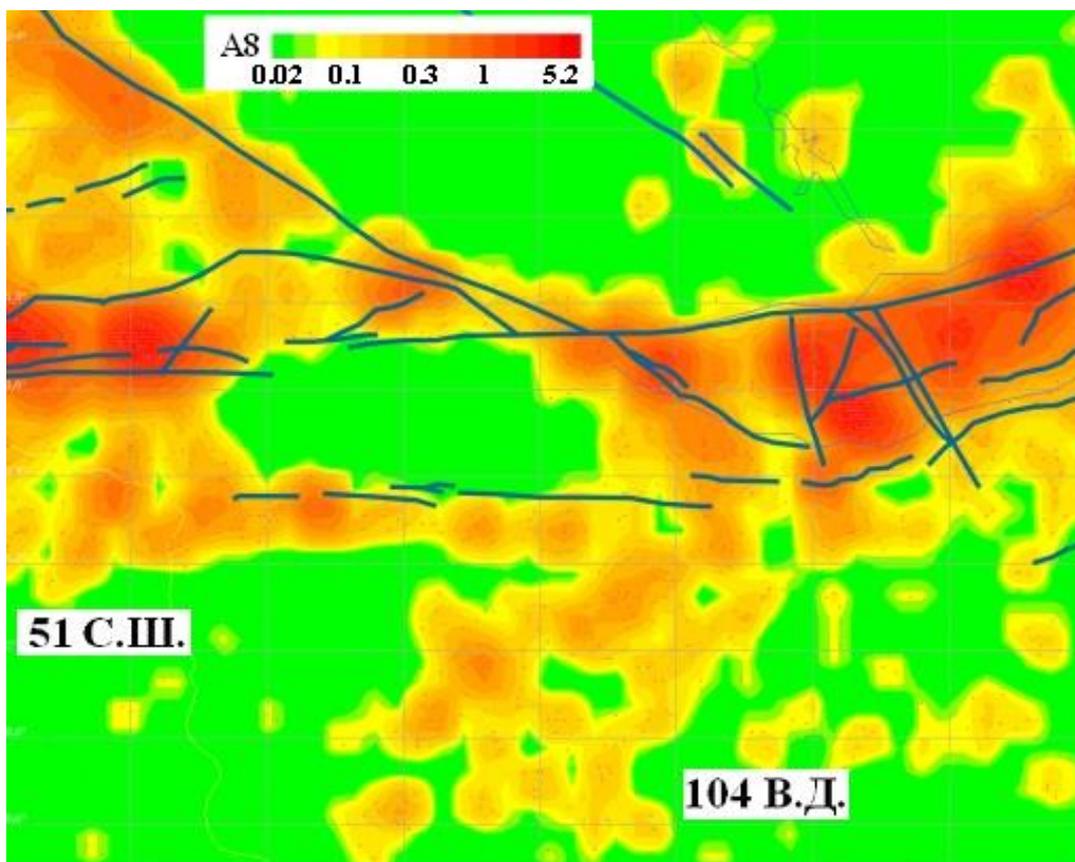


Рис. 1. Аномалии параметра сейсмической активности A_8 , рассчитанной для района юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы. Сейсмогенерирующие разломы с потенциалом генерации землетрясений с $M>5.5$ приведены по работе [3]

Существуют различные способы выделения асейсмичных областей: от визуального анализа пространственного распределения эпицентров землетрясений до анализа количественных значений параметров сейсмического режима – плотность эпицентров землетрясений, выделяемая энергия на единицу площади или объема.

В данном случае мы иллюстрируем 2 подхода. В первом случае использовали расчет сейсмической активности A_8 , который характеризуется количеством землетрясений с $K=8$ на площади 1000 км^2 ($\sim 33 \times 33 \text{ км}^2$) за годовой интервал времени. Как и в случае подобных исследований для ряда районов Центральной Азии (Алтай, Джунгария, Тянь-Шань) [2], применение этого параметра позволило выделить асейсмичный блок размером $\sim 120 \text{ км} \times 55 \text{ км}$, примыкающий к юго-западному окончанию оз. Байкал, который с севера ограничен Тункинским разломом, а с юга – Хамардабанской системой разломов (рис. 1). Вместо параметра A_{10} , обычно используемого для расчета сейсмической активности континентальной части российской территории Евразии, был применен параметр A_8 , что позволило получить более детальную информацию о слабосейсмичных областях.

Второй подход иллюстрирует выделение более локальной структуры с размерами $\sim 40 \text{ км} \times 20 \text{ км}$, расположенной в пределах акватории оз. Байкал (рис. 2). В этом случае для выделения асейсмичных областей рассчитывалось значение выделяемой сейсмической энергии за год на площади 1 км^2 (см. врезку на рис. 2). Алгоритм отрисовки таких карт позволяет задавать нижний предел выделяемой сейсмической энергии, нормированной на площадь и время, при этом участки земной коры с выделяемой энергией ниже этого предела могут считаться слабосейсмичными или условно «жесткими». Например, в данном случае значение выделяемой нормированной энергии в пределах прямоугольного блока (рис. 2) на 3–5 порядков ниже, чем в соседних областях.

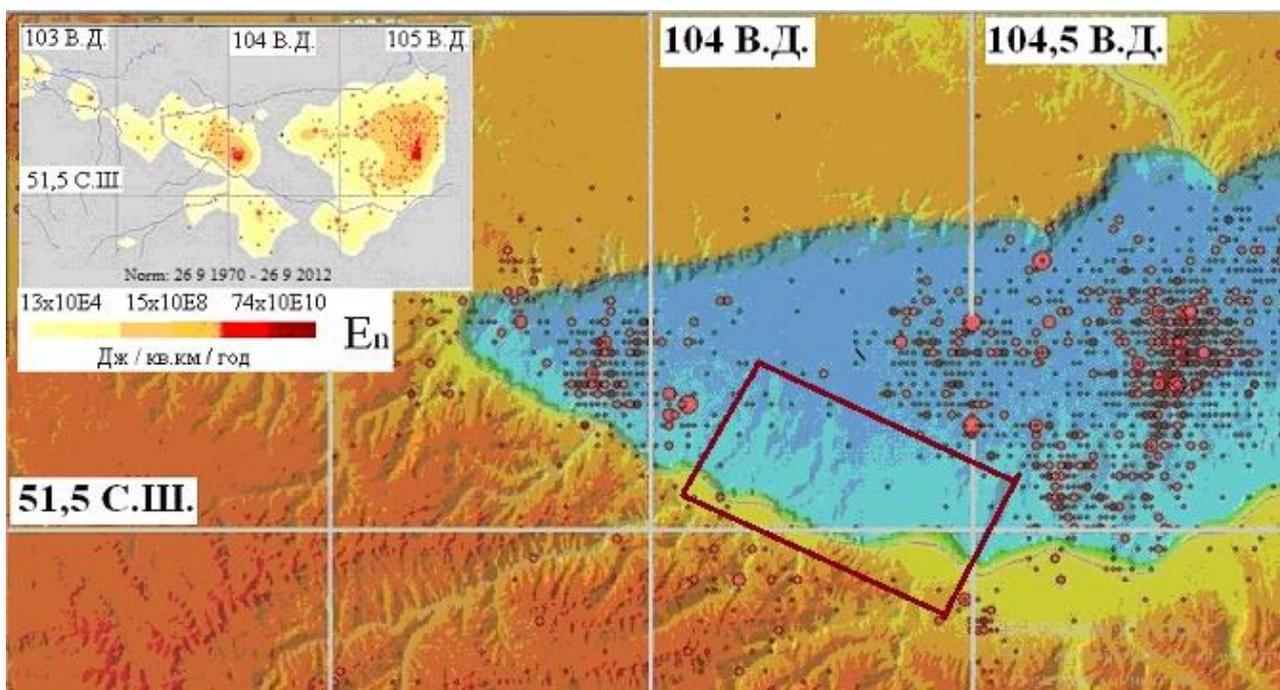


Рис. 2. Эпицентры землетрясений с $M > 1.5$ в южной части Байкальской впадины и схема жестких структур в этом районе (серый тон на врезке вверху слева). Серым цветом закрашены области, в которых уровень выделяемой сейсмической энергии равен или меньше $13 \times 10^4 \text{ Дж} / \text{км}^2 / \text{год}$

Важным геодинамическим или, скорее, сейсмогеодинамическим следствием обнаружения этого жесткого блока является возможность объяснения пространственного развития афтершокового процесса Култукского землетрясения 2008 г., $M=6.3$. Землетрясение произошло у северо-западной границы этого блока, но из-за наличия жесткой структуры на юго-востоке афтершоковый процесс развивался исключительно в северо-западном направлении от эпицентра главного толчка.

Дополнительными сведениями о состоянии сейсмогенной среды на границах или в сейсмоактивных областях, примыкающих к выделяемым жестким блокам, могут служить данные о параметрах графика повторяемости в случае достаточности данных для их расчета. При этом информативными являются как параметр a , так и параметр b , поскольку первый характеризует интенсивность сейсмического процесса, а второй может зависеть от реологии сейсмогенной среды.

Сопоставление активных в настоящее время разломов, представленных в работе [3, 4], позволяет отметить, что в основном наблюдается совпадение главных разломных структур с аномалиями сейсмической активности. Тем не менее в ряде случаев наши результаты позволяют уточнить некоторые особенности современной разломной тектоники и, в частности, обеспечить выделение блочной структуры.

В этой работе рассмотрены только методы анализа сейсмологической информации, применяемые для выделения жестких структур в земной коре, но существует ряд геофизических и геологических методов (сейсмические и электромагнитные зондирования, анализ аномалий магнитного и гравитационного полей, изучение геологического строения и др.), применение которых может существенно повысить как достоверность выделения таких структур, так и возможность получения новой информации об их физических свойствах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dyadkov P.G., Mikheeva A.V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic reseach // Bulletin of the Novosibirsk computing center Mathematical Modeling in Geophysics. - 2010. - N. 13. - P. 15–30.
2. Новиков И.С., Дядьков П.Г., Козлова М.П., Мамедов Г.М., Михеева А.В., Черкас О.В. Неотектоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Китайского Тянь-Шаня // Геология и геофизика. - 2014. - Т. 55 - С. 1802–1814.
3. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // Тихоокеанская геология. - 2012. - Т. 31, №1. - С. 49–60.
4. Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск, 2006. - 151 с.

© П. Г. Дядьков, М. П. Козлова, Л. В. Цибизов,
А. В. Михеева, Ю. М. Романенко, 2015

ВЛИЯНИЕ МОЩНЫХ ВИБРАЦИЙ НА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ

Юрий Иванович Колесников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, тел. (383)333-31-39, e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Евгений Андреевич Хогоев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-34-19, e-mail: hoguevea@ipgg.sbras.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Приведены результаты натуральных экспериментов по изучению влияния сильных вибраций на сейсмоакустическую эмиссию. Обработка по алгоритму сейсмоземиссионной томографии показала, что после вибрационных воздействий в окрестности вибратора на глубинах до нескольких десятков метров образуются «шумящие» зоны, положение и длительность активизации которых могут изменяться со временем.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, мощный вибратор, ближняя зона.

THE INFLUENCE OF STRONG VIBRATIONS ON SEISMIC-ACOUSTIC EMISSION

Yury I. Kolesnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Associate Professor, tel. (383)333-31-38, e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Evgeny A. Hoguev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., tel. (383)333-34-19, e-mail: hoguevea@ipgg.sbras.ru

Victor S. Seleznev

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Alexey A. Bryksin

Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

The results of field experiments to study of strong vibrations influence on seismic-acoustic emission are presented. Processing with the algorithm of seismic emission tomography showed that after vibrations the «noisy» zones are formed near vibrator at the depths up to several tens meters with varying position and activity duration.

Key words: seismic-acoustic emission, powerful vibrator, near zone.

В работе [1] было показано, что после мощных вибрационных воздействий, производимых на геологическую среду вибрационным источником, в его ближней зоне на глубине до нескольких десятков метров появляются «шумящие» зоны. Активность сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в этих зонах после последовательных сеансов вибраций возрастала, а после их окончания постепенно снижалась до фонового уровня. Характерной особенностью этих активизированных зон было то, что их положение и конфигурация от сеанса к сеансу почти не изменялись, возрастала лишь энергия излучения САЭ. Данные эксперименты были выполнены в октябре 2007 г. на Быстровском вибросейсмическом полигоне, расположенном на восточном берегу Новосибирского водохранилища (Обского моря), примерно в 50 км юго-западнее г. Новосибирска.

В июле 2014 г. были проведены повторные наблюдения на этом же полигоне с использованием того же мощного дебалансного вибратора, развивающего вибрационные усилия до 40–50 тонн в частотном диапазоне 5–15 Гц. Вокруг вибратора была выставлена сеть из 21 автономных цифровых станций Байкал-АС с сейсмоприемниками GS-One (рис. 1).



Рис. 1. Система наблюдений: крестом показано положение вибратора, треугольниками – пунктов наблюдения

Станции вели непрерывную синхронную запись с частотой дискретизации 500 Гц в течение примерно 30 часов, за время которой состоялось шесть сеансов вибраций длительностью от 9 (первый пробный сеанс) до 70 минут в различных режимах с непрерывно или скачкообразно меняющейся частотой в диапазоне 6.25–11.23 Гц. На рис. 2 время сеансов вибрации отмечено сплошными вертикальными полосами. Также на рисунке для одной из точек наблюдений показаны оценки энергии микросейсмических колебаний в относительных единицах, осредненные во временных интервалах по 8 с.

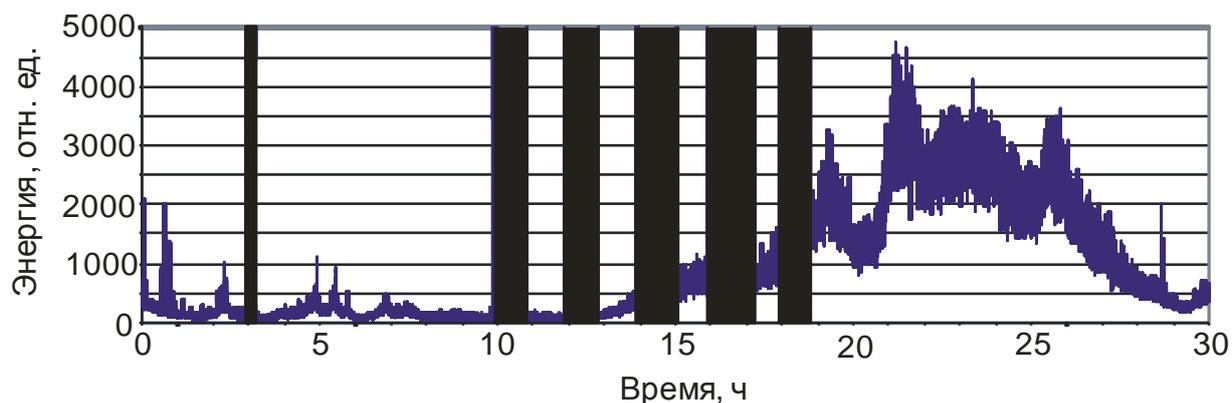


Рис. 2. Характер изменения средней энергии сейсмоакустической эмиссии. Сеансы вибрации обозначены сплошными вертикальными полосами

Как видно из рис. 2, энергия микросейсм после сеансов вибраций постепенно возрастает, а максимальная энергия наблюдается через несколько часов после прекращения работы вибратора. Примеры спектров микросейсм, зарегистрированных после окончания вибрационных воздействий, приведены на рис. 3.

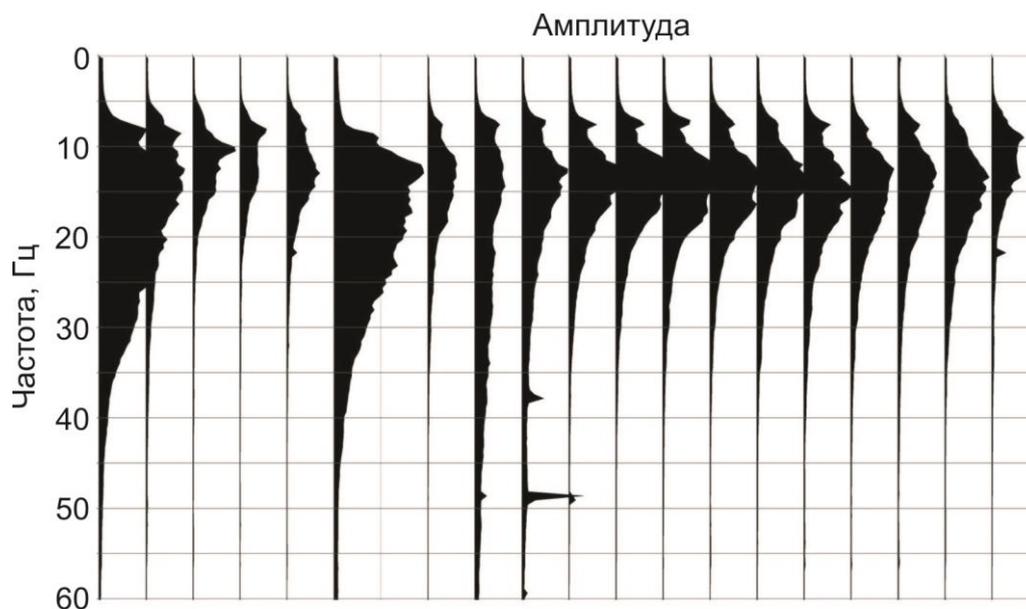


Рис. 3. Примеры спектров микросейсм после окончания вибраций

Непосредственно по графикам изменения энергии микросейсм со временем судить об их природе не представляется возможным, так как кроме воздействия мощных вибраций к усилению микросейсм могли приводить и другие факторы (ветер, волны на водохранилище, дождь и т.д.). Эффективным методом оценки эндогенной части микросейсм, в том числе сейсмоакустической эмиссии, вызываемой воздействиями на среду мощных вибраций, является сейсмоэмиссионная томография, успешно применяющаяся для изучения сейсмически активизированных зон [2–4].

Этот метод основан на суммировании зарегистрированных записей вдоль годографов, рассчитанных для множества предполагаемых источников, распределенных в изучаемом объеме среды (обычно в узлах кубической сетки). Скоростное строение среды при этом считается известным. В результате суммирования определяется мера подобия (сембланс) – отношение энергии суммарного сигнала к сумме энергий всех записей. Если для какого-либо предполагаемого источника сембланс превышает некоторое пороговое значение, считается, что из этой точки излучается когерентный сигнал.

Детально этот алгоритм рассмотрен, например, в работах [2, 4]. Там же предложено пороговым значением считать значение сембланса для полностью некоррелированного сигнала (единице, деленной на число каналов), увеличенного на 95 % доверительный интервал значений оценки некоррелированного волнового поля. В нашем случае такое пороговое значение составляет величину, близкую к 0.05.

На рис. 4 представлены примеры горизонтальных сечений сембланса, рассчитанного для глубин 40, 60 и 80 м по отрезкам микросейсмических записей длительностью 30 минут каждая, начиная с времен от начала регистрации 1 час, 9 часов и 19 часов. Как можно видеть, до начала вибрационных воздействий аномалий сембланса, превышающих пороговое значение, не наблюдается (рис. 4а). Практически отсутствуют они и через 4 часа после последнего сеанса вибраций (рисунки здесь не приводятся).

После остальных сеансов вибраций возникают зоны, в которых сембланс превышает пороговые значения. Все эти аномальные зоны прослеживаются на глубинах, по крайней мере до 80 м (пример – на рис. 4б). Хотя эти аномалии относительно невелики, но они статистически значимы – согласно [2, 4], в этих зонах с вероятностью 95 % находятся источники когерентных сигналов. Заметная аномалия наблюдается на глубине 40 м и после пробного, но перед основными сеансами работы вибратора – на 30-минутном отрезке времени, начиная с 9-часовой отметки (рис. 4б). Но на других глубинах эта аномалия отсутствует.

То, что наблюдаемые аномалии могут быть относительно устойчивыми во времени, подтверждает рис. 5, на котором приведены сечения сембланса для глубины 40 м, полученные по трем последовательным 10-минутным отрезкам записей, начиная с времени 15 ч. На всех трех сечениях наблюдаются однотипные диагональные аномалии, хотя имеются и отличия – в нижней левой четверти первого сечения и в верхней правой части последнего сечения наблюдаются аномалии, отсутствующие на двух других сечениях.

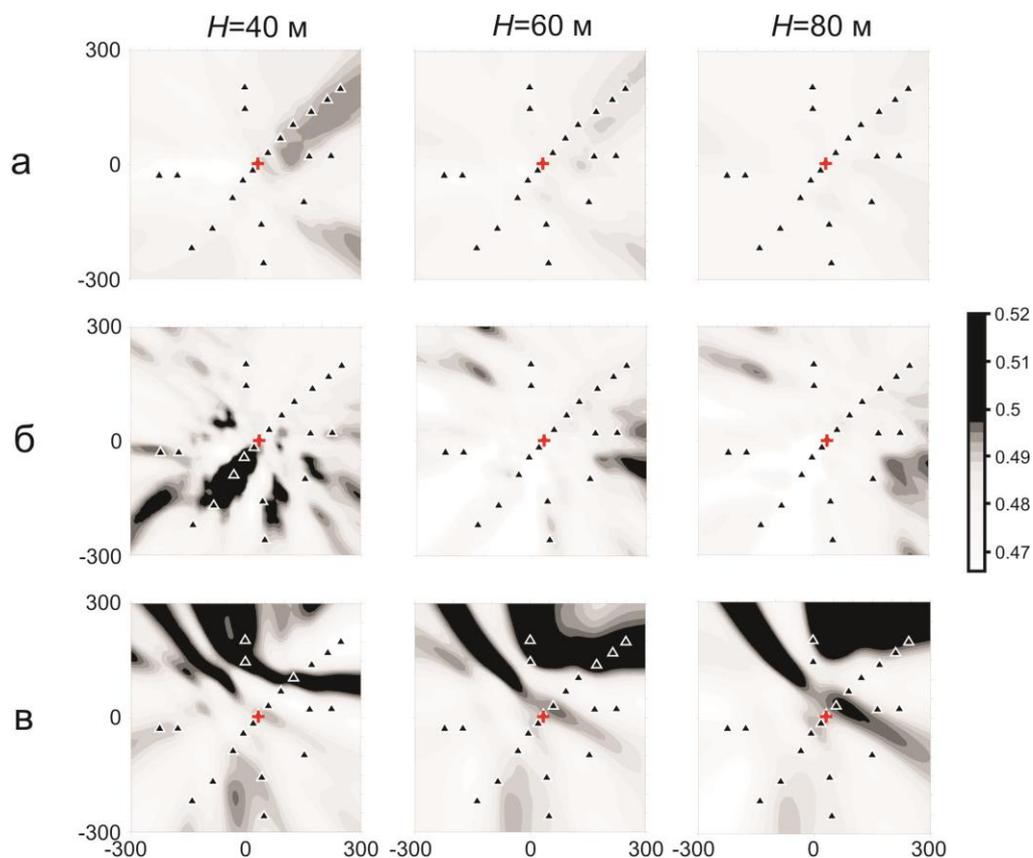


Рис. 4. Примеры горизонтальных сечений сембланса, рассчитанного для глубин 40, 60 и 80 м по 30-минутным записям микросейсм, начиная с времен от начала регистрации 1 час (а), 9 часов (б) и 19 часов (в)

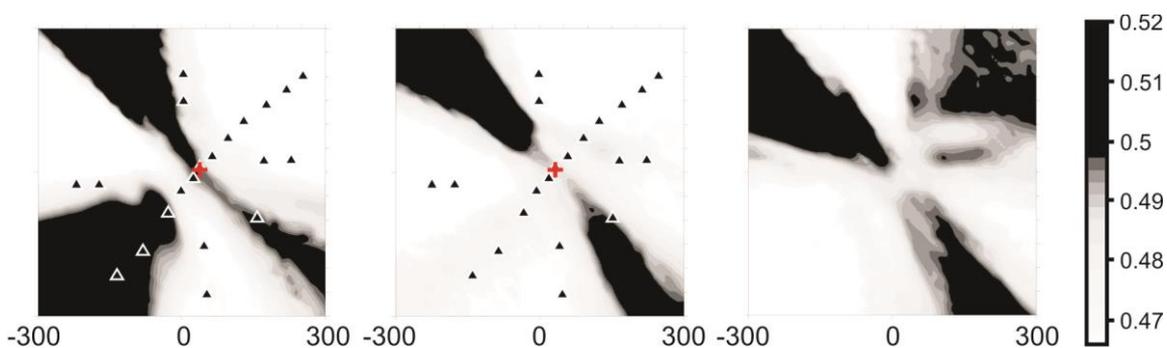


Рис. 5. Сечения сембланса, полученные по трем последовательным 10-минутным отрезкам записей, начиная со времени $t_n = 15$ ч

В целом нужно отметить, что аномальные зоны, зарегистрированные в данном эксперименте, в отличие от результатов, полученных в эксперименте 2007 г., не были локализованы в пространстве, а мигрировали от сеанса к сеансу работы вибратора. Причины этих различий предстоит выяснить при проведении дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников Ю. И., Хогоев Е. А., Хогоева Е. Е. Влияние мощных вибраций на сейсмоэмиссионные процессы в ближней зоне вибрационного источника // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы второго Всероссийского семинара-совещания (Москва, 18-21 июня 2013 г.). – М.: ГЕОС, 2013. – С. 285–291.
2. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Сеницын В. И., Чебров В. Н. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии // Физика Земли. – 2004. – № 2. – С. 66–81.
3. Хогоев Е. А., Колесников Ю. И. Применение сейсмоэмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 1. – С. 59–65.
4. Tchegotareva I. I., Nikolaev A. V., Sato H. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2000. – V. 120. – P. 167–182.

© Ю. И. Колесников, Е. А. Хогоев, В. С. Селезнев, А. А. Брыксин, 2015

РАЗДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО И ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОЛЕЙ ПРИ ПОИСКЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

Георгий Михайлович Тригубович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Феликс Моисеевич Каменецкий

Мюнхенский университет Людвига-Максимилиана, Германия, доктор технических наук, профессор, консультант по электромагнитным геофизическим методам, e-mail: kamen@geophysik.uni-muenchen.de

Антон Владимирович Чернышев

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383) 222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Александр Владимирович Куклин

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: kuklin@sniiggims.ru

Индукционные и поляризационные поля в ближней зоне источника аддитивны и различным образом зависят от размеров и/или конфигурации генераторно-измерительной установки, что позволяет разделить эти поля по результатам измерений с установками разных размеров и/или конфигурации. Приводятся примеры разделения индукционного и поляризационного сигналов на практических данных при поиске полиметаллических руд.

Ключевые слова: вызванная поляризация, становление поля, разделение полей, EM-DataProcessor, импульсные зондирования.

INDUCTION AND POLARIZATION FIELD SEPARATION IN POLYMETALLIC ORES EXPLORATION

Georgiy M. Trigubovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Professor, Supervisor of geophysical research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Felix M. Kamenetsky

Ludwig-Maximilian University of Munich, Germany, Doctor of Science, Professor (Moscow), Consultant in Geo-Electromagnetics, tel. 49 89 1406269, e-mail: kamen@geophysik.uni-muenchen.de

Anton V. Chernyshev

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Aleksandr V. Kuklin

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Leading Engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: kuklin@sniiggims.ru

Induction and polarization fields are additive in the near-zone of the transmitter and its dependence from dimension and/or configuration of transmitter-receiver system is different. This allow to separate induction and polarization fields using the results of transient soundings with different transmitter-receiver system. The examples of induction and polarization fields separation in polymetallic ores exploration are introduced.

Key words: induced polarization, transient field, field separation, EM-DataProcessor , TEM soundings.

Учёт поляризации среды неизбежно приводит к существенному увеличению числа параметров при решении обратной задачи. В результате инверсия исходных данных может оказаться невыполнимой [2, 5]. Возможным выходом из такой ситуации может стать разделение индукционного и поляризационного полей. В этом случае для индукционной части может быть использован весь арсенал ранее разработанных методов инверсии, а параллельно выделяемая поляризационная часть может дать дополнительную информацию о природе изучаемого объекта, представляющую большой интерес на этапе геологической интерпретации.

Для описания зависимости удельной электропроводности от частоты чаще всего пользуются известной формулой Cole-Cole [4]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{\infty} \left[1 - \frac{m}{1 + (1 - m)(-i\omega\tau_{IP})^c} \right] \quad (1)$$

где m – поляризуемость ($0 \leq m < 1$), τ_{IP} – время релаксации, c – степенной показатель, σ_{∞} – истинная электропроводность среды на высоких частотах, $\sigma_0 = \sigma_{\infty}(1 - m)$ – стационарная электропроводность среды на нулевой частоте.

В установке с соосными петлями сигнал в приемнике во временной области может быть представлен в виде [1, 5]:

$$V(t) = \frac{\mu_v I Q q}{2\pi} \left[\frac{(\sigma_0 \mu_v)^{3/2}}{10\sqrt{\pi}} t^{-5/2} - \frac{q_2 \sigma_{\infty} \mu_v m}{4R\tau_{IP}^2 (1 - m)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{IP}(1 - m)}\right) \right], \quad (2)$$

где $\mu_v = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, I – ток в генераторной петле, Q и q – площади генераторной и приёмной петель, R – радиус генераторной петли, q_2 – коэффициент, близкий к единице, зависящий от размеров генераторной и приёмной петель [1, 5].

Нормируем ЭДС на величину (IQq) , положим, что размер генераторной петли не изменяется, и обозначим

$$\bar{V}_{Ind} = \frac{\mu_v (\sigma_0 \mu_v)^{3/2}}{2\pi \cdot 10\sqrt{\pi}} t^{-5/2}, \quad \bar{V}_{IP} = -\frac{\mu_v \sigma_\infty \mu_v m}{2\pi \cdot 4R\tau_{IP}^2 (1-m)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{IP}(1-m)}\right). \quad (3)$$

Здесь \bar{V}_{Ind} – индукционная, а \bar{V}_{IP} – поляризационная составляющая сигнала. Тогда формулу (2) можно представить в виде:

$$\bar{V}(t) = \bar{V}_{Ind} + q_2 \bar{V}_{IP}. \quad (4)$$

Таким образом, проведя измерения дважды с различными размерами приёмной петли (сигналы с индексами 1 и 2), можно восстановить индукционный и поляризационный сигналы:

$$V_{Ind} = V_1 - k(V_1 - V_2), \quad (5)$$

$$V_{IP} = k(V_1 - V_2), \quad (6)$$

где коэффициент k определяется размерами приемных петель [1, 5].

Приведем пример разделения сигналов от простейшей модели среды – поляризующегося полупространства сопротивлением 100 Ом·м и параметрами поляризации $c=1$, $m=0.04$, $\tau=3$ мс. Во всех примерах в качестве генератора используется петля 100x100 м².

Рассмотрим разделение сигналов по измерениям совмещенной (приемник 100x100 м²) и соосной (приемник 1x1 м²) установок. Для таких установок коэффициент k в (5) и (6) равен 6,67 [1, 5]. На рис. 1 приведены регистрируемые сигналы, теоретические индукционный (от среды без ВП) и поляризационный (полученный вычитанием сигнала от среды без ВП из суммарного сигнала) сигналы, а также восстановленный по формуле (6) сигнал ВП. Все сигналы приведены к единичной площади приемника и единичному току в генераторе.

Другим подходом к разделению сигналов может являться способ, основанный на измерениях с точечным приемником в центре и вне контура генераторной петли. На рис. 2 показан результат восстановления сигнала ВП по измерениям в центре генераторной петли и на расстоянии 100 м от ее центра.

Как видно из представленных рисунков, в обоих случаях восстановленные сигналы ВП достаточно близки к теоретическим.

Экспериментальные полевые исследования методом зондирования становлением поля с петлевым источником проводились в районе Майского месторождения полиметаллов, расположенного в северо-западной части Змеиногорского района Рудного Алтая. Рудная зона приурочена к толще известковистых алевролитов и аргиллитов и характеризуется неравномерно распределённым полиметаллическим оруденением.

Размеры рудных тел составляют от 60 до 600 м, мощность рудных тел – от 0,5 до 34 м, глубина залегания – от поверхности до 230 м. Прожилковые рудные тела представлены сфалеритом и галенитом. Халькопирит и пирит имеют подчи-

ненное значение. Среднее содержание руды по месторождению: Cu – 0.43 %, Pb – 2.4 %, Zn – 5.13 %. Сопротивление руд – от 20 до 100 Ом·м. Сопротивление алевролитов – от 180 до 4000 Ом·м. Поляризуемость руд – от 0.5 % до 50 %. Вертикальный разрез по буровому профилю вкрест простирания рудных тел показан на рис. 3.

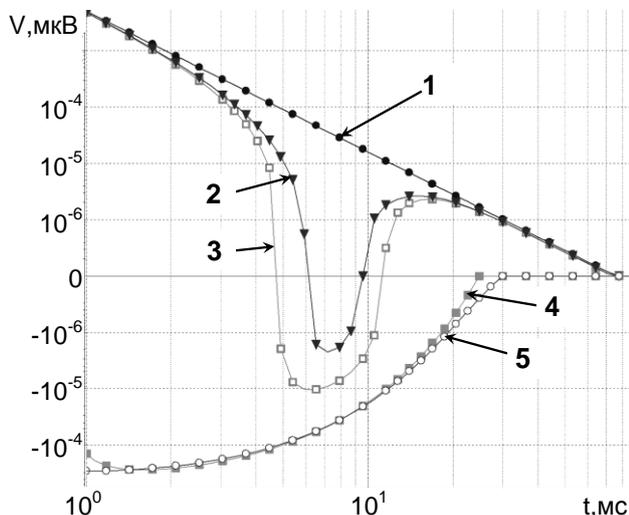


Рис. 1. Разделение сигналов для совмещенной установки:

- 1 – индукционный сигнал;
- 2 – сигнал в совмещенном приемнике;
- 3 – сигнал в точечном приемнике;
- 4 – восстановленный сигнал ВП;
- 5 – теоретический сигнал ВП

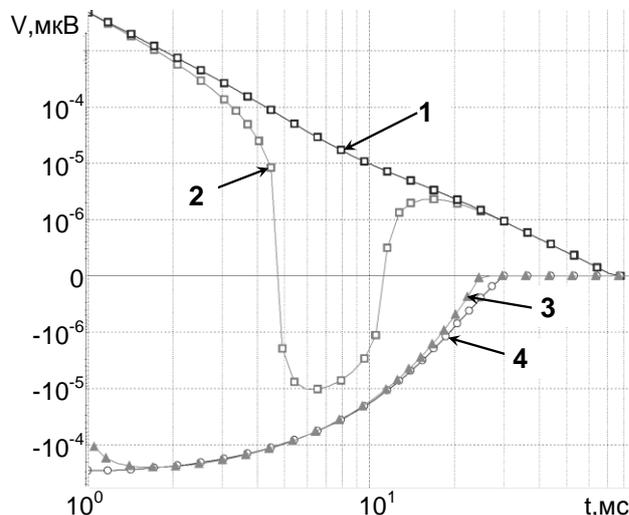


Рис. 2. Разделение сигналов для разнесенной установки:

- 1 – сигнал в выносном приемнике;
- 2 – сигнал в центральном приемнике;
- 3 – восстановленный сигнал ВП;
- 4 – теоретический сигнал ВП

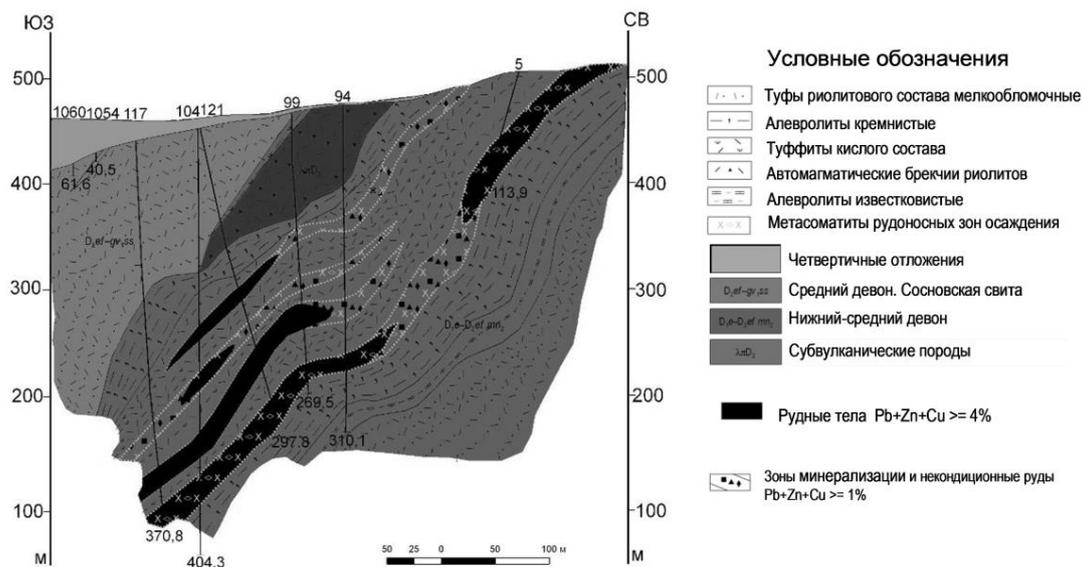


Рис. 3. Геологический разрез по буровому профилю месторождения Майское

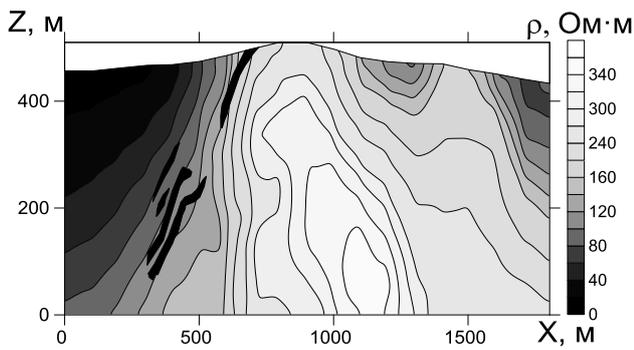


Рис. 4. Вертикальный разрез кажущегося сопротивления, полученный по индукционной составляющей сигнала

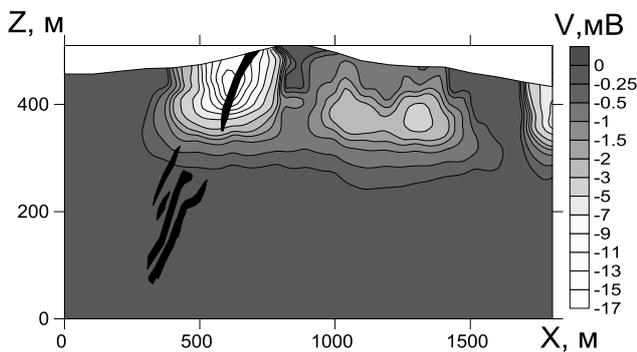


Рис. 5. Вертикальный разрез выделенного сигнала ВП

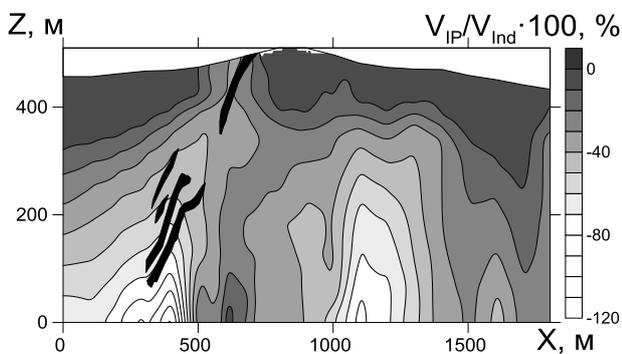


Рис. 6. Вертикальный разрез нормированного сигнала ВП

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность изучения зон вызванной поляризации, связанных с полиметаллическим оруденением. На примере исследований с петлями $100 \times 100 \text{ м}^2$ в пределах Майского месторождения показано, что зоны ВП, полученные в результате разделения сигналов, достаточно хорошо коррелируют с пространственным положением известных рудных тел.

Измерения проводились компактными датчиками $1 \times 1 \text{ м}^2$ внутри и вне генераторных петель с размерами $100 \times 100 \text{ м}^2$. Результаты разделения индукционного и поляризационного полей, проведенного в программе EM-DataProcessor [3], приведены на рис. 4–6.

На рис. 4 представлен вертикальный разрез кажущегося удельного сопротивления по буровому профилю, построенный по индукционной составляющей сигнала. Как видно из этого рисунка, рудные тела в разрезе локализируются в зоне влияния выклинивающихся четвертичных отложений и алевролитов и практически не проявляются в индукционных сигналах.

На рис. 5 представлен разрез выделенного сигнала ВП в зависимости от глубины зондирования, вычисленной для соответствующих времен по индукционному сигналу. Как видно из этого рисунка, верхнее рудное тело отмечается достаточно широкой зоной ВП, которая, затухая, продолжается в высокоомную часть разреза, полученную по индукционным сигналам.

На рис. 6 представлен разрез сигнала ВП (V_{IP}), нормированный на восстановленный индукционный сигнал (V_{Ind}) на соответствующих значениях времени: $V_{IP}/V_{Ind} \cdot 100\%$. На этом разрезе известные рудные тела хорошо коррелируются с пространственным положением относительной аномалии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каменецкий Ф. М., Тимофеев В. М. О возможности разделения индукционных и поляризационных эффектов // Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1984. - № 12. - С. 89–94.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учётом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. - 2009. - Т. 50, № 2. - С. 181–190.
3. Тригубович Г.М., Чернышев А.В., Куклин А.В., Ковальский Я.Ф., Сверкунов А.С. EM-DataProcessor: оперативная 3D-инверсия данных импульсной индуктивной электроразведки // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. - Т. 2, № 3. - С. 95–101.
4. Dias, C. A. Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks // Geophysics. - 2000. - 65. - P. 437–451.
5. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Three lectures on geological medium induced polarization. L-M University of Munich, Vela Verlag. - 2014. - 56 p. ISBN: 978-3-941352-65-0

© Г. М. Тригубович, Ф. М. Каменецкий, А. В. Чернышев, А. В. Куклин, 2015

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО АФТЕРШОКОВЫМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ НА ТЯНЬ-ШАНЕ

Ольга Анатольевна Кучай

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-05, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Мария Евгеньевна Козина

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант 1 курса, тел. (383)330-87-05, e-mail: kozinamaria@gmail.com

Зоя Арслановна Кальметьева

Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, 720027, Киргизия, г. Бишкек, ул. Т. Фрунзе, 73/2, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (996)312-555-111, e-mail: caiag@caiag.kg

Восстановлены поля напряжений афтершоковых последовательностей трех сильных землетрясений Тянь-Шаня по данным механизмов очагов повторных событий. Ориентация осей максимального девиаторного сжатия и растяжения по афтершоковым последовательностям более высокого уровня энергий наследует ориентацию осей механизмов очагов главных событий. По афтершоковым процессам низкого магнитудного уровня отмечается меньшая упорядоченность в ориентации осей главных напряжений.

Ключевые слова: землетрясение, афтершок, напряжение, деформации, Тянь-Шань.

STRESS FIELD AFTERSHOCK SEQUENCE OF THE TIEN SHAN

Olga A. Kuchai

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-87-05, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Maria E. Kozina

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogov St., 1 undergraduate course, tel. (383)330-87-05, e-mail: kozinamaria@gmail.com

Zoya A. Kalmetieva

Central Asian Institute for Applied Geosciences, 720027, Kyrgyzstan, Bishkek, 73/2 T. Frunze St., Ph. D., Senior Researcher, tel. (996)312-555-111, e-mail: caiag@caiag.kg

Restored the stress field of aftershock sequences of three strong earthquakes Tien Shan according to focal mechanisms of repeated events. The orientation of the maximum deviatoric compression and tension on the aftershock sequences of a higher energy level inherits the orientation of the axes of focal mechanisms of the main events. By aftershocks of the magnitude of low level have lower order in the orientation of the main stress axes.

Key words: earthquake, aftershock, stress, deformations, Tianshan.

Памиро-Тянь-Шаньский регион – высокоактивная сейсмическая область внутриконтинентальных орогенов. Появление в последние годы дополнительных материалов по данным механизмов очагов землетрясений позволило восстановить поле напряжений как всего района в целом, так и эпицентральных областей сильных землетрясений [1, 2], используя метод Ю.Л. Ребецкого [3]. В настоящей работе анализируются особенности реконструкции ориентации главных осей напряжений, тип напряженного состояния (взаимосвязь между направлением вектора на зенит и ориентацией главных осей напряжений) и коэффициент Лоде-Надаи (μ_σ). На начальном этапе каталог параметров механизмов очагов для Тянь-Шаня создавался под руководством С.Л. Юнги, далее дополнялся данными из сборников «Землетрясения в СССР» и «Землетрясения Евразии».

Реконструируемое нами поле напряжений Тянь-Шаня по сильным ($4.6 < M < 7.4$) землетрясениям показывает, что ориентация осей максимальных девиаторных напряжений сжатия – близгоризонтальная и субмеридиональная. Положение осей максимальных девиаторных напряжений растяжения меняется от субширотного до СВ направления.

Для восстановления напряженного состояния земной коры по повторным событиям трех сильнейших землетрясений использовались механизмы 62 афтершоков Жаланаш-Тюпского 25 марта 1978г. ($M_s=7.1$, $\varphi=42.87^\circ$, $\lambda=78.58^\circ$, март 1978 г.–сентябрь 1978 г.), 132 Суусамырского 19 августа 1992 г. ($M_s=7.4$, $\varphi=42.07^\circ$, $\lambda=73.63^\circ$, август 1992 г.–декабрь 1997 г.) и 117 Нуринского землетрясений 5 октября 2008 г. ($M_s=6.9$, $\varphi=39.37^\circ$, $\lambda=73.40^\circ$, октябрь 2008 г.–июнь 2009 г.). Процент определенных механизмов афтершоков Жаланаш-Тюпского события с $M = 4.4$ к общему количеству повторных толчков с этими же магнитудами, составляет 100 % и с $M = 1.7 - 4.0 - 46$ %, Суусамырского с $M=4.4-6.7 - 89$ %, с $M=3.3 - 4.3 - 45$ %, с $M=1.7-2.8 - 12$ %.

Прежде чем рассматривать напряженное состояние очаговой области по счет повторных толчков, проанализируем сейсмотектонические деформации (СТД) по методу Ю.В. Ризниченко [4], рассчитанные до возникновения вышеперечисленных сильных событий. Для этого исследуем область начала вспарывания очагов сильных событий в поле диагональных (широтных, меридиональных и вертикальных) компонент тензора СТД. Деформации, накопленные не менее чем за 40 лет до Нуринского землетрясения, показывают, что процесс разрывообразования начался в очаге в пределах условной границы, разделяющей положительные и отрицательные значения широтной, меридиональной и вертикальной компонент СТД. Во временной период, длящийся 14 лет до Жаланаш-Тюпского землетрясения, поля компонент СТД (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}) достаточно однородные в области подготовки этого сильного события. Суусамырское землетрясение произошло в районе очень слабой сейсмичности.

Механизм очага Жаланаш-Тюпского землетрясения – сдвиго-надвиговый [5]. Нодальная плоскость западно-северо-западного простириания соответствует вытянутости изосейст бальности и распределению афтершоков вдоль этой плос-

кости. Направление подвижки по ней осуществляется в северо-северо-западном направлении. Субмеридиональная ось сжатия – близгоризонтальна, ось растяжения – близвертикальна. Реконструкция ориентации осей максимальных девиаторных напряжений по повторным толчкам с $M > 3$ позволяет говорить о согласованности в азимутальной ориентации оси сжатия главного события и осей максимальных девиаторных напряжений повторных толчков. Значения коэффициента Лоде-Надаи μ_σ изменяется от -0.6 до +0.8. Тип напряженного состояния соответствует сжатию со сдвигом (рис. 1). По более слабым афтершокам ($M < 3$) к востоку от эпицентра ориентация осей сохраняется, в западной части афтершоковой области оси сжатия приобретают СВВ направление с погружением к северу, оси растяжения становятся близвертикальными. Значения коэффициента μ_σ к западу от эпицентра – отрицательные, к востоку – положительные. Тип напряженного состояния – преимущественно сжатие (рис. 1).

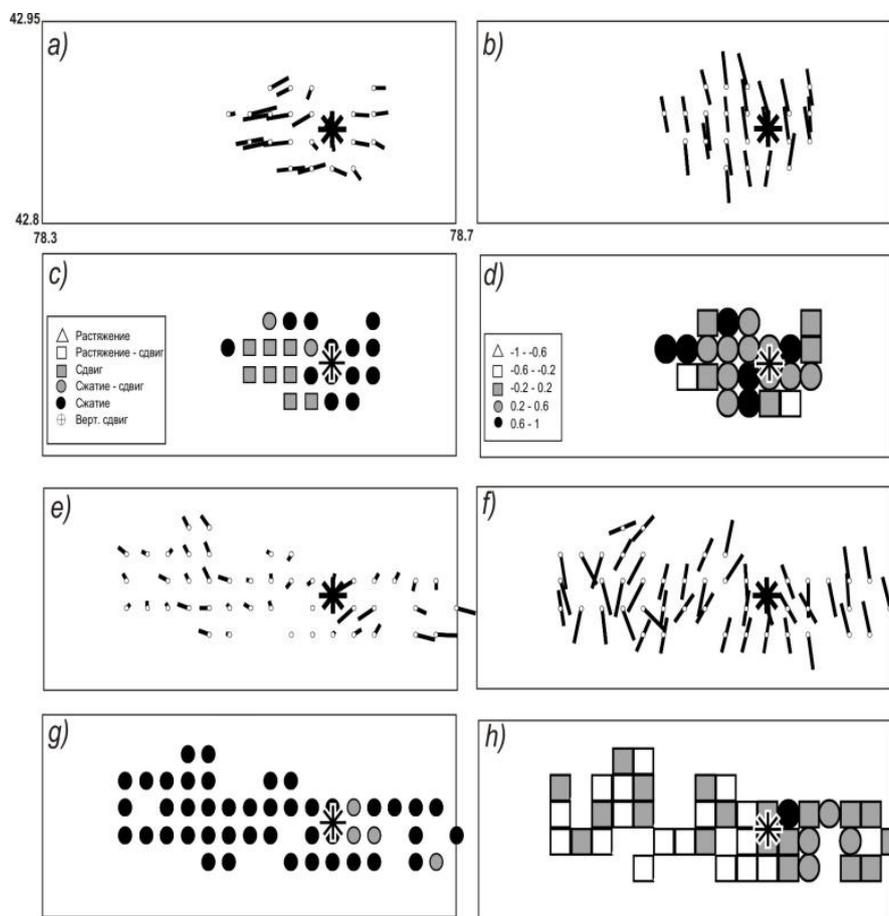


Рис. 1. Проекция на горизонтальную плоскость осей максимального девиаторного напряжения, восстановленные по данным механизмов афтершоков Жаланаш-Тюбского землетрясения ($M \geq 3.0$ – a, b, c, d) и ($M < 3.0$ – e, f, g, h), a, e – положение осей максимальных девиаторных напряжений растяжения, b, f – положение осей максимальных девиаторных напряжений сжатия. Направление погружения осей – из точки. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Типы напряженного состояния – c, g, коэффициент Лоде-Надаи – h

Механизм очага Суусамырского землетрясения – надвиговый с небольшой сдвиговой составляющей. Смещение в очаге произошло в северо-северо-западном направлении. Обе возможные нодальные плоскости простираются субширотно, что подтверждается простираем двух участков разрыва, вышедших на поверхность [6]. Положение оси сжатия – субмеридиональное и близгоризонтальное, оси растяжения – близвертикальное. Поле напряжений реконструировалось для повторных толчков слабых ($M=1.7-2.9$), умеренных ($M=3.0-6,6$) и сильных событий. Оси максимальных девиаторных напряжений по механизмам афтершоков с $M>3.0$ и $M>4.5$ свидетельствуют о ССЗ сжатия и соответствуют азимуту оси Р механизма главного землетрясения. Ориентация осей максимальных девиаторных напряжений растяжения – субширотное с погружением к западу, на востоке от эпицентра главного толчка – к юго-западу. Преимущественные направления напряжений растяжения характеризуют региональное поле и согласуются с тектонической обстановкой в регионе. Коэффициент μ_{σ} имеет пределы от -0.2 до $+0.4$. Тип напряженного состояния близок к горизонтальному сжатию, но в отдельных участках земной коры наблюдается горизонтальное растяжение. По слабым афтершокам ориентация осей сжатия сохраняет направление, но на некоторых участках становится субширотной. Положение осей растяжения меняется от субширотного до СЗ направления (рис. 2).

Механизм очага Нуринского события – надвиговый, обе возможные плоскости разрыва близки к широтному простираению структур, близгоризонтальная ось сжатия имеет субмеридиональное положение, ось растяжения – близвертикальна. Оси сжатия сохраняют ориентацию и направление падения, проявленные в очаге главного события за счет слабых и умеренных повторных толчков. Восстановленные оси растяжения по сильным афтершокам сохраняют субширотную ориентацию, по слабым наблюдается близширотное, СЗ и СВ простираем. Коэффициент μ_{σ} принимает значения от -0.4 до $+0.8$. Тип напряженного состояния вблизи территории, оконтуривающей начало вспарывания в очаге, соответствует горизонтальному сжатию со сдвигом, для остальной области характерны вертикальный сдвиг и сжатие.

Таким образом, процесс начала разрывообразования в каждом из трех сильных землетрясений происходил в разных сеймотектонических условиях. В то же время в каждом из этих очагов наряду с надвиговой имеется и небольшая право-сдвиговая составляющая, т. е. направление распространения разрыва осуществляется к северо-северо-западу. В условиях меридионального сжатия Тянь-Шаня поля напряжений афтершоковых последовательностей по сильным повторным толчкам наследуют ориентацию осей механизмов очагов главных событий. Полученная ориентация осей максимального девиаторного сжатия и растяжения по очагам слабых афтершоков демонстрирует меньшую упорядоченность по мере уменьшения магнитуд сейсмических событий.

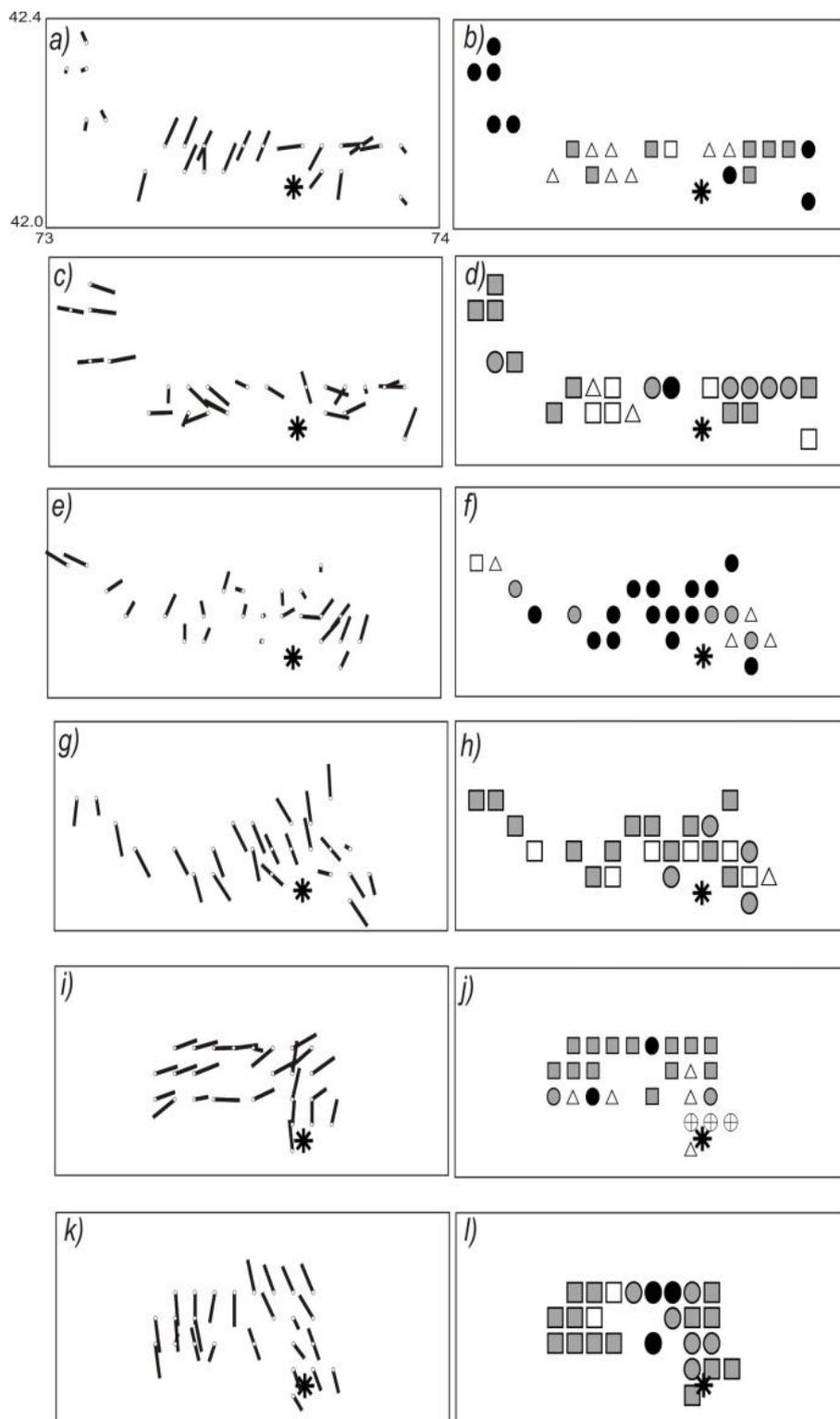


Рис. 2. Проекция на горизонтальную плоскость осей максимального девиаторного напряжения, восстановленные по данным механизмов афтершоков Суусамырского землетрясения ($3.0 > M \geq 1.7$ – a,b,c,d), ($4.5 > M \geq 3.0$ – e,f,g,h), ($6.6 > M \geq 4.5$ – i,j,k,l), a, e, i – положение осей максимальных девиаторных напряжений растяжения, c, g, k, – положение осей максимальных девиаторных напряжений сжатия. Типы напряженного состояния – b, f, j и коэффициент Лоде-Надаи – d, h, l. Обозначения те же, что на рис. 1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучай О.А. Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области // Геодинамика и тектонофизика. - 2012. - Т. 3, № 1. - С. 59–68. - URL: <http://www.crust.irk.ru/gt/index>
2. Лескова Е.В., Еманов А.А. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика. - 2013. - Т. 54, №1.
3. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 406 с.
4. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. - М.: Наука, 1985. - 408 с.
5. Жаланаш-Тюпское землетрясение 25 марта 1978 года. - Алма-Ата: Наука, 1981. - 136 с.
6. Богачкин Б.М., Плетнев К.Г., Рогожин Е.А. Суусамырское землетрясение 1992 г. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии: материалы геологического и сейсмологического изучения в ближней зоне. Вып.1. - М.: ИФЗ РАН, 1993. - С. 143–147.

© О. А. Кучай, М. Е. Козина, З. А. Кальметьева, 2015

О ПРИЧИНЕ АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СЕЙСМОЛОГА

Виктор Сергеевич Селезнев

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Алексей Владимирович Лисейкин

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Павел Владимирович Громыко

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, геофизик, тел. (383)333-20-21, e-mail: psharak@ngs.ru

Анализируются колебания, полученные на сейсмической станции «Черемушки», расположенной в 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, в плотине и машинном зале ГЭС до и после аварии 17 августа 2009 г. Предполагается, что причиной разрушения шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата №2 явилась длительная работа под воздействием высокочастотных вибраций, неучтенных при конструировании.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС, сейсмостанция, авария, колебания.

ABOUT THE CAUSE OF THE ACCIDENT AT SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP: THE SEISMOLOGIST'S POINT OF VIEW

Victor S. Seleznev

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Aleksey V. Liseikin

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Geophysicist, tel. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Alexey A. Bryksin

Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Pavel V. Gromiko

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prosocet, Geophysicist, tel. (383)330-20-21, e-mail: psharak@ngs.ru

The seismic data recorded at the seismic station "Cheryomushki" (located 4 km from the power plant), a dam and hydroelectric turbine hall before and after the accident on August 17, 2009 are analyzed. It is assumed that the cause of the destruction of mounting studs of turbine covers hydroelectric №2 was the long-term operation under the influence of high frequency vibrations, unrecorded in the design.

Key words: Sayano-Shushenskaya HPP, seismic station, accident, fluctuations.

В августе 2009 г. произошла крупнейшая из всех, произошедших когда-либо на гидростанциях в России, авария. На Саяно-Шушенской ГЭС погибло 75 человек, вышли из строя все 10 гидроагрегатов общей мощностью в 6400 МВт. Уже на второй день после аварии один из авторов статьи был на ГЭС и принял участие в работе правительственной комиссии по расследованию причин аварии. В средствах массовой информации много писали о различных версиях аварии. Комиссия установила, что причина аварии – "разрушение шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата №2, вызванное дополнительными динамическими нагрузками переменного характера, которому предшествовало образование и развитие усталостных повреждений узлов крепления, что привело к срыву крышки и затоплению машинного зала станции" [1]. Мы попытаемся, опираясь на данные, полученные во время и до момента аварии на сейсмостанции «Черемушки» (CERR), находящейся в 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, и на данные, которые были получены в процессе запуска гидроагрегатов после аварии, разобраться, в чем причина трагедии, и выяснить, откуда появились "дополнительные динамические нагрузки".

Прежде надо понять, существует ли физически такая возможность. У нас имеются записи колебаний различных механизмов, работающих на гидростанции, зарегистрированные на расстоянии примерно в 100 длин волн на фоне помех. Аналогичная задача, в возможность решения которой ни у кого нет сомнения, – это описание звучания оркестра на расстоянии в 30–50 м. Примерно такую же информацию пишет и сейсмологическая станция, соединенная с трехкомпонентным сейсмоприемником. Частоты, так же, как и расстояния, отличаются примерно на 2 порядка.

После аварии начали запускать как гидроагрегаты «старой» конструкции, которые были на ГЭС до аварии, так и «новой» конструкции. Данные, полученные с временных сейсмических станций, установленных вблизи гидроагрегатов и на сейсмостанции «Черемушки», позволили установить, что работающий гидроагрегат излучает набор монохроматических частот, кратных частоте вращения. Их амплитуда значительно меняется при различных режимах работы гидроагрегата, и некоторые гармоники (прежде всего на оборотной частоте, равной 2,38 Гц, и лопастной – 38,10 Гц) хорошо регистрируются на сейсмостанции (рис.1). Изучение полученных данных позволило выявить связи между изменениями амплитуд монохроматических сигналов и параметрами работы гидроагрегатов. Кроме монохроматических колебаний, на станции «Черемушки» регистрируются и колебания, источником которых являются собственные колебания плотины [2].

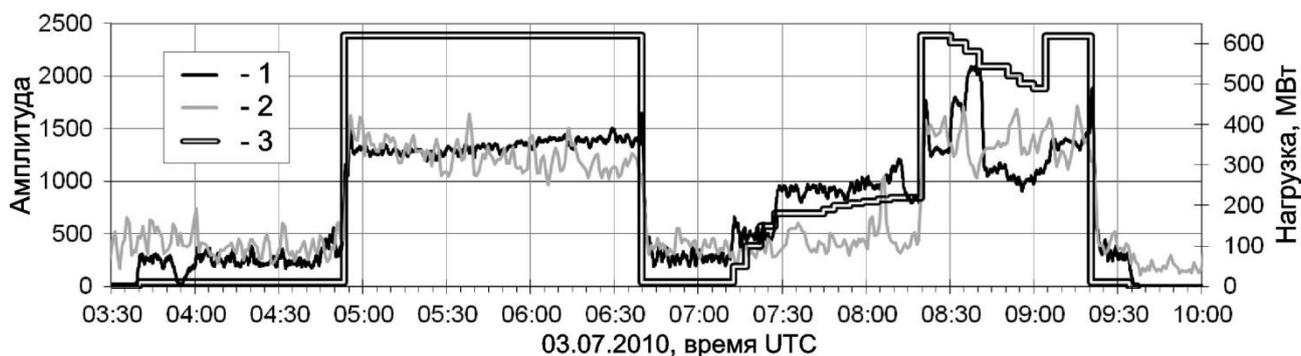


Рис. 1. Пример связи изменений режима работы ГЭС с регистрируемыми сейсмическими колебаниями. 1, 2 – изменения амплитуд колебаний на частоте 38.1 Гц, зарегистрированных на Z-канале в основании плотины и на станции «Черемушки» соответственно, 1 – в $\mu\text{м}/\text{с}^2$, 2 – то же с увеличением в 1 500 раз; 3 – изменение нагрузки гидроагрегата № 6

Многие исследователи считали, что причиной разрыва шпилек был гидроудар. Однако после анализа записей с сейсмостанции «Черемушки» в работах [3, 4] было показано, что гидроудара, способного разрушить шпильки и «выбросить» гидроагрегат весом около 150 тонн, в момент аварии не было. Вместе с тем из анализа последствий аварии, по отметкам на колонне машинного зала, известно, что гидроагрегат в момент инцидента поднимался на высоту не менее 12 м (рис. 2а). Такое возможно только в том случае, если бы этот процесс происходил достаточно медленно. Попробуем разобраться в этом вопросе с помощью записей, полученных на сейсмостанциях, установленных в теле плотины, и определить, были ли зарегистрированы низкочастотные мощные колебания в момент аварии. Частотный диапазон установленных в теле плотины станций – 1–50 Гц, но даже в этом случае мощные низкочастотные колебания должны выделяться. Мы проделали следующий лабораторный эксперимент: на платформу поместили сейсмоприемники (горизонтальная X-компонента) и произвели медленное движение платформы (в течение 10–15 секунд) в одном направлении на расстояние 0.2 м и затем в обратном, с возвращением в исходное положение. Полученную сейсмическую запись отфильтровали НЧ-фильтром 0.05 Гц (рис. 2б). Из рисунка видно, что такое медленное, но высокоамплитудное движение выделяется на записях сейсмоприемниками, собственная частота которых 1 и 10 Гц. Затем аналогичная процедура фильтрации была проделана с записями сейсмостанций, установленных в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 2в). Из этих данных можно сделать вывод, что гидроагрегат поднимался более 10 с. Именно поэтому на сейсмостанции «Черемушки» не видно записи с большими амплитудами.

Изучение колебаний крышек турбин гидроагрегатов и агрегатных блоков показал следующее. На рис. 3 представлено сравнение спектров колебаний, зарегистрированных на гидроагрегатах двух типов: №3 – старой конструкции, аналогичной конструкции гидроагрегата № 2, на котором произошла авария,

и №9 – новой конструкции, той же мощности, но с улучшенными характеристиками в плане надежности и безопасности. Рис. 3а описывает колебания бетонных агрегатных блоков (на расстоянии около 30 м от оси гидроагрегатов), рис. 3б – колебания крышки турбины. Оба гидроагрегата работали с максимальной нагрузкой 640 МВт. Из рисунка видно, что амплитуды колебаний, соответствующие гидроагрегату №3, существенно выше, чем соответствующие 9-му. Кроме этого, спектры значительно различаются наличием у гидроагрегата старой конструкции большого числа монохроматических высокочастотных сигналов (частота каждого из них кратна частоте вращения гидроагрегата), которые отсутствуют при регистрации на гидроагрегате новой конструкции. Получается, что крышка турбины и шпильки, которые ее крепят, при работе гидроагрегата находились в состоянии постоянного воздействия высокочастотных вибраций. Так как второй гидроагрегат был устроен таким образом, что излучаемые им колебания превышали колебания на остальных агрегатах [4], возможно, из-за этого на нем и произошла авария. Осмотр шпилек с других гидроагрегатов после аварии показал, что некоторые из них также были в аварийном состоянии (с большим количеством усталостных дефектов).

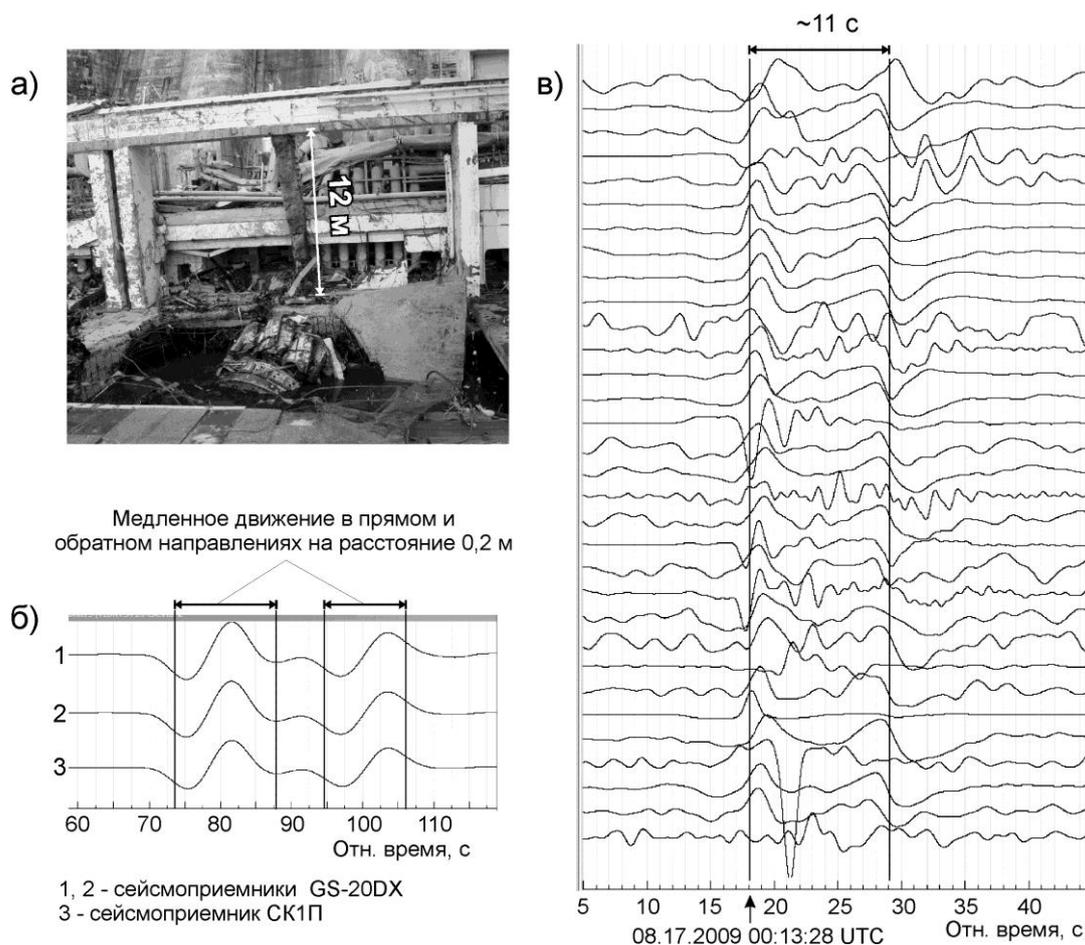


Рис. 2. Анализ записей момента аварии на сеймостанциях, установленных в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС: (а) – фотография машинного зала после аварии; (б) – моделирование записи медленных движений; (в) – сейсмические записи в различных точках плотины

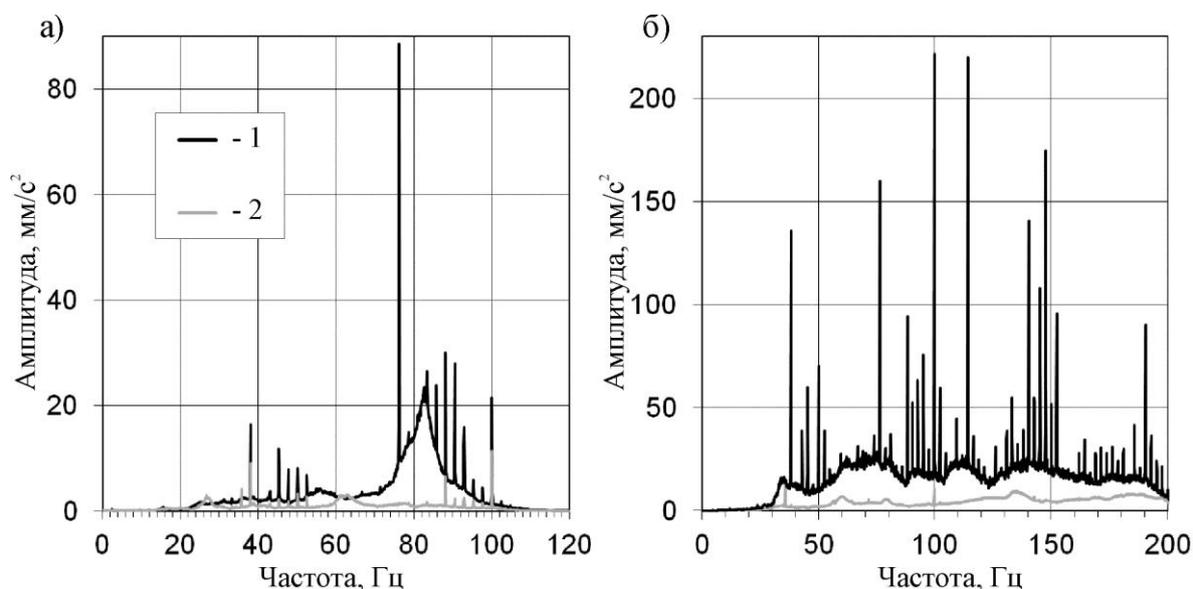


Рис. 3. Спектры радиальных колебаний, зарегистрированных на агрегатных блоках (а) и на крышках турбин (б) при работе гидроагрегатов под нагрузкой 600–640 МВт. 1, 2 – гидроагрегаты старой и новой конструкции соответственно

Разумеется, колебания крышки были не очень большие и не превышали нормативных уставок, но они длились годами. Особенно сильное воздействие возникло, когда на части шпилек произошло ослабление затяжки. Мельчайшие зазоры привели к увеличению динамического воздействия на шпильки, и наступил момент, когда они начали разрушаться.

Таким образом, можно предположить, что истинная причина аварии связана с тем, что при расчете крепления крышки турбины не был учтен тот факт, что она будет работать в состоянии длительного воздействия высокочастотных вибраций. На созданных новых гидроагрегатах количество шпилек было увеличено и амплитуда монохроматических колебаний значительно снижена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акт технического расследования аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного». Федеральная служба по экономическому, технологическому и атомному надзору, 2009.
2. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. - 2013. - №7. - С.2–7.
3. Victor S. Seleznev, Alexey V. Liseikin, Alexey A. Bryksin, and Pavel V. Gromyko. What Caused the Accident at the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant (SSHPP): A Seismologist's Point of View // Seismological Research Letters. - 2014. - V. 85. - P. 817–824.
4. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громыко П.В. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г.? // Гидротехническое строительство. - 2012. - № 10. - С.48–50.

© В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, А. А. Брыксин, П. В. Громыко, 2015

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ НА СТРУКТУРУ ЗОНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Александр Игоревич Макаров

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: alexanderi.makarov@bakerhughes.com

Александр Викторович Серяков

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: alexander.seryakov@bakerhughes.com

Олег Борисович Боcharов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: oleg.bocharov@bakerhughes.com

Проникновение фильтрата бурового раствора в процессе вскрытия коллектора сопровождается образованием слабопроницаемой глинистой корки на стенке скважины, которая значительно замедляет фильтрационный процесс. При этом начинает сильнее сказываться гравитационный эффект, связанный с разностью плотности пластовой нефти и фильтрата бурового раствора. В данной работе на основе двумерного фильтрационного и электромагнитного моделирования высокопроницаемого пласта показано влияние гравитационных сил на структуру зоны проникновения и измерения электрического каротажа, а также приведены оценки, когда такое влияние существенно.

Ключевые слова: двухфазное фильтрационное моделирование, зона проникновения, корка бурового раствора, гравитационный эффект, электрический каротаж.

GRAVITY EFFECT ON THE INVASION ZONE STRUCTURE AND RESISTIVITY LOG DATA

Alexander I. Makarov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: alexanderi.makarov@bakerhughes.com

Alexander V. Seryakov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: alexander.seryakov@bakerhughes.com

Oleg B. Bocharov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, Russia, 630128, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: oleg.bocharov@bakerhughes.com

Mud filtrate penetration into a reservoir formation while drilling is accompanied by the build up of thin low-permeable mudcake on the borehole wall, which significantly slows the invasion

process. In this case a gravity effect related to the density difference of the mud filtrate and the formation oil become more appreciable. In our study we estimated the conditions at which the gravity effect can be have a significant effect on the invasion zone structure and the resistivity logging data. For this purpose we used a two-dimensional invasion simulation and forward electromagnetic modeling of laterolog tool signals.

Key words: two-phase filtration simulation, invasion zone, mudcake, gravity effect, laterolog.

В процессе бурения нефте- и водонасыщенных проницаемых песчаников под воздействием превышения давления в скважине над поровым давлением происходит внедрение фильтрата бурового раствора в пласт, что приводит к вытеснению пластовых флюидов из прискважинной области вглубь формации. Процесс формирования зоны проникновения сопровождается образованием–слабопроницаемой глинистой корки на стенке скважины, которая замедляет фильтрацию через контур скважины. На фоне замедления процесса проникновения начинает сказываться гравитационный эффект, связанный с разностью плотности пластовой нефти и фильтрата бурового раствора.

Это вызывает движение фильтрата бурового раствора в вертикальном направлении к подошве пласта. Длительное воздействие гравитационных сил может привести к перераспределению флюидов, при котором глубина зоны проникновения станет неоднородной по вертикали и значительно увеличится у подошвы пласта. При этом глубинность исследования электромагнитного каротажа может не позволить охватить всю зону внедрения. Это может привести к неверной интерпретации электромагнитных измерений, а следовательно, и к неправильной оценке значений пластовой пористости и нефтенасыщенности.

В данной статье на основе фильтрационного и электромагнитного моделирования определены условия, при которых эффект гравитационных сил скажется на структуре зоны проникновения и на измерениях электромагнитного каротажа. Для фильтрационного моделирования процесса формирования зоны проникновения использовалась двумерная осесимметричная модель Баклея-Левретта [1, 2] с учетом роста глинистой корки, скорости бурения интервала пласта, режима бурения скважины и гравитационного эффекта.

Для анализа влияния эффекта гравитационных сил рассмотрен однородный высокопроницаемый пласт мощностью 15 м, залегающий между непроницаемыми глинистыми сланцевыми прослоями с бесконечной мощностью. Свойства пласта и режим бурения, необходимые для моделирования, представлены в табл. 1.

На их основе рассчитываются распределения водонасыщенности и концентрации соли на интервале коллектора на заданный момент времени. Эти результаты используются для расчета распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) с использованием формулы Арчи [3].

Входные параметры для моделирования
формирования зоны проникновения

Группа	Параметр	Значение
Свойства пласта	Абсолютная проницаемость	6000 мД
	Константы фазовых проницаемостей воды и нефти	2.0, 3.0
	Пористость	25 %
	Начальная водонасыщенность	10 %
	Остаточная нефтенасыщенность	10 %
	Температура	80 °С
	Давление	200 атм
Свойства флюидов	Вязкость водной фазы	0.3 сП
	Вязкость пластовой нефти	3.0 сП
	Плотность пластовой нефти	0.8 г/см ³
	Сопротивление бурового раствора	0.1 Ом·м
	Сопротивление пластовой воды	0.05 Ом·м
	Плотность фильтрата бурового раствора	1.0 г/см ³
Параметры бурения	Время с момента вскрытия коллектора	6, 12, 30 суток
	Проницаемость глинистой корки	0.001 мД
	Превышение давления в скважине над пластовым в процессе бурения	40 атм
	Превышение давления в скважине над пластовым в период гидростатического воздействия	20 атм
	Продолжительность бурения	1 сутки
	Скорость бурения скважины	5 км/ч
	Радиус скважины	0.108 м

На рис. 1 приведены результаты моделирования: распределение водонасыщенности и УЭС в прискважинной области на момент времени 6 суток после вскрытия пласта. К этому моменту фильтрационное сопротивление глинистой корки практически полностью изолирует формацию, заниженные значения водонасыщенности на уровне кровли пласта, на расстоянии 0.5–1.5 м, свидетельствуют о проявлении эффекта гравитационных сил, наблюдается повышение глубины зоны проникновения с 1.2 до 1.4 м на интервале хх03 – хх14 м. Рассчитанные распределения УЭС используются для моделирования измерений бокового электрического каротажа. Для этого рассматривается двумерная осе-

симметричная геоэлектрическая модель с произвольным количеством зон, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, в рамках которой рассчитываются синтетические измерения бокового каротажного (БК) зондирования, которые приведены на рис. 1 в правой колонке. В ней представлены 4 измерения кажущихся электросопротивлений, сфокусированных на глубинах исследования 9, 13, 19, 50 дюймов.

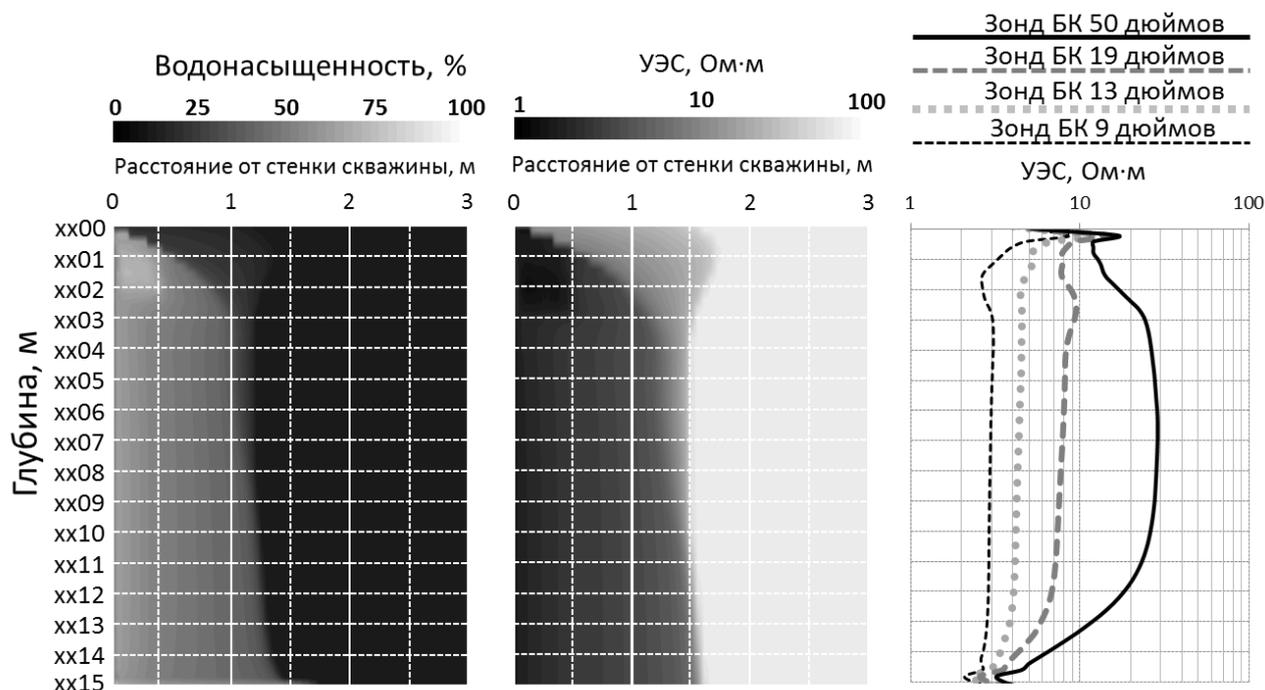


Рис. 1. Распределения водонасыщенности и УЭС, полученные в результате моделирования; синтетические измерения бокового каротажного зондирования на интервале коллектора спустя 6 суток после вскрытия пласта

На рис. 2 приведены распределения водонасыщенности и УЭС, полученные в результате моделирования на момент времени 12 суток после бурения. Наблюдается смещение фильтрата бурового раствора ближе к подошве пласта.

Также на рис. 2 приведены синтетические измерения кажущихся электросопротивлений, сфокусированных на глубинах исследования 9, 13, 19, 50 дюймов, рассчитанные на основе распределения электросопротивления, полученного в результате фильтрационного моделирования. Наблюдается повышение измерений кажущихся электросопротивлений на интервале xx00–xx02 м, что вызвано смещением фильтрата бурового раствора под действием гравитационных сил. Также наблюдается снижение значений, кажущихся электросопротивление при приближении к подошве коллектора, что объясняется скапливанием фильтрата бурового раствора на непроницаемой границе.

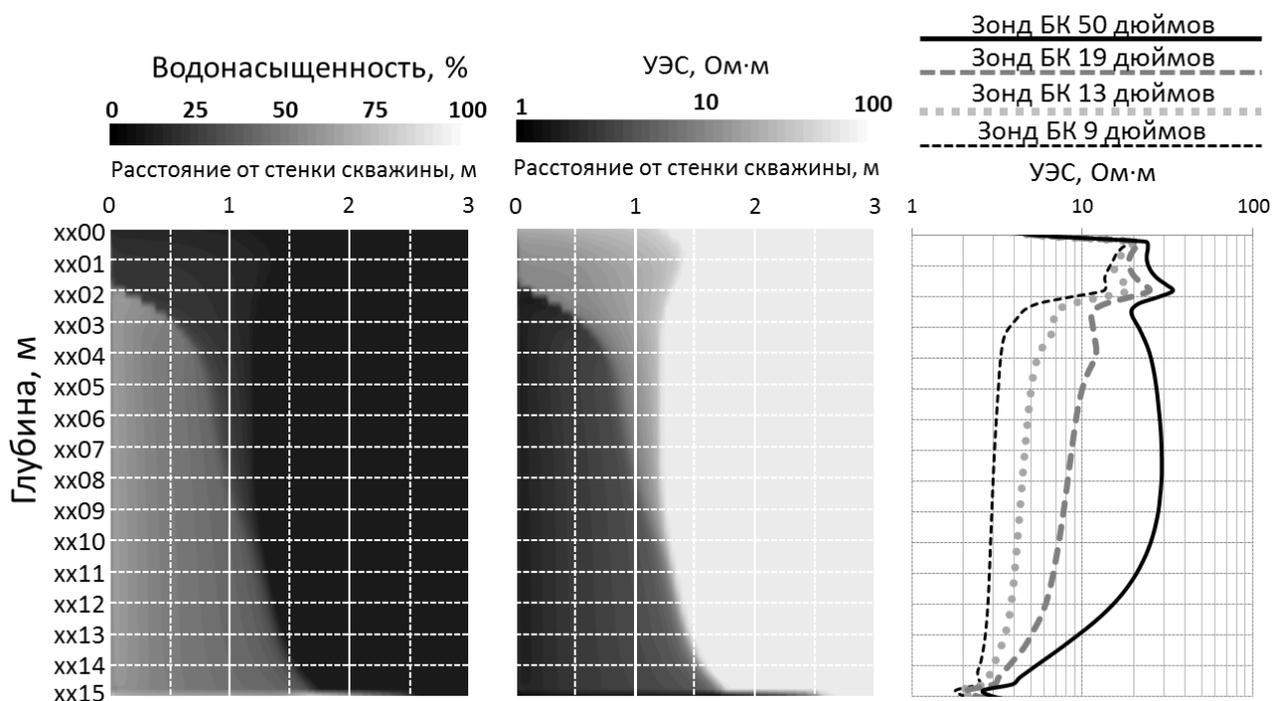


Рис. 2. Распределения водонасыщенности и УЭС, полученные в результате моделирования; синтетические измерения бокового каротажного зондирования на интервале коллектора спустя 12 суток после вскрытия пласта

В результате численного моделирования установлено, что при значениях плотностей фильтрата бурового раствора и пластовой нефти 1 и 0.8 г/см³ соответственно на временах от 12 до 30 суток с момента вскрытия пласта происходит смещение фильтрата бурового раствора к подошве коллектора. Установлено: чем выше проницаемость пласта (более 1000 мД), тем сильнее проявляется гравитационный эффект. Выявлено, что в случае высокопроницаемого пласта изменение отношения вязкостей фильтрата бурового раствора и пластовой нефти практически не влияет на структуру зоны проникновения по сравнению с эффектом гравитационных сил. Установлено, что только при длительном воздействии скважины на пласт (более 10 суток) начинает проявляться эффект гравитационных сил. В рассмотренных примерах показано, что измерения электромагнитного каротажа, проведенные спустя 12 и более суток после вскрытия пласта, могут привести к заниженным оценкам электросопротивления в нижней части пласта и неправильной оценке начальной пластовой водонасыщенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем / Пер. с англ. – М.: Недра, 1982. – 407 с.

2. Кашеваров А. А., Ельцов И. Н., Эпов М. И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // ПМТФ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – Т. 44, № 6. – С. 148–157.

3. Torres-Verdín C., Alpak F.O., Nabashy T.M. Petrophysical inversion of borehole array-induction logs: Part II – Field data examples // Geophysics. – Tulsa: SEG, 2006. – V. 71, № 5. – P. G261–G268.

© А. И. Макаров, А. В. Серяков, О. Б. Бочаров, 2015

ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЦЕТОНА В ВОЗДУХЕ

Анастасия Олеговна Малышева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19, e-mail: nastymana@yandex.ru

Описана методика калибровки портативного газового хроматографа ЭХО-В-ФИД, основанная на парофазном анализе.

Ключевые слова: калибровка ацетоном, газовый хроматограф, ацетон в воздухе.

GAS CHROMATOGRAPHIC DETECTION OF ACETONE IN AIR

Anastasiya O. Malysheva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Prospect, tel. (913)005-48-19, e-mail: nastymana@yandex.ru

A technology for calibration of a portable ECHO-A-PID gas chromatograph based on a headspace analysis is described.

Key words: calibration of acetone, gas chromatograph, acetone in air.

Особенностью газохроматографического анализа является необходимость периодической градуировки (калибровки) в процессе измерений [1]. Для внелабораторных геохимических и других типов анализов с применением портативных газовых хроматографов серии ЭХО актуальной является задача применения простых в реализации методик калибровки. В работе предложена и апробирована методика с использованием парофазного приготовления калибровочной концентрации тестовой пробы на примере анализа ацетона в выдыхаемом воздухе. Знание концентрации ацетона дает возможность диагностировать риск заболевания сахарным диабетом [2].

Для определения концентрации ацетона в выдыхаемом воздухе используется газовый хроматограф ЭХО-В-ФИД с пробоотборной приставкой (рис. 1).

Хроматограф ЭХО-В-ФИД состоит из трёх блоков, совмещённых в общем корпусе: аналитического, газоснабжения и электронного. В аналитическом блоке осуществляются все основные процессы газовой хроматографии. Аналитический блок содержит автоматический инжектор, газохроматографическую колонку и фото-ионизационный детектор.

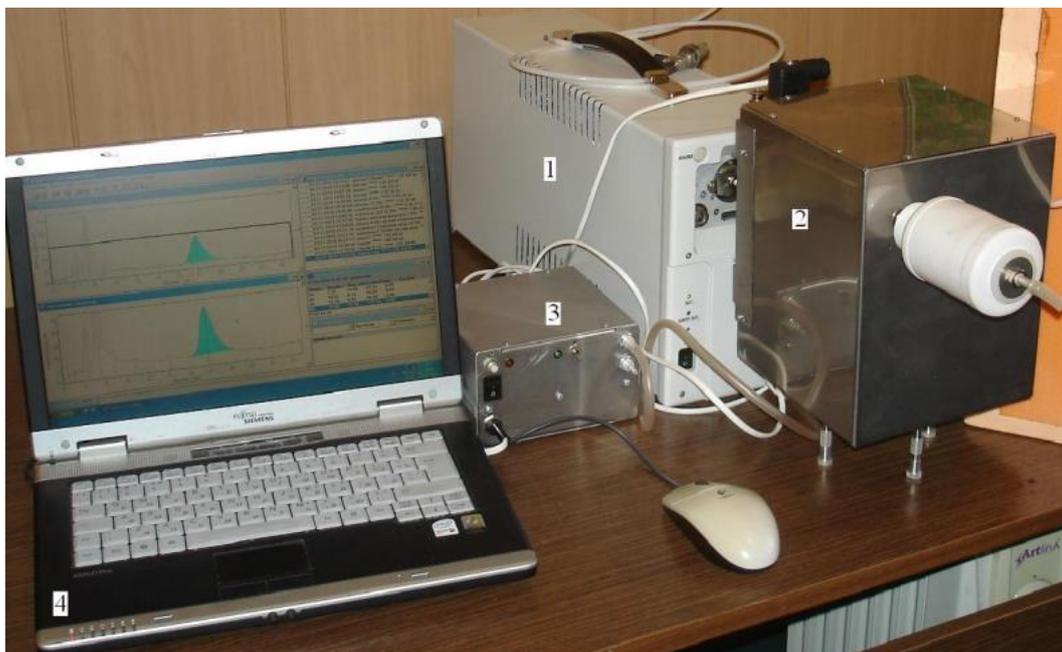


Рис. 1. Хроматограф ЭХО-В-ФИД с пробоотборной приставкой:
1 – хроматограф "ЭХО-В-ФИД"; 2 – пробоотборная приставка; 3 – блок обеспечения пробоотборной приставки; 4 – персональный компьютер

Пробоотборная приставка: пациент через одноразовый силиконовый мундштук продувает фторопластовую трубку, объём которой позволяет сделать хроматографом ЭХО-В-ФИД три анализа одной пробы (последовательно в автоматическом режиме, отбирается автодозировующим инжектором). Для предотвращения конденсации на стенках фторопластовой трубки спиралевидные ёмкости приставки помещены в термостат с температурой 50°C . Результаты анализа обрабатывается компьютером.

Используемый в Хроматографе ЭХО-В-ФИД фото-ионизационный детектор из-за постепенного загрязнения окна ионизационной УФ лампы снижает свою чувствительность, поэтому необходимо регулярно проводить калибровку. В работе предложена эффективная и простая в использовании методика проведения калибровки хроматографа ЭХО-В-ФИД по отклику на известную концентрацию ацетона.

Схема калибровки. Параметры и режимы.

Прибор включён и выведен предварительно на рабочий режим. Калибровка содержит нижеследующие операции:

1. Подготовку калибровочного раствора с известной концентрацией ацетона (объёмы жидкой и воздушной фазы должны быть известны и постоянны для каждого измерения).

2. Анализ калибровочного раствора. Сохранение хроматограммы «Калибровка ацетоном».

3. Далее нужно вычесть из хроматограммы «Калибровка ацетоном» хроматограмму «Фон». Идентифицировать ацетон на хроматограмме. Рассчитать

концентрацию ацетона в воздушной фазе, используя закон Генри (формула 1.1) [1]. Для расчетов использовать коэффициент Генри для измеренной температуры калибровочного раствора и объёмы жидкой и воздушной фаз. Занести в базу набора.

4. Очистку пробоотборной приставки. Кнопка «очистка» на панели блока обеспечения. Включается компрессор ПОУ (открывается клапан продувки) и продуваются пробоотборные трубки ПОУ. По окончании продувки клапан закрывается.

На рис. 2 приведены хроматограммы калибровочного раствора с концентрацией ацетона в воде $5.3 \cdot 10^{-6} \text{ мг/см}^3$ и анализа выдыхаемого человеком воздуха. В качестве жидкой фазы используется физиологический раствор. В основе проводимой калибровки лежит анализ равновесного пара [3]. Он позволяет определить по содержанию вещества в газовой фазе его содержание в равновесной ей жидкой фазе.

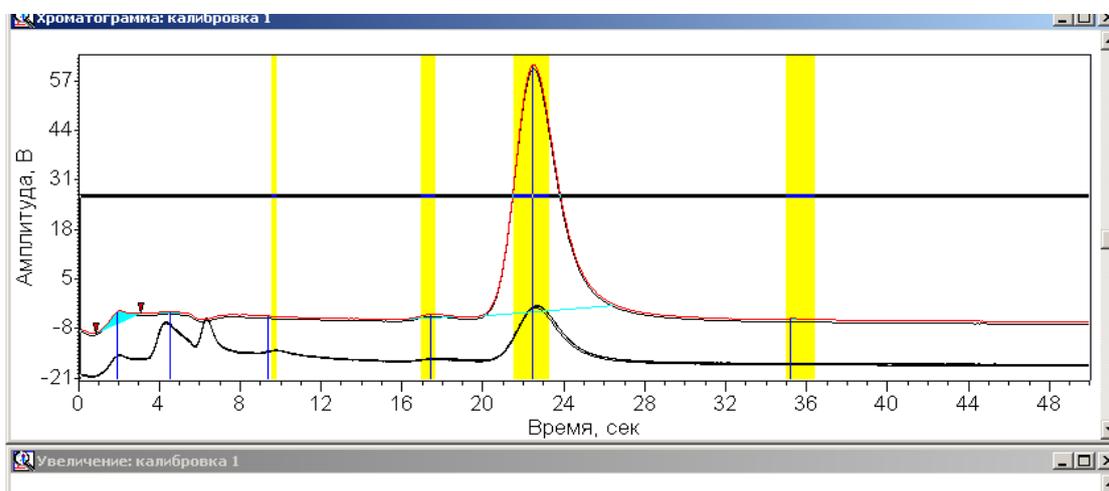


Рис. 2. Хроматограммы газовой фазы (290 мл) над водой (200 мл), содержащей 1 мкл ацетона (верхняя), и хроматограммы выдыхаемого человеком воздуха (нижние)

В области малых концентраций пользуются законом Генри (1.1) и уравнением материального баланса (1.2).

$$C_L = KC_G, \quad (1.1)$$

где C_L – концентрация вещества в жидкой фазе, C_G – в газовой фазе, K – коэффициент Генри для данной температуры раствора [3],

$$C_L^0 V_L = C_L V_L + C_G V_G, \quad (1.2)$$

где C_L^0 – начальная концентрация вещества в жидкой фазе, C_G – в газовой фазе [1].

Для нахождения концентрации ацетона в воздушной фазе калибровочного раствора получим выражение:

$$C_G = C_L^0 / (K + V_G/V_L) \quad (1.3)$$

Концентрация ацетона в выдохе человека в силу линейности зависимости отклика хроматографа определяется из соотношения площадей пиков ацетона на хроматограмме.

Таблица 1

Результаты измерений

Концентрация	Время, с	Средняя высота пика, В	Средняя площадь, В*с	Концентрация, 10^{-6} мг/см ³
Калибровка	22,48	64,95	160,52	5,25
Выдох	22,62	14,14	35,65	1,2

Относительная погрешность калибровки составляет $\pm 7\%$. Относительная погрешность определения площади пика ацетона равна $\pm 0,94\%$. Суммарная погрешность определения концентрации ацетона в выдохе не превышает $\pm 8\%$.

Заключение. Методика проведения калибровки ацетоном хроматографа разработана, апробирована. Данная методика с достаточной точностью позволяет определять концентрации ацетона в выдыхаемом человеком воздухе. Аналогичный подход может быть реализован и для калибровки по углеводородам С₆–С₈ при анализе проб геохимической съемки. В заключении автор выражает искреннюю благодарность за помощь в подготовке доклада В.М. Грузнову и М.Н. Балдину.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яшин Я. И., Яшин Е. Я., Яшин А. Я. Газовая хроматография. – М.: ТрансЛит, 2009. – 528 с.
2. Содержание легких углеводородов в выдыхаемом воздухе в зависимости от факторов риска метаболических нарушений / В. Ю. Куликов, Л. А. Руюткина, М. Ю. Сорокин, Е. С. Шабанова, М. Н. Балдин, В. М. Грузнов, А. П. Ефименко, Д. В. Петровский, Е. П. Шнайдер, М. П. Мошкин // Физиология человека. – 2011. – Т. 37, № 3. – С. 70–75.
3. Куликов В. Ю., Руюткина Л. А., Сорокин М. Ю., Шабанова Е. С., Балдин М. Н., Грузнов В. М., Ефименко А. П., Петровский Д. В., Шнайдер Е. П., Мошкин М. П. Взаимосвязь между содержанием в выдыхаемом воздухе ацетона и особенностями метаболических нарушений у больных сахарным диабетом первого и второго типов [Электронный ресурс] // Медицина и образование в Сибири: электронный научный журнал. – 2011. – № 1. – Режим доступа: http://ngmu.ru/cozo/mos/article/text_full.php?id=468
3. Витенберг А. Г., Иоффе Б. В. Газовая экстракция в хроматографическом анализе. – Ленинград: Химия, 1982.

© А. О. Мальшева, 2015

ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ КОЛЛЕКТОРОВ В ПРЕДЕЛАХ ТРОИЦКО-МИХАЙЛОВСКОГО ВАЛА НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРОВ

Аркадий Сергеевич Ефимов

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, генеральный директор, тел. (383)217-11-43, e-mail: efas@sniggims.ru

Георгий Михайлович Тригубович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Анастасия Александровна Белая

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, заведующий лабораторией, тел. (383)222-42-03, e-mail: tal@sniggims.ru

Елена Николаевна Махнач

ООО ГП «Сибгеотех», 630099, Россия, г. Новосибирск, а/я 283, главный геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)344-92-44, e-mail: machnach@sibgeotech.ru

Анна Васильевна Мамаева

ООО ГП «Сибгеотех», 630099, Россия, г. Новосибирск, а/я 283, ведущий геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)344-92-44, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

Рассмотрены результаты совместной 1D, 3D-интерпретации данных магнитотеллурических зондирований МТЗ и электромагнитных зондирований ЗСБ с целью выявления локальных ловушек УВ в подсолевых горизонтах зоны линейных дислокаций Троицко-Михайловского вала. Решение задачи реконструкции пространственно-временного/частотного распределения ЭМ-поля в объемное распределение проводимости геологической среды на основе точного трехмерного моделирования дает возможность прогнозирования флюидонасыщенных коллекторов в сложных поверхностных условиях. Использование объемных моделей геологической среды позволило существенно повысить достоверность и надежность геофизического прогноза. На основе полученных материалов изучено глубинное строение венд-кембрийских и рифейских отложений, выделены проводящие зоны в нижнем кембрии, терригенном венде и рифее, дана глубинная привязка и оценка коллекторских свойств.

Ключевые слова: Электроразведка МТЗ, ЗСБ, 1D, 3D-интерпретация, проводимость, коллектора, рифей, венд, нижний кембрий, ловушка УВ.

LOCAL PROGNOSIS OF RESERVOIRS WITHIN THE TROICKY-MIKHAILOVSKY SWELL BASED ON THE INTEGRATED MODEL OF RESERVOIRS

Arkadiy S. Efimov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Director, tel. (383)217-11-43, e-mail: efas@sniggims.ru

Georgiy M. Trigubovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Professor, Supervisor of geophysical research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Anastasiya A. Belaya

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Head of the Laboratory, tel. (383)222-42-03, e-mail: tal@sniggims.ru

Elena N. Makhnach

«Sibgeotech» Ltd, 630099, Russia, Novosibirsk, post office box 283, Chief Geophysicist, tel. (383)344-92-44, e-mail: machnach@sibgeotech.ru

Anna V. Mamaeva

«Sibgeotech» Ltd, 630099, Russia, Novosibirsk, post office box 283, Senior Geophysicist, tel. (383)344-92-44, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

The results of combined 1D-, 3D-interpretation of magnetotelluric and near field-TEM data have been examined to locate local hydrocarbon traps in subsalt horizons of linear dislocation zones of TROICKY-MIKHAILOVSKY SWELL. Solving the task of reconstruction of space-time/frequency distribution of EM-field into volumetric distribution of conductivity of geological medium (based on the accurate 3D-modeling) allows to predict fluid-saturated reservoirs in difficult surface environment. The use of volumetric models of geological medium allowed to increase the reliability of geophysical prognosis substantially. Basing on the acquired material, deep structure of Vendian-Cambrian and Riphean sediments has been studied. Low-resistivity zones are located in lower Cambrian system, terrigenous Vendian and Riphean systems; Depth binding and estimation of collector qualities are given.

Key words: Magnetotelluric sounding, 1D, 3D-interpretation, conductivity, reservoirs, Riphean, Vendian, Lower-Cambrian, Hydrocarbon traps.

С целью выявления локальных ловушек углеводородов в подсолевых горизонтах зоны линейных дислокаций Троицко-Михайловского вала проведены магнитотеллурические зондирования МТЗ по сети ранее отработанных профилей МОГТ-80, детальной гравиметрии и электроразведочных работ ЗСБ. Полевые работы методом МТЗ проводились по профильной системе наблюдений с шагом между пунктами наблюдений 1 км. Использовались электроразведочные станции МТУ производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics», предназначенные для регистрации электрических (E_x , E_y) и магнитных (H_x , H_y , H_z) компонент естественного магнитотеллурического поля. Система регистрации – синхронные наблюдения с перемещающейся базовой (опорной) точкой [1]. Длительность записи на пункте наблюдения в среднем составила 19 часов, что обеспечило полноценную кривую зондирования в заданном частотном диапазоне (400–0,0006 Гц).

При обработке электроразведочных данных использовались имеющиеся на всю площадь работ материалы электроразведки ЗСБ. Это позволило по данным ЗСБ детально изучить верхнюю, наиболее неоднородную часть разреза, а по МТЗ – глубокие горизонты осадочного чехла и фундамента. Интерпретация

выполнялась в одно- и трехмерном варианте, по ее итогам построены геоэлектрические разрезы в м-бе 1: 100 000 и создана объемная геоэлектрическая модель площади Троицко-Михайловского вала.

Детальная модель ВЧР была построена по результатам интерпретации данных ЗСБ [2, 3]. Для начального приближения в качестве стартовой модели использовалась горизонтально-слоистая среда. Путем к решению проблемы восстановления глубинной геоэлектрической структуры среды в условиях неоднородной ВЧР является 3D-интерпретации данных ЗСБ и МТЗ. Технология 3D-интерпретации основана на разделении ЭМ-поля на нормальную составляющую – влияния среды и аномальную составляющую влияния трехмерных неоднородностей. Одновременный подбор объектов и сигналов по всей пространственно-временной области влияния источника позволяет учитывать неоднородность вмещающей среды, устраняет искажения реконструкции глубинных частей разреза, резко снижает область эквивалентности решения обратной задачи и повышает достоверность прогноза проводимости и глубины залегания коллектора. В большинстве случаев интервальная электрическая проводимость является известной функцией рассольного флюидонасыщения, а флюидонасыщение – характеристикой проницаемости коллектора.

На рис. 1 приведены геоэлектрические разрезы вдоль профилей 57 и 67 с подобранными глубинными объектами и стратиграфической привязкой комплексов пород.

По данным электроразведки на разрезах и картах контрастно выделяется протяженная высокоамплитудная структура – Троицко-Михайловский вал по раздуву мощности высокоомного комплекса, приуроченного к соленосно-карбонатным нижнекембрийским отложениям. Судя по конфигурации аномалий МТ-поля, это структура представляет собой соляной диапир с максимальным нагнетанием солей в купольной части, в южном направлении структура выполаживается. На подсолевом уровне залегает два проводящих комплекса отложений. На большей части площади они хорошо расчленяются – более проводящий верхний, приуроченный к карбонатным венд-нижнекембрийским и терригенным вендским отложениям (редколесная-мошаконская свиты), и нижний, соотносимый с осадками тасеевской серии верхнего рифея – венда. Его проводимость обусловлена наличием коллекторов в тэтэрской, ванаварской (редколесной) свите венда и в кровле рифейских отложений.

Для качественной оценки характера флюидонасыщения был определен граничный уровень вероятного типа флюидонасыщенного коллектора в отложениях нижнего кембрия-венда-рифея. Водонасыщенный коллектор принят на отметке до 5–7 Ом.м, углеводородонасыщенный – на отметке 10–30 Ом.м., алевролиты обладают сопротивлением 50–100 Ом.м., аргиллиты обладают сопротивлением 10–20 Ом.м., плотносцементированные песчаники обладают сопротивлением до сотни Ом.м., карбонаты – сотни Ом.м. При оценке типа флюидонасыщения использовались результаты бокового каротажа (БК) по скв. Чуньская-1, пробуренной вблизи площади работ.

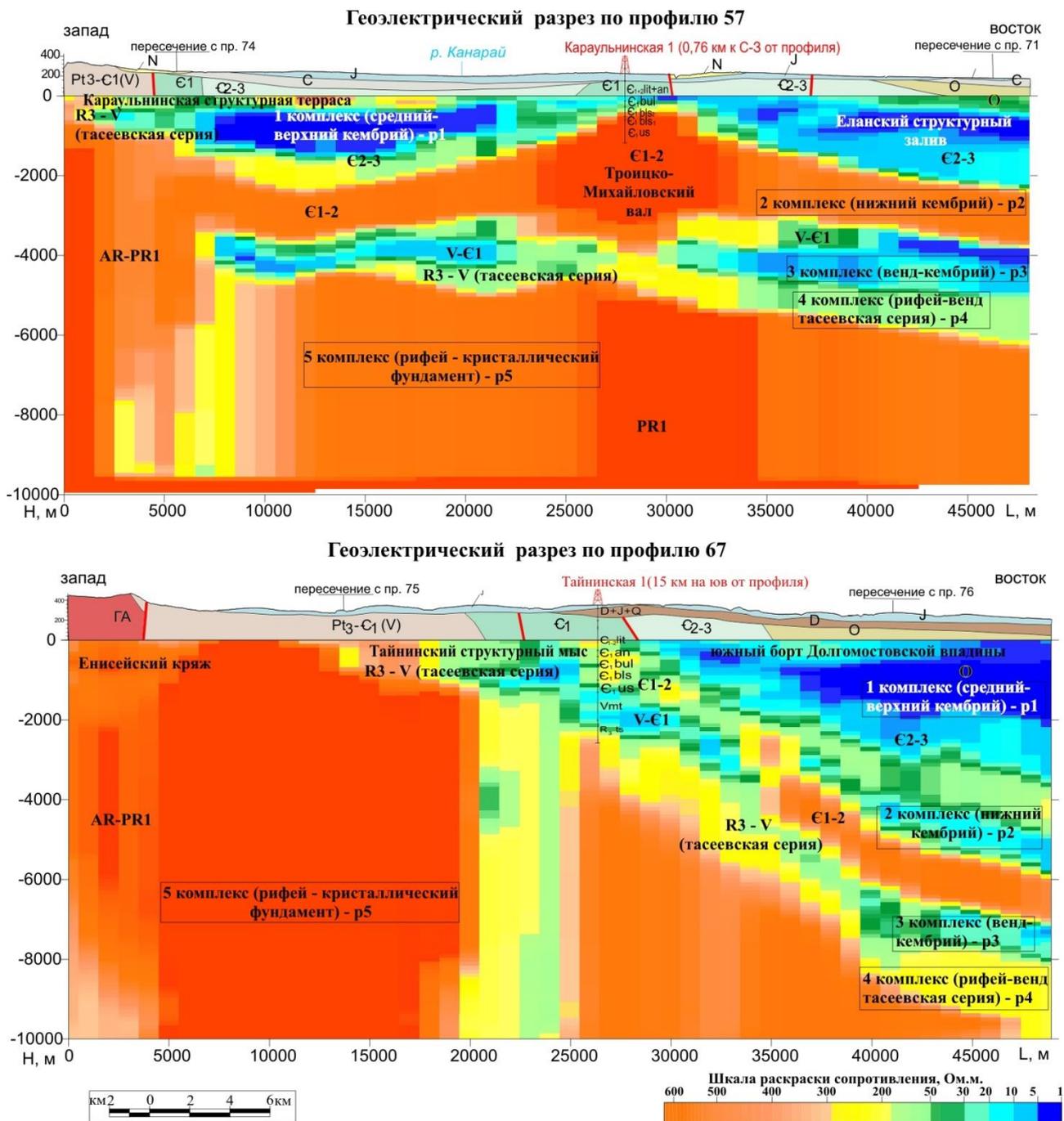


Рис.1. Геоэлектрические разрезы по профилям

По данным электроразведки оконтурены зоны высокопроницаемых коллекторов, в пределах которых выделены ловушки УВ различного типа. Эти данные в совокупности с результатами бурения и волновой картиной на сейсмопрофилях позволили дать оценку ресурсов по двум газоносным горизонтам – в нижнебельских карбонатах в кембрийском НГК и в песчаниках редколесной свиты в вендском НГК. В пределах двух ловушек рекомендовано заложение параметрических скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М. Н. Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
2. Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Моисеев В. С., Тригубович Г. М. Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. – 1998. – № 10. – С. 78–84.
3. Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г. 3D – Электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Наука, 2009. – 211 с.

© А. С. Ефимов, Г. М. Тригубович, А. А. Белая,
Е. Н. Махнач, А. В. Мамаева, 2015

ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ МИНИМИЗАЦИИ

Игорь Владиславович Михайлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, ведущий программист, e-mail: MikhailovIV@ipgg.sbras.ru

Вячеслав Николаевич Глинских

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией скважинной геофизики, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Марина Николаевна Никитенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Разработан и программно реализован точный алгоритм двумерной инверсии данных электромагнитного каротажа, в основе которого лежат метод конечных разностей и нелинейная минимизация. Восстановлено пространственное распределение геоэлектрических параметров газо-, нефте-, водонасыщенных коллекторов, осложнённых глинистыми и карбонатными прослоями.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, численное моделирование, двумерная инверсия, метод конечных разностей, нелинейная минимизация.

2D INVERSION OF ELECTROMAGNETIC LOGGING DATA BASED ON THE FINITE DIFFERENCE METHOD AND NONLINEAR MINIMIZATION

Igor V. Mikhailov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D. Student, Leading Programmer, e-mail: MikhailovIV@ipgg.sbras.ru

Viacheslav N. Glinskikh

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Borehole Geophysics Laboratory, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Marina N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentjeva Prospect, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We have developed an exact software algorithm for two-dimensional inversion of electromagnetic logging data. It bases upon the finite difference method and nonlinear minimization. Spatial distribution of the geoelectric parameters of gas-oil-water saturated reservoirs complicated by the presence of clay and carbonate interlayers has been reconstructed.

Key words: electromagnetic logging, numerical simulation, 2D inversion, finite difference method, nonlinear minimization.

Традиционно численная инверсия электромагнитных сигналов заключается в определении электрофизических и геометрических параметров прискважинной области и пласта в рамках цилиндрической слоисто-однородной модели. Такой одномерный подход ограничен случаями, когда мощность пластов превышает длины зондов, поскольку в обратной ситуации значительное влияние на сигнал может оказывать вертикальная неоднородность разреза. Так, например, следствием наличия карбонатных и глинистых прослоев на интервале коллектора является распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) по глубине, отличное от распределения в мощном однородном коллекторе, в котором высокие значения УЭС в кровельной части, обусловленные высоким содержанием нефти, постепенно уменьшаются с глубиной и в подошвенной части соответствуют насыщению пластовой водой. Численная инверсия на основе цилиндрически-слоистой модели приведёт в таких случаях к недопустимым геоэлектрическим моделям. Это свидетельствует о необходимости одновременного восстановления как радиального, так и вертикального распределения УЭС околоскважинного пространства в рамках двумерной геоэлектрической модели (рис. 1), учитывающей влияние маломощных прослоев в коллекторе и вмещающих его пород. Иными словами, сигналы электромагнитного каротажа могут быть адекватно проинтерпретированы только с использованием двумерной инверсии.

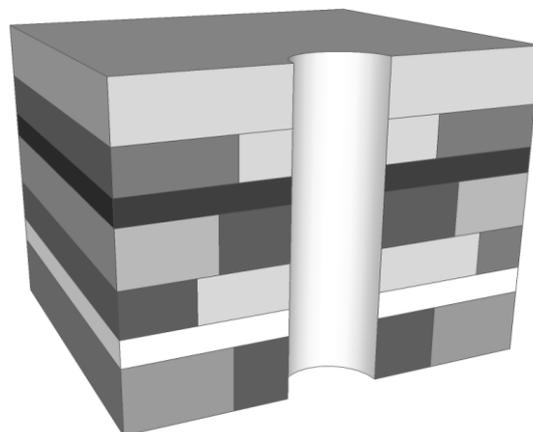


Рис. 1. Двумерная геоэлектрическая модель

Развитие теоретико-методической базы количественной интерпретации во многом зависит от разработки программно-алгоритмических средств математического моделирования и инверсии. Известны работы, посвящённые быстрому двумерному моделированию и инверсии сигналов электромагнитного каротажа в линеаризованных постановках [2], [3], [9]. Несмотря на высокую скорость расчётов, в ряде случаев они не обеспечивают необходимой точности решения.

Для более точного восстановления геоэлектрических параметров геологического разреза в рамках данной работы программно реализована двумерная инверсия данных электромагнитного каротажа на основе метода конечных разностей и нелинейной минимизации. Численное решение прямой двумерной задачи сводится к системам линейных алгебраических уравнений с комплексными неэрмитовыми симметричными матрицами, что позволяет достигать высокой производительности расчётов [5]. Алгоритм численной инверсии основан на методе деформируемых многогранников [7]. Он позволяет быстро выбрать правильное направление поиска и значительно уменьшить минимизируемую функцию уже на первых итерациях. В инверсионной модели параметры можно фиксировать или задавать для них ограничения.

Программа двумерной инверсии была протестирована на синтетических, в том числе зашумлённых, и практических данных. На рис. 2б приведена реалистичная геоэлектрическая модель газо-, нефте-, водонасыщенного коллектора [6], перекрытого и подстилаемого глинистыми отложениями. Газоносная и нефтеносная части коллектора разделены маломощным (0.3 м) глинистым прослоем, в то время как на контакте нефтеносного и водоносного пласта находится тонкий высокоомный карбонатный прослой (0.3 м), что является достаточно типичным [4]. Мощность пластов, насыщенных газом и водой, составляет 2 м, а нефтенасыщенного – 1.4 м. В каждом из них присутствует зона проникновения. Параметры скважины: УЭС 2 Ом·м, радиус 0.108 м. Истинные модельные УЭС (Ом·м) показаны на рис. 2б чёрными цифрами.

На рис. 2а сплошными линиями показаны диаграммы электромагнитного каротажа в истинной модели (шум 3 %). На интервале пласта, насыщенного нефтью, отмечается значительное влияние глинистого и карбонатного прослоев на сигналы длинных зондов.

В качестве стартовой модели использовались результаты одномерной инверсии, полученные на основе цилиндрически-слоистой модели [8]. На втором этапе, при фиксированных горизонтальных границах, в процессе подбора двумерной модели уточнялись значения УЭС, а также положения радиальных границ. Электрофизические параметры вмещающих глин были взяты из одномерной инверсии и далее не подбирались.

Отметим, что по результатам одномерной инверсии в газоносном пласте наблюдалось не понижающее, а повышающее проникновение с очень широкой зоной проникновения, при этом УЭС пласта соответствовало его насыщению нефтью и водой. Другой важный момент касается нефтеносного пласта. При одномерной инверсии на его интервале был по необходимости введён дополнительный слой, соответствующий окаймляющей зоне [1], который в истинной

модели отсутствует. В ходе двумерной инверсии окаймляющая зона была исключена. Причина таких недостоверных результатов одномерного подхода в том, что на сигналы в газонасыщенном пласте значительное влияние оказывают перекрывающие глины и находящийся снизу глинистый прослой, а в нефтенасыщенном – глинистый и карбонатный прослой, расположенные в его кровельной и подошвенной частях.

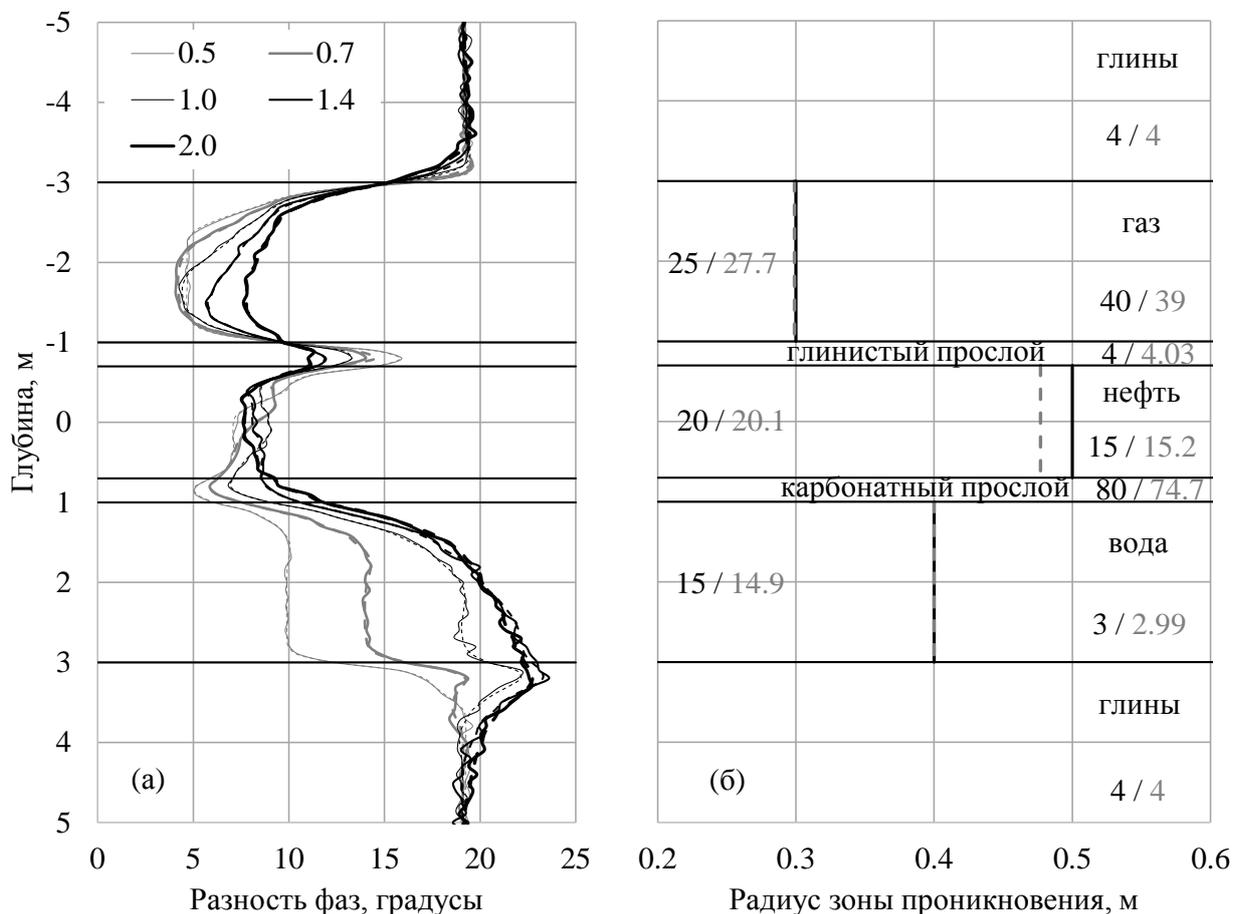


Рис. 2. Сигналы электромагнитного каротажа в модели газо-, нефте-, водонасыщенного коллектора в глинах, осложнённого глинистым и карбонатным прослоями (а), и геоэлектрические параметры истинной и подобранной моделей (б). Шифр сверху – длины зондов

На рис. 2а пунктиром показаны сигналы в истинной и подобранной моделях. Отмечается высокое совпадение диаграмм одноимённых зондов. На рис. 2б серыми цифрами обозначены УЭС в найденной модели, а серым пунктиром – границы зон проникновения. Параметры модели определены с хорошей точностью, при этом наибольшая эквивалентность наблюдается для зон проникновения в газонасыщенном и нефтенасыщенном пластах.

Двумерная инверсия также была успешно применена к практическим диаграммам из ряда скважин Широтного Приобья Западной Сибири.

Таким образом, программно реализован эффективный алгоритм двумерной инверсии данных электромагнитного каротажа, позволяющий проводить точную реконструкцию пространственного распределения геоэлектрических параметров в разрезах сложного строения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов Ю. Н., Сметанина Л. В., Михайлов И. В. Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник. – 2012. – Вып. 6 (216). – С. 16–40.
2. Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И. Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 12. – С. 1942–1951.
3. Глинских В. Н., Эпов М. И. Локально-нелинейные приближения высокочастотного электромагнитного поля для задач каротажа // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 8. – С. 938–944.
4. Сахибгареев Р. С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. – 260 с.
5. Суродина И.В., Эпов М.И. Моделирование диаграмм высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором // Каротажник. – 2013. – Вып. 5 (227). – С. 60–75.
6. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ: Методическое руководство / Под ред. М. И. Эпова, Ю. Н. Антонова. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2000. – 122 с.
7. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
8. Эпов М. И., Каюров К. Н., Ельцов И. Н. и др. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF PRO // Бурение и нефть. – 2010. – № 2. – С. 16–19.
9. Эпов М. И., Глинских В. Н. Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2005. – 98 с.

© И. В. Михайлов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина, 2015

РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРИБОРАХ ТОЧНОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

Юрий Анатольевич Копытенко

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Санкт-Петербургский филиал, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 5, лит. «Б», доктор физико-математических наук, директор, тел. (812)323-78-45, e-mail: office@izmiran.spb.ru

Николай Феликсович Кротевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)334-41-53.

Марина Николаевна Никитенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-96-02, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

В статье рассматривается необходимость дополнительного размагничивания диа- и парамагнитных материалов, которые применяются в конструкциях тесламетров и магнитометров для улучшения достоверности показаний и повышения их точности. Практически несложный магнитомеханический синтез таких материалов достигнут путем применения высокочувствительного и технологичного каппаметра. Синтезированы некоторые образцы из стандартных материалов, размагниченные до уровня $5 \cdot 10^{-8}$ ед. СИ.

Ключевые слова: размагничивание, магнитная восприимчивость, диамагнетики, парамагнетики.

DEMAGNETIZATION OF DIAMAGNETS AND PARAMAGNETS UTILIZED IN THE PRECISION MAGNETOMETRY MEASURING INSTRUMENTS

Yuriy A. Kopytenko

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, St.-Petersburg Filial, 199034, Russia, St.-Petersburg, 5 Universitetskaya nab., lit. «B», Doctor of Science, Director, tel. (812)323-78-45, e-mail: office@izmiran.spb.ru

Nikolay F. Krotevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Research Scientist, tel. (383)334-41-53

Marina N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Research Scientist, tel. (383)330-96-02, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

This article discusses the necessity for additional demagnetization of diamagnetic and paramagnetic materials, applied in teslameters and magnetometers, for the reliability and measurement accuracy improvement. Practically unsophisticated magnetomechanical combining of diamagnets

and paramagnets has been achieved by applying a highly sensitive and easily producible susceptibility meter. We have synthesized some samples made of standard materials and demagnetized them to $5 \cdot 10^{-8}$ SI units.

Key words: demagnetization, magnetic susceptibility, diamagnets, paramagnets.

При конструировании высокоточных приборов для измерения любых магнитных величин, особенно малых значений, применяют неферромагнитные материалы и вещества, которые в обиходе считаются немагнитными. В связи с тем, что требования к точности измерения малых магнитных полей постоянно возрастают, возникла проблема борьбы с собственными шумами тесламетров и магнитных вариометров. Среди множества причин шумовых эффектов и других нестабильностей – магнитное влияние материалов, из которых собран сам прибор, на магниточувствительный элемент тесламетра (магнитометра). Эти материалы произвольно выбирают из числа «немагнитных» (медь, латунь, дюраль, стекло, различные пластики и т.д.), которые на самом деле являются диа- и парамагнитными. Их магнитная восприимчивость изменяется в широких пределах – от 10^{-6} до 10^{-3} ед. СИ и зависит от температуры и других сторонних факторов. Наша задача состоит в защите первичных преобразователей, в том числе ферромагнитных, от возможного влияния на них диа- и парамагнетизма тех материалов, которые по умолчанию считаются «немагнитными».

Магнитная восприимчивость к диа- и парамагнетиков – это устойчивая характеристика каждого вещества: ее нельзя уничтожить никакими средствами, например, механическими ударами, тепловой обработкой, воздействием сильных магнитных полей и т.д. Величина κ у парамагнетиков (алюминиевые сплавы) считается положительной, у диамагнетиков (вода, стекло, медь, пластмассы) – отрицательной. Следовательно, фундаментальную формулу магнетизма в системе единиц СИ можно представить в следующем виде:

$$\mu = 1 \pm \kappa \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость вещества. Заметим, что для диа- и парамагнетиков $|\kappa| \ll 1$. При этом диапазон изменения κ у большинства диамагнетиков составляет от 10^{-6} до 10^{-4} ед. СИ, а для парамагнетиков, исключая горные породы, – от 10^{-6} до 10^{-3} ед. СИ.

Нижний предел чувствительности для современных тесламетров (магнитометров), удовлетворяющий практическим требованиям, составляет около 10^{-3} нТл, что относительно величины земного магнитного поля ($H=60000$ нТл) составляет приблизительно $1,7 \cdot 10^{-6}$ %. Отсюда видно, что относительное влияние намагниченности деталей тесламетра, особенно парамагнитных, может превзойти величину $1,7 \cdot 10^{-6}$ % (нижний порог чувствительности) во много раз. Средняя намагниченность J парамагнетика определяется следующим образом: $J = \kappa \cdot H = 10^{-4} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \sim 6$ нТл ($H = 60000$ нТл – магнитное поле Земли). Таким образом, указанная добавка 6 нТл к магнитному полю Земли будет определять систематическую погрешность. Она совершенно недопустима для

абсолютных тесламетров (магнитометров). Значение к необходимо снижать на несколько порядков, что и подтверждает актуальность поставленной задачи.

Возможность существенного влияния диа- и парамагнетизма следует ожидать у тех тесламетров, у которых магниточувствительный элемент непосредственно контактирует с удерживающими их материалами. Сюда относятся феррозондовые преобразователи, ядерно-прецессионные, квантовые тесламетры и вибрационные.

Принцип «размагничивания» непосредственно вытекает из формулы (1). Необходимо так подобрать пару диа- и парамагнитных материалов, чтобы суммарное значение k было минимально или обратилось в нуль. Практически задача сводится к магнитомеханическому синтезу разнополярных по магнитной восприимчивости материалов, который особенно легко осуществить для материалов листового профиля. В этом случае мы получаем комплект, который можно назвать биматериалом. Это технологически несложная процедура, однако для ее осуществления необходимо использовать аппаратуру с предельно высокой чувствительностью и удобную в эксплуатации, которую трудно найти в линейке каппаметрических устройств. Обратимся к собственной разработке 1970-х гг. [1]. Прибор ИМВ (измеритель магнитной восприимчивости), точнее, компаратор ряда магнитных величин в заводском исполнении показан на рис. 1.



Рис. 1. Измеритель магнитной восприимчивости (ИМВ)

Прибор отмечен тремя авторскими свидетельствами на изобретение, прошел широкие государственные испытания в СССР и выпускался небольшими сериями в 1978–1988 гг. омским заводом «Эталон». ИМВ предназначался главным образом для определения магнитной восприимчивости веществ в твердом, жидком и порошкообразном агрегатном состоянии.

В приборе использован обратный принцип силового преобразования Фарадея. Он состоит в том, что измеряемый образец вещества остается неподвижным, а постоянный магнит с высокой индукцией и градиентом этой индукции делается подвижным в виде магнитных весов. Таким образом, резко повышается чувствительность, в миллионы раз уменьшается вес магнитной системы (два астазированных магнита в ИМВ имеют размеры $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$), значительно повышается производительность и технологичность измерений, увеличивается

помехозащищенность. Прибор можно применять в крупных городах с высоким фоном промышленных электромагнитных помех. Для оценки порога чувствительности ИМВ проведем в лабораторных условиях следующий опыт. На центр предметного столика (рис. 1) нанесем каплю чистой воды, которая будет иметь форму полусферы диаметром 4–5 мм. На выходе прибора будет зарегистрирован сигнал около 100 мВ. Этот сигнал при цене деления прибора $4,2 \cdot 10^{-8}$ ед. СИ/мВ дает значение $k = 4,2 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ. Величина 100 мВ превышает величину шума 10 мкВ в 10^4 раз. Поэтому, чтобы воспроизвести величину порога чувствительности, который в данном опыте равен $4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-4} = 4,2 \cdot 10^{-10}$ ед. СИ, необходимо объем исходной капли также уменьшить в 10^4 раз! Эксперимент с делением капли воды в 10^4 раз мы явно не выполним, но для определения порога чувствительности ИМВ имеется точный способ, останавливаться на котором мы не будем. Подобные значения порога чувствительности в мировой каппаметрии нам пока не известны.

В нашем эксперименте технологичность и производительность измерений определяются простой конструкцией прибора, имеющего плоский, горизонтальный предметный столик с диаметром 200 мм для возможности измерения и сканирования крупных образцов. Время одного измерения занимает 5–10 секунд, включая и установку образца. Точность измерений зависит от плотности прилегания образца к предметному столику, поэтому главное требование к образцам – они должны иметь хотя бы одну плоскую грань с возможно малой шероховатостью. Наиболее удобными веществами для измерения являются жидкости и порошки, помещенные в контейнер с пленочным дном: они идеально контактируют с предметным столиком.

Оценка погрешностей при многократных измерениях некоторых материалов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Оценка погрешностей при многократных измерениях материалов

Материал	Геометрия, размеры, мм	Среднее значение вых. сигнала, мВ	Абсолютная СКО, мВ	Относительная СКО, %
Оптическое стекло	Линза плоско-вып. Ø55, h 20	291,28	0,108	0,037
Вода в контейнере	Цилиндр Ø 43, h 30	180,19	0,109	0,06
Кварц	Призма V = 10x13x55	270,76	0,093	0,034
Дюраль	Диск Ø 90, h 4	414,85	0,145	0,035
Медь	Цилиндр Ø 15, h 15	210,72	0,138	0,065

Для оценки суммарной относительной СКО (среднеквадратической ошибки измерения k) следует учесть ошибку компарирования: сравнения рядовых измерений с измерениями k эталонного образца. По нашим данным она не превышает средних значений, приведенных в табл. 1. Следовательно, суммарная СКО не должна превышать 0,1 % для плоских образцов.

Процесс «размагничивания» поясним на произвольно выбранных моделях, составленных из стандартных диа- и парамагнитных материалов.

1. Одностороннее (асимметричное) размагничивание (тип сборки I, рис. 2а). Базовый лист 1 укладывается на предметный столик ИМВ. На базовый лист последовательно помещаются компенсирующие листы с k обратной полярности, образующие пакет 2. Используется тонколистый материал толщиной 0,01–0,1 мм, включая алюминиевую и медную фольгу, фторопластовую пленку и т.п. Компенсация выходного сигнала ИМВ добивается толщиной компенсационного пакета (КП).

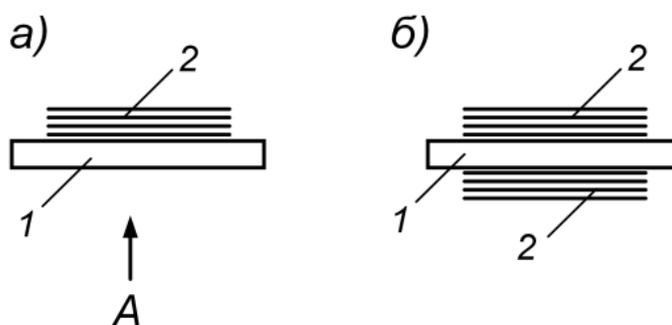


Рис. 2. Схемы моделей для размагничивания листового материала

2. Двухстороннее (симметричное) размагничивание (тип сборки II, рис. 2б). Выбирается базовый лист 1 какой-либо полярности. С обеих сторон базового листа укладываются одинаковые компенсационные пакеты 2, подбором толщины которых добиваются нулевого выходного сигнала. В этом варианте модель будет размагничена с обеих сторон. Компенсационные слои можно осуществлять путем намотки на базовый лист гибкой ленты из материала обратной полярности.

Размагничивание листовых материалов можно использовать для криволинейных поверхностей, применяя для этого пленочные материалы, а возможно, и напыление каким-либо металлом. Практические результаты по размагничиванию некоторых материалов приведены в табл. 2.

В качестве материала для компенсационного пакета использовался алюминий. Из таблицы следует, что средняя предельная величина размагничивания составляет $5 \cdot 10^{-8}$ ед. СИ, что эквивалентно уменьшению k для стандартных диа- и парамагнетиков примерно в 200 раз.

Практические материалы по размагничиванию материалов

№ п/п	Тип сборки	Базовый лист		КП	Остаточный сигнал	
			Толщина листа, мм	Толщина пакета, мм	мВ	к, ед. СИ
1	I	Стеклотекстолит	0,36	0,36	- 1,5	$6 \cdot 10^{-8}$
2	II	Стеклотекстолит	0,86	0,06+0,06	+ 1,5	$6 \cdot 10^{-8}$
3	I	Стеклотекстолит	1,24	0,5	+1,0	$4 \cdot 10^{-8}$
4	I	Стеклотекстолит	1,54	5,64	- 1,2	$5 \cdot 10^{-8}$
5	I	Медь	1,2	1,58	+ 1,4	$6 \cdot 10^{-8}$
6	I	Оргстекло	1,44	4,81	+ 1,0	$4 \cdot 10^{-8}$
7	II	Текстолит	1,05	0,16+0,16	+ 1,3	$5,5 \cdot 10^{-8}$
8	II	Пластик	0,45	0,08+0,08	- 1,2	$5 \cdot 10^{-8}$
9	I	Пластик	0,76	0,96	- 1,0	$4 \cdot 10^{-8}$

Таким образом, с помощью чувствительного каппаметра создана простая технология искусственного размагничивания материалов для использования их в точном приборостроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кротевич Н. Ф., Сергеев В. Г. Портативный высокочувствительный измеритель магнитной восприимчивости // Геофизическая аппаратура. – 1983. – Вып. 78. – С. 11–20.

© Ю. А. Копытенко, Н. Ф. Кротевич, М. Н. Никитенко, 2015

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВРЕМЕН ПЕРВЫХ ВСТУПЛЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ С РАЗДЕЛЬНОЙ ПАМЯТЬЮ*

Александр Алексеевич Никитин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)330-60-18, e-mail: NikitinAA@ipgg.sbras.ru

Александр Сергеевич Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-57, e-mail: AleksanderSerdyukov@yandex.ru

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)363-67-14, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Представлен новый алгоритм распараллеливания конечно-разностного решения уравнения эйконала. Предложенный алгоритм является основой нашей реализации метода сейсмической томографии. Конечной целью работы является создание программного обеспечения для решения масштабных трехмерных задач сейсмологической томографии на вычислительных платформах с раздельной памятью.

Ключевые слова: сейсмическая томография, уравнение эйконала, fast sweeping method, сингулярное разложение, параллельный алгоритм.

PARALLEL IMPLEMENTATION OF SEISMIC TRAVELTIME COMPUTATION FOR 3D TOMOGRAPHY ON MPI PLATFORMS

Alexandr A. Nikitin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D. student, tel. (383)330-60-18, e-mail: NikitinAA@ipgg.sbras.ru

Alexandr S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Researcher, tel. (383)335-64-57, e-mail: AleksanderSerdyukov@yandex.ru

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)363-67-14, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (номер проекта 15-05-06752) и грантов компании ВР для молодых ученых.

We present a new parallel implementation of fast-sweeping method of solving eikonal equation for computing seismic traveltimes. The proposed algorithm is the base of developing 3D tomography package for MPI platforms.

Key words: seismic tomography, eikonal equation, fast sweeping method, singular value decomposition, parallel algorithm.

Метод сейсмической томографии получил широкое распространение при обработке региональных и глобальных сейсмологических данных. Повышение эффективности вычислительных алгоритмов является актуальной задачей. Частично это связано с появлением новых алгоритмов, обладающих большей пространственной разрешенностью. Рассматриваемые подходы требуют использования мелких шагов по пространству при аппроксимации исследуемых трехмерных скоростных разрезов. В результате возникает необходимость хранения масштабных трехмерных сеток в оперативной памяти. Другой важной задачей является ускорение вычислений. В частности, в ряде регионов России происходит развертывание региональных систем наблюдения. Резко растет число фиксируемых сейсмических событий и объем данных для обработки. Таким образом, актуальным направлением исследований является поиск способов использования возможностей высокопроизводительных вычислительных платформ с разделенной памятью.

Ключевым этапом разработки параллельных томографических алгоритмов является решение прямой кинематической задачи расчета времен пробега волн и построения томографической матрицы, т. к., собственно, решение системы линейных уравнений является достаточно универсальной процедурой и для ее параллельной реализации существуют стандартные библиотеки. Наиболее универсальным подходом к расчету времен пробега волн является конечно-разностное решение уравнения эйконала и процедура обратного лучевого трассирования на его основе. В силу необходимости учета графа зависимостей значений решения уравнения в узлах расчетной сетки, эффективное распараллеливание вычислений является отдельной научной задачей. Использование разделенной памяти усложняет эту задачу.

В работе предложен алгоритм параллельной реализации конечно-разностного решения уравнения эйконала методом *fast-sweeping* [1], подходящий для вычислительных систем с распределенной памятью. Результат является новым, т.к. задача реализации рассматриваемого метода на платформах данного типа ранее не рассматривалась. С нашей точки зрения, метод *fast-sweeping* является в настоящее время единственной схемой, допускающей относительно простое и эффективное распараллеливание на платформах с распределенной памятью. Предложенный параллельный алгоритм расчета пробега был использован авторами при разработке реализации метода сейсмической томографии для решения масштабных трехмерных задач.

Параллельный алгоритм расчета времен пробега

Основу используемой схемы сейсмической томографии составляет расчет времен пробега сейсмических волн с помощью численного решения уравнения эйконала:

$$|\nabla u(x)| = f(x), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (1.1)$$

В качестве базового численного алгоритма решения уравнения эйконала на регулярных сетках для параллельной реализации в данной работе был выбран Fast Sweeping Method (FSM) [1] – итеративный метод, использующий схемы первого порядка с разностями против потока для дискретизации частных производных и итерации Гаусса-Зейделя с чередующимся направлением обхода. Алгоритм FSM в оригинальной формулировке является последовательным, т.к. каждая итерация цикла обхода сетки с заданным направлением зависит от результата предыдущих итераций данного цикла. Решение в узле с индексами (i, j, k) для заданного направления обхода может быть обновлено после того, как будут обновлены элементы с индексами, меньшими или большими (i, j, k) , в зависимости от направления обхода. Таким образом, решение может одновременно обновляться в узлах сетки из множества индексов (i, j, k) , задаваемого числом $C = d_i i + d_j j + d_k k$, где $d_i, d_j, d_k \in \{-1, 1\}$ определяются направлением обхода.

В данной работе была разработана следующая новая параллельная реализация алгоритма FSM для работы в системах с распределенной памятью. Для распределения задач по процессам используется декомпозиция трехмерной вычислительной сетки по двум измерениям между процессами и локальная декомпозиция по третьему измерению внутри процессов на подзадачи (рис. 1). При таком распределении данных образуется виртуальная топология «решетка», в которой каждый процесс отвечает за вычисление фиксированного блока сетки $\{u_{i,j,k} \mid i \in [i_1, i_2], j \in [j_1, j_2], k \in [0, K-1]\}$.

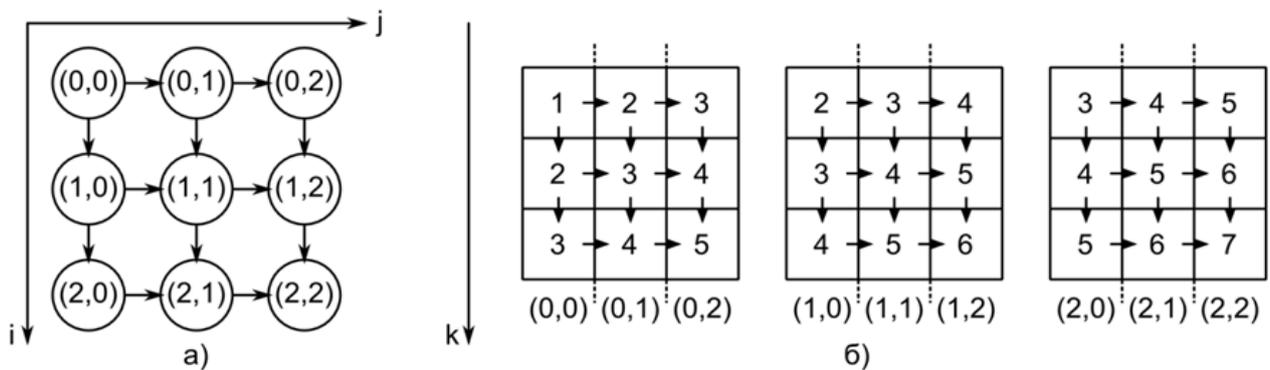


Рис. 1. Схема реализации алгоритма FSM в распределенной памяти:

- а) топология коммуникаций между процессами. Указаны (i, j) координаты процессов в топологии и направление обхода; б) в ячейках указан порядок вычисления блоков подзадачи в (i, j) процессах для заданного направления обхода и направление обмена теньевыми гранями

Исходя из зависимостей по данным в алгоритме FSM, между соседними по топологии процессами производится обмен теньвыми гранями на границах блоков: в процессе текущей итерации Гаусса-Зейделя по направлению обхода, а до начала следующей итерации завершается обмен гранями против направления текущего обхода. Двумерная декомпозиция между процессами позволяет запускать вычисления в двух соседних процессах по топологии одновременно, а разбиение блока по третьему измерению внутри процесса на подзадачи позволяет избежать пересылок больших объемов данных между процессами и быстрее запускать вычисления в соседних процессах, чем это было бы возможно при использовании только двумерной декомпозиции сетки. Запуск вычисления подзадачи в процессе производится, как только в его память поступят все необходимые данные, то есть будут обновлены теньвые грани.

Тестирование алгоритма: эффективность и пример расчета

В ходе тестирования программной реализации приведенного подхода на кластере Новосибирского государственного университета нам удалось добиться эффективности распараллеливания около 70 %. Расчеты проводились на скоростной модели объемом 22 Гб: сетка с размерами 1800 точек в каждом направлении, было задействовано 36 узлов кластера, в каждом по 4 потока. Время расчета составило около 2 минут. Данный результат не является окончательным. Ведутся поиски алгоритмических и технических решений для дальнейшей оптимизации программ. Пример вычислений времен пробега при помощи рассматриваемого алгоритма показан на рис 2. Представлены контуры времен пробега в трехмерной скоростной модели с высококонтрастным включением.

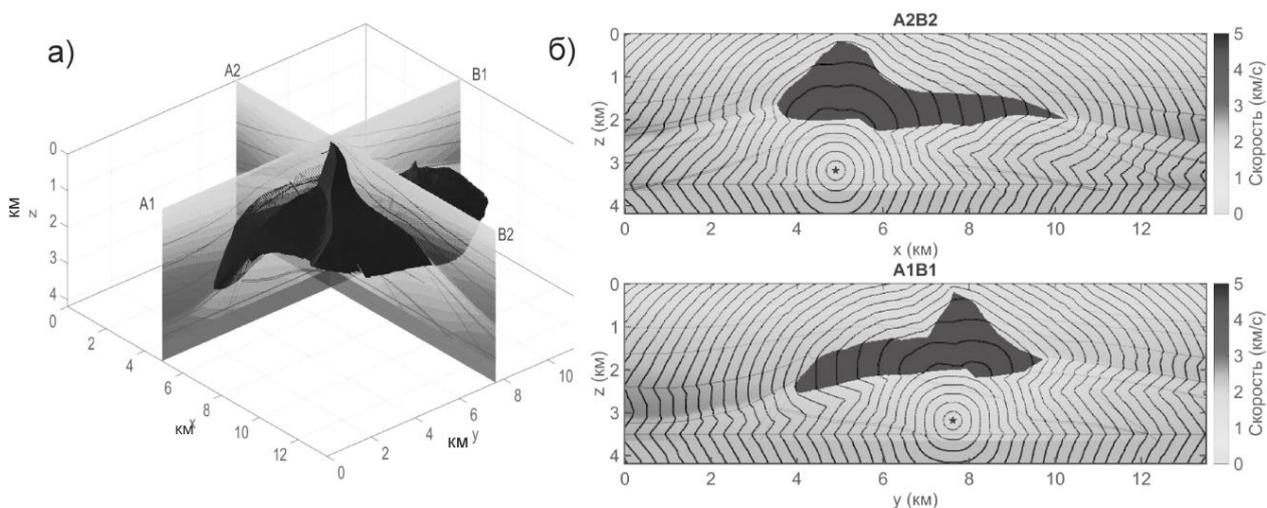


Рис. 2. Пример расчета времен пробега для сложной трехмерной модели:

- а) трехмерная скоростная модель и плоскости сечений; б) двумерные сечения модели по приведенным плоскостям и изолинии времен первых вступлений, рассчитанные предложенным в работе алгоритмом

Томография на платформах с разделенной памятью

В данном разделе мы кратко опишем нашу реализацию метода сейсмической томографии. В настоящее время при численном решении задач сейсмической томографии преобладает матричный подход [3]. При таком подходе уточнение скоростной модели сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большого размера:

$$Ax = b, \quad (1.2)$$

где b – вектор невязок времен пробега для наблюдаемых и синтетических данных, x – неизвестное приращение медленности, A – томографическая матрица. Эффективные методы построения матрицы (1.2) основаны на использовании вычисленных полей времен пробега. В случае классической лучевой сейсмической томографии может быть использована простая и эффективная процедура обратного лучевого трассирования. Она сводится к построению лучей, соединяющих источники с приемниками, путем построения линий тока векторного поля градиента вычисленных времен пробега. Данная процедура была реализована нами для систем с распределенной памятью на основе приведенного выше алгоритма расчета времен пробега сейсмических волн. Томографическая матрица A является разреженной и плохо обусловленной, поэтому для решения системы уравнений требуется регуляризация. Нами был использован метод усеченного сингулярного разложения [4, 5].

Поиск старшей части сингулярного спектра в рассматриваемой ситуации целесообразно проводить при помощи итерационных процедур вычисления собственных чисел и векторов разреженной матрицы AA^* типа Арнольди [7]. Для эффективной реализации структур хранения разреженных матриц нами была использована библиотека PETSc [6], а для реализации алгоритма усеченного разложения – библиотека SLEPc [7].

В работе был предложен новый параллельный алгоритм расчета времен первых вступлений сейсмических волн, для которого показана эффективность распараллеливания 70 % при выполнении 36 узлах. Алгоритм является составной частью параллельной реализации метода трехмерной сейсмической томографии, которую планируется применять при обработке сейсмологических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao H. A fast sweeping method for eikonal equations // Mathematics of computation. – 2005. – Т. 74, № 250. – С. 603–627.
2. Detrixhe M., Gibou F., Min Ch. A parallel fast sweeping method for the Eikonal equation // Journal of Computational Physics. – 2013. – Т. 237. – С. 46–55.
3. Natterer F. The mathematics of computerized tomography. Siam. – 1986. – V. 32.
4. Решения уравнений первого рода с компактным оператором в гильбертовых пространствах: существование и устойчивость // Доклады Академии наук. – 1997. – Т. 335, № 3. – С. 308.

5. Кабанник А. В., Орлов Ю. А., Чеверда В. А. Численное решение задачи линейной сейсмической томографии на проходящих волнах: случай неполных данных // Сиб. журн. индустр. матем. – 2004. – Т. 7 (2). – С. 54–67.
6. Balay S. et al. PETSc Users Manual // Argonne National Laboratory, Tech. Rep. ANL-95/11. – Revision 3.5. – 2014.
7. Roman J. E., Campos C., Romero E., Tomas A. SLEPc Users Manual // D. Sistemes Informatics i Computació, Universitat Politecnica de Valencia, Tech. Rep. DSIC-II/24/02. – Revision 3.5. – 2014.

© А. А. Никитин, А. С. Сердюков, А. А. Дучков, 2015

АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ СЕРИИ «ИМПУЛЬС-А»

Сергей Владимирович Барсуков

ООО ГП «Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 30/1, инженер-геофизик, тел. (383)344-92-44, e-mail: turmalin@ngs.ru

Андрей Борисович Овчаренко

ООО ГП «Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 30/1, ведущий инженер-электронщик, тел. (383)344-92-44, e-mail: ovcharenko@sibgeotech.ru

Владимир Викторович Павленов

ООО ГП «Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 30/1, инженер-электронщик, тел. (383)344-92-44, e-mail: bobcha@mail.ru

Сергей Дмитриевич Саленко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой АГД, тел. (383)346-19-97, e-mail: agd@craft.nstu.ru

Андрей Сергеевич Сверкунов

ФГУП «СНИИГГиМС», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, инженер 1-й категории, тел. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

Георгий Михайлович Тригубович

ФГУП «СНИИГГиМС», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Радик Фазылович Шайдуллин

ФГУП «СНИИГГиМС», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер, тел. (383)222-42-03

Константин Анатольевич Шатилов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, заведующий лабораторией, тел. (383)346-19-97, e-mail: agd@craft.nstu.ru

Представлено краткое техническое описание семейства вертолетных аэрогеофизических комплексов «Импульс-А». Приведён состав используемого приборного оборудования, как стандартного, так и разработанного авторами статьи. Приведено описание основы комплекса – электромагнитного канала: принцип работы, состав, геометрические размеры, электрические параметры.

Ключевые слова: метод переходных процессов, временная область, несущий стеклопластиковый каркас, приёмно-генераторная система, коммутатор П-образных импульсов тока, усилитель сигнала переходного процесса, АЦП, система сбора информации, акселерометр.

AEROGEOLOGICAL COMPLEXES OF SERIES «IMPULS-A»

Sergey V. Barsukov

LTd GP «Sibgeotech», 630087, Russia, Novosibirsk, 30/1 Karl Marks Prospect, Geophysicist, tel. (383)344-92-44, e-mail: turmalin@ngs.ru

Andrey B. Ovcharenko

LTd GP «Sibgeotech», 630087, Russia, Novosibirsk, 30/1 Karl Marks Prospect, Leading Electronics Engineer, tel. (383)344-92-44, e-mail: ovcharenko@sibgeotech.ru

Vladimir V. Pavlenov

LTd GP «Sibgeotech», 630087, Russia, Novosibirsk, 30/1 Karl Marks Prospect, Electronics Engineer, tel. (383)344-92-44, e-mail: bobcha@mail.ru

Sergey D. Salenko

NGTU, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks Prospect, Doctor of Science, Professor, Head of Department, tel. (383)346-19-97, e-mail: agd@craft.nstu.ru

Andrey S. Sverkunov

FGUP «SNIIGiMS», 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasniy Prospect, Engineer of 1 category, tel.: +7 (383) 222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

Georgy M. Trigubovich

FGUP «SNIIGiMS», 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasniy Prospect, Doctor of Science, Professor, Scientific Director of Geophysical Research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Radik F. Shaidullin

FGUP «SNIIGiMS», 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasniy Prospect, Chief Engineer, tel. (383)222-42-03

Konstantin A. Shatilov

NGTU, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks Prospect, Head of the Laboratory, tel. (383)346-19-97, e-mail: agd@craft.nstu.ru

A brief technical description of aero-geophysical unit “Impuls-A” is presented. Moreover, the content of standard equipment and equipment developed by authors of the issue is provided. Also, the frame of the unit – electromagnetic aircraft platform has been described: principles of operation, geometrical dimensions, electric parameters.

Key words: method of transient, time domain, carrying a fiberglass frame, receiving-generating system, switch Π -shaped current pulses, transient signal amplifier, ADC, system for collecting information, accelerometer.

Основой вертолетных аэрогеофизических комплексов серии «Импульс-А» является электромагнитный канал. Он состоит из приёмно-генераторной системы (ПГС), включающей генераторную петлю (ГП), приёмные антенны, устройства сбора и регистрации данных (УСРД) для реализации метода переходных процессов (во временной области). ПГС располагается на каркасе, выполненном из стеклопластика; диаметр каркаса – от 14.2 до 20 м. С помощью

специального трос-кабеля длиной 50 м каркас прикрепляется к внешней подвеске вертолѐта и транспортируется им на высоте около 50 м над поверхностью земли со скоростью в пределах от 100 до 120 км/ч. УСРД располагается в грузовой кабине вертолѐта. Зонд позволяет оценивать проводимость локальных участков земной горы на глубинах до 300 ÷ 500 м.

Для транспортировки комплексов используется вертолѐт типа Ми-8. В настоящее время ведутся работы по модернизации комплекса для использования вертолѐта с допустимой взлѐтной массой не более 3 т.

В состав комплекса также входят:

- Стандартная геофизическая аппаратура, включающая в себя датчик магнитного поля Земли с цезиевым чувствительным элементом типа Scintrex CS-3 и комплект сцинтилляционных радиационных спектрометров типа RS-500;
- Стандартная навигационная аппаратура GPS-Глонасс, в том числе система для экипажа вертолѐта на основе приёмника GARMIN с выводимой на экран траекторией движения комплекса над участком земной поверхности; навигационный приёмник для получения сигнала PPS, навигационный компьютер, предназначенный для регистрации фактической траектории движения ПГС;
- Стандартный авиационный доплеровский радиовысотомер.

На каркасе ПГС устанавливаются измерительные антенны, MEMS-акселерометры и инклинометры, сигналы которых через АЦП поступают на автономный планшетный компьютер. Датчики позволяют оценить влияние колебаний ПГС в магнитном поле Земли на сигнал Е-канала, а также определять значения вертикальной скорости и ускорения каркаса при посадке. Там же могут присутствовать видеокамеры-регистраторы, позволяющие визуально оценивать прогибы, деформации, разрушения и т.п. Каркас состоит из секционированных полых стекловолоконных труб, образующих торообразную основу и центральную балку, на которую устанавливаются измерительные антенны (ИА) и контейнер с электронным оборудованием. ГП представляет собой отрезок медного изолированного провода сечением от 30 до 50 мм². Провод укладывается по периметру каркаса в несколько витков. Их может быть от 2 до 6. В хвостовой части каркаса симметрично относительно центральной балки устанавливается пара стабилизаторов. Центральная высокочастотная антенна имеет форму тора диаметром 830 мм и обладает моментом около 41 м²; её граничная частота равна 500 кГц. Дополнительная низкочастотная антенна имеет форму прямоугольника 2000x1000 мм, момент 100 м² и полосу пропускания 100 кГц. Для усиления сигналов ИА и согласования их с УСРД служат малошумящие антенные усилители (коэффициент усиления 10, полоса пропускания 1 МГц). В контейнере для оборудования располагается коммутатор тока, формирующий двухполярные импульсы, подаваемые на ГП. Там же размещены и планшетные компьютеры. На рис. 1 показан общий вид зонда, буксируемого вертолѐтом МИ-8.

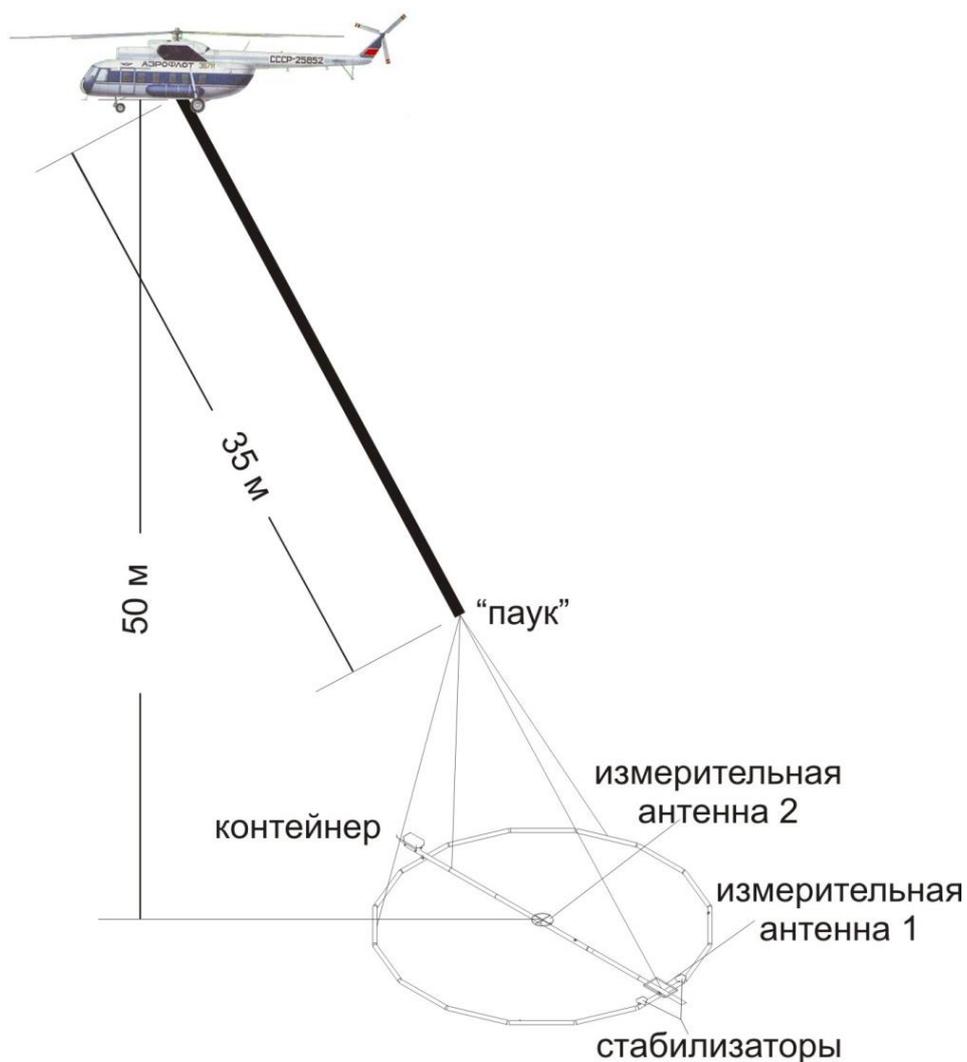


Рис. 1. Общий вид системы «Импульс-А», буксируемого вертолётом Ми-8

Амплитуда тока ГП может быть установлена в пределах 200÷250 А. Временная диаграмма формирования импульсов П-образных импульсов тока может меняться в зависимости от решаемой задачи, в том числе и от электропроводности изучаемой среды. Величина амплитуды тока и параметры временной диаграммы задаются с помощью блока синхронизации.

В грузовой кабине вертолёта расположено УСРД. Устройство состоит из следующих узлов:

- Двухсекционного многоканального усилителя постоянного тока;
- Стандартного многоканального АЦП с выходом на USB-порт;
- Ручного корректора смещения нулевых уровней многоканальных усилителей для обеих секций;
- Схемы измерения частоты выходного напряжения магнитометра;
- Схемы преобразования сигнала радиовысотомера. В зависимости от типа используемого высотомера схема может обрабатывать либо аналоговый сигнал, либо цифровой код заданного формата: RS-232, ARINC-429 и пр.

Двухсекционный многоканальный усилитель и многоканальный АЦП служат для преобразования аналоговых сигналов, поступающих от обоих ИА. Сигналы с выходов АЦП, схем измерения частоты напряжения магнитометра и преобразования сигнала высотомера поступают в порты компьютера. Программное обеспечение позволяет визуализировать сигналы ИА, высотомера и магнитометра, а также сохранять полученные данные на двух SSD накопителях, включенных в режиме RAID1.

Многоканальный усилитель позволяет измерять сигналы ИА в большом динамическом диапазоне: от 20 вольт до сотен нановольт. В зависимости от типа применяемого АЦП используются усилители на 2, 3 и 4 канала с различными коэффициентами усиления и различными полосами пропускания.

В различных вариантах комплекса используются АЦП разных производителей и с разными характеристиками. Количество двоичных разрядов может быть 14 или 16, частота опроса на канал может быть от 500 тыс. до 2 млн опросов в секунду. Используются АЦП производства National Instruments (USA), L-CARD и «Центр АЦП» (Россия).

УСРД конструктивно представляет собой блок формата 1U, который закреплён в вертикальной приборной стойке. В ней же расположен блок отбора мощности формата 6U: коммутационная панель, с помощью которой можно оперативно подавать или снимать напряжение питания с различных узлов. В новой модификации комплекса будет предусмотрен визуальный контроль напряжения бортовой сети (силовых аккумуляторов) и токов потребления. В этой же приборной стойке расположен блок суммирования сигналов радиационных спектрометров, а также компьютер на выдвижной полке.

В грузовой кабине вертолёта расположены два спектрометра и радиовысомер. Магнитометр, заключенный в стеклопластиковый корпус типа ракеты, закрепляется на трос-кабеле в 15 метрах от фюзеляжа вертолёта. В настоящее время комплекс проходит сертификацию в ГосНИИГА как техническое средство авиационного применения (ТС АП).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ № 2201603. Устройство для аэрогеофизической разведки. – 2003.
2. Тригубович Г. М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 8. – С. 80–87.

© С. В. Барсуков, А. Б. Овчаренко, В. В. Павленов, С. Д. Саленко,
А. С. Сверкунов, Г. М. Тригубович, Р. Ф. Шайдуллин, К. А. Шатилов, 2015

ЛИТОЛОГО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ УЧАСТКА САЛЫМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ КЕРНА И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Мария Александровна Павлова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-07-81, e-mail: mapavlova@gmail.com

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, тел. (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Вика Георгиевна Эдер

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-23-03, e-mail: vika@mobisters.mobi

Вячеслав Николаевич Глинских

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, тел. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Анна Дмитриевна Камкина

ООО «Геофизические Системы Данных», 117198, Россия, г. Москва, Ленинский пр., 113/1, петрофизик, тел. (495)234-27-94, e-mail: kamkanna@gmail.com

Альвина Григорьевна Замирайлова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-23-03, e-mail: ZamirailovaAG@ipgg.sbras.ru

На основе комплексного анализа данных участка Салымского месторождения Широкого Приобья с использованием установленных связей данных ГИС пяти близкорасположенных скважин и керновых данных по одной из них изучено строение баженовской свиты и создана ее модель, проведены исследования зависимостей сигналов электрокаротажа от электрофизических параметров и связей последних с выделенными литологическими типами. Впервые построены карты толщин литотипов баженовской свиты участка, на западе которого установлено увеличение толщин пород смешанного состава с высоким содержанием органического вещества. Отмечена общая направленность изменений толщин для всех литотипов с северо-востока на юго-запад.

Ключевые слова: Западная Сибирь, Салымское месторождение, баженовская свита, ГИС, литотипы.

LITHOLOGICAL AND GEOELECTRICAL MODELS OF THE BAZHENOV FORMATION BY THE DATA FROM SALYM OILFIELD AREA

Maria A. Pavlova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Research Associate, tel. (383)330-07-81, e-mail: mapavlova@gmail.com

Karina V. Suhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Vika G. Eder

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)333-23-03, e-mail: vika@mobisters.mobi

Vyacheslav N. Glinskikh

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Anna D. Kamkina

«Geophysical Data Systems», 117198, Russia, Moscow, 113/1 Leninsky Prospect, Petrophysicist, tel. (495)234-27-94, e-mail: kamkanna@gmail.com

Albina G. Zamirailova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)333-23-03, e-mail: ZamirailovaAG@ipgg.sbras.ru

Characterization of Bazhenov Formation and its model were made with the use of Salym oil-field data. These data were presented by relationship of log data between five closely spaced wells and by core data from one of them. Dependence of the electric log signals from the electrophysical parameters were studied and their connections with lithological types were defined. The original Bazhenov Formation lithotype thickness maps were constructed. Layer thickness of rocks with a high total organic content increase to the western part of the site. Thickness changes for all lithotypes is oriented from north-east to south-west.

Key words: Western Siberia, Salum oil-field, Bazhenov Formation, log-data, lithotypes.

В интервалах баженовской свиты проводится большое количество геофизических исследований в скважинах (ГИС), однако в опубликованных материалах встречаются единичные примеры изучения её физических параметров в сопоставлении с геологическими характеристиками разреза [1, 2]. Породы баженовской свиты по своим физическим свойствам существенно отличаются не только от вмещающих толщ, но и между собой, что позволяет разделить их на литотипы по ГИС и керну скважин. В данной работе под литотипом понимается литологические разности или их сочетания, объединенные по одинаковым геофизическим признакам.

Работа направлена на изучение строения баженовской свиты небольшого участка Салымского месторождения Широтного Приобья, размером 2х2 км. С учетом предыдущих исследований керна и ГИС баженовской свиты [7, 10–11] изучен разрез свиты, проведена комплексная интерпретация керновых данных (1 скважина) и данных ГИС пяти близкорасположенных скважин (расстояние – от 0.42 до 1.3 км). Литотипы баженовской свиты обособлены на кросс-плотах трёх основных методов ГИС: БК, ГК и НКТ, пересчитанного в водородосодержание W. Наиболее чётко литотипы баженовской свиты выделяются на кросс-плоте БК и ГК, где каждый охарактеризован своей областью. В скважинах без керна удалось выделить те же литотипы, что и в изученной скважине с керном: 1) аргиллиты; 2) кремнисто-глинистые породы с повышенным содержанием глины (~40%) 1 типа; 3) кремнисто-глинистые породы 2 типа; 4) породы смешанного состава (смешанные породы+микросталлические силициты); 5) силициты-радиоляриты.

Построены корреляционные разрезы, на основе которых создана база данных абсолютных отметок залегания литотипов в пяти скважинах. С использованием программного пакета Surfer впервые построены семь структурных карт по кровлям литотипов баженовской свиты: по кровле свиты (кровле аргиллитов); по кровле кремнисто-глинистых пород 1 типа верхней и нижней части баженовской свиты; по кровле кремнисто-глинистых пород 2 типа; по кровле пород смешанного состава (смешанные породы+микросталлические силициты); по кровле силицитов-радиоляритов; по подошве баженовской свиты.

Баженовская свита района исследования во всех изученных скважинах имеет следующее строение. Сверху вниз расположение литотипов следующее: аргиллиты, кремнисто-глинистые породы 1 типа, породы смешанного состава (смешанные породы+микросталлические силициты), силициты-радиоляриты, кремнисто-глинистые породы 2 типа, кремнисто-глинистые породы 1 типа с тонкими слоями аргиллитов. Отметим, что для данной территории количество глинистого материала в центральной части свиты наименьшее.

Впервые построены структурные карты по кровлям литотипов и карты толщин литотипов баженовской свиты. Наблюдается общая направленность изменений толщин для всех литотипов – с северо-востока на юго-запад. К востоку изучаемого участка увеличиваются мощности литотипов преимущественно терригенного генезиса – аргиллитов и кремнисто-глинистых пород 1 типа, что подтверждает выводы предыдущих исследователей о расположении источников сноса на востоке баженовского моря [3, 5–6]. По направлению к западу увеличиваются мощности литотипов пород преимущественно биогенного генезиса: смешанного состава (смешанных пород и микросталлических силицитов) и кремнисто-глинистых пород 2 типа. Опыт исследований баженовской свиты на других месторождениях [1, 2, 7, 11] показывает, что в каждом районе строение свиты будет отличаться.

Для выявления эффективного комплекса ГИС при изучении баженовской свиты и построения ее геоэлектрической модели проведены исследования зависимостей сигналов электрокаротажа от электрофизических параметров и связей

последних с выделенными литологическими типами. Определение электрофизических свойств пород свиты на основе численной инверсии данных электромагнитных и электрических методов зондирования проведено с использованием нового программно-алгоритмического обеспечения, разработанного в ИНГГ СО РАН [4, 8–9]. Применение сеточных и интегральных методов в вычислительных алгоритмах обеспечивает возможность реалистичного описания сложного строения свиты, вскрытой скважиной, при высоком контрасте электрофизических свойств; эффективность программ значительно повышается в результате вычислений на графических ускорителях. Таким образом, для построения электрофизической модели баженовской толщи по данным бокового каротажного и электромагнитного каротажных зондирований детально восстановлено пространственное распределение удельного электрического сопротивления и его анизотропия, оценена эффективная относительная диэлектрическая проницаемость и выявлена ее частотная дисперсия. Установлены средние значения и частотные зависимости электрофизических параметров для разных литотипов.

Авторы признательны к.г.–м.н. В.А. Казаненкову за помощь в получении части материалов для исследования, к.г.–м.н. Е.А. Костыревой за проведение аналитических работ по органической геохимии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литологические особенности пород отложений нижнетутлеимской подсвиты Фроловской НГО в связи с особенностями её нефтеносности / А. Д. Алексеев, В. Д. Немова, В. Н. Колосков, С. С. Гаврилов // Геология нефти и газа. – 2009. – № 2. – С. 27–33.
2. Алексеев А. Д. Баженовская свита: в поисках большой сланцевой нефти на Верхнем Салыме. Ч. 2 // *ROGTEC*, 2014. – Вып. 35. – С. 14–27.
3. Геология нефти и газа Западной Сибири / А. Э. Конторович, И. И. Нестеров, Ф. К. Салманов В. С. Сурков, А. А. Трофимук, Ю. Г. Эрвье. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
4. Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И. 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.
5. Захаров В. А. Условия формирования волжско-берриасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии/ *Эволюция биосферы и биоразнообразия*. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – С. 552–568.
6. Литология, органическая геохимия и условия формирования основных типов пород баженовской свиты (Западная Сибирь) / А. Э. Конторович, В. Н. Меленевский, Ю. Н. Занин, А. Г. Замирайлова, В. А. Казаненков, В. В. Казарбин, Е. Н. Махнева, Л. С. Ямковая // *Геология и геофизика*. – 1998. – Т. 39, № 11. – С. 1477–1491.
7. Павлова М. А., Сухорукова К. В., Глинских В. Н. Интерпретация данных электрометрии на интервале баженовской свиты // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 132–136.
8. Суродина И. В., Эпов М. И. Влияние биополимерных буровых растворов на диаграммы высокочастотного электромагнитного каротажа // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53, № 8. – С. 1062–1069.

9. Сухорукова К. В., Нечаев О. В. Сигналы бокового каротажного зондирования в анизотропных отложениях по результатам численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 102–107.

10. Эдер В. Г., Замирайлова А. Г., Занин Ю. Н. Основные типы разрезов и микротекстуры баженовской свиты // Фациальный анализ в нефтегазовой литологии: труды II Регионального совещания посвященного 100-летию со дня рождения доктора геолого-минералогических наук Л. Н. Ботвинкиной; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2012. – С. 156–166.

11. Особенности формирования баженовской свиты на границе юры и мела в центральной части Западной Сибири / В. Г. Эдер, А. Г. Замирайлова, Ю. Н. Занин, П. А. Ян, Е. М. Хабаров // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всероссийского литологического совещания (Новосибирск, 28–31 октября 2013 г.). В 3 т. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Т. III. – С. 309–313.

© М. А. Павлова, К. В. Сухорукова, В. Г. Эдер, В. Н. Глинских,
А. Д. Камкина, А. Г. Замирайлова, 2015

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ УЭС ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦОВ В ЛАБОРАТОРИИ

Михаил Евгеньевич Пермяков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, и.о. заведующего лабораторией естественных геофизических полей, тел. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

Альберт Дмитриевич Дучков

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

Андрей Юрьевич Манаков

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, доктор химических наук, заведующий лабораторией клатратных соединений, тел. (383)316-53-46, e-mail: Manakov@niic.nsc.ru

Николай Алексеевич Манченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)330-25-91, e-mail: ManchenkoNA@ipgg.sbras.ru

Изготовлена лабораторная установка, позволяющая моделировать мерзлые и гидратосодержащие образцы и измерять их удельное электрическое сопротивление при разных Р-Т условиях. На установке выполнена серия экспериментов по измерению УЭС при разных температурах, давлениях и содержаниях воды, льда и гидрата тетрагидрофурана (ТГФ). Установлено, что, когда в порах образца содержатся гидраты и раствор ТГФ (с добавлением незначительного количества NaCl), фиксируется низкое УЭС, которое определяется высокой подвижностью ионов в растворе ТГФ. Наличие в образце гидратов ТГФ повышает УЭС образца всего на 180–320 Ом·м. А при полном замораживании происходит стабилизация УЭС на уровне 70–80 кОм·м.

Ключевые слова: газовые гидраты, гидратосодержащие осадки, физические свойства, удельное электрическое сопротивление, лабораторный эксперимент.

RESULTS OF LABORATORY MEASUREMENTS OF ELECTRICAL RESESTIVITY OF HYDRATE-BEARING SAMPLES

Mikhail E. Permyakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory of Natural geophysical fields, tel. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

Albert D. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Chief Researcher, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Andrei Yu. Manakov

Nikolayev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Lavrentiev Prospect, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Clathrate compounds, tel. (383)316-53-46, e-mail: Manakov@niic.nsc.ru

Nikolay A. Manchenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Engineer, tel. (383)330-25-91, e-mail: ManchenkoNA@ipgg.sbras.ru

Laboratory setup has been made that allows forming frozen and hydrate containing samples and measuring their resistivity under different pressures and temperatures. A series of experiments have conducted using the setup to measure the resistivity under different temperatures, pressures and content of water, ice and THF hydrate. Due to high ion mobility in THF solution the low values of resistivity have been revealed when there were hydrates and THF solution (with small amount of NaCl was added) in the pore space. The resistivity of the samples rose only by 180-320 Ohm·m in the presence of hydrate. The resistivity stabilized at a value of 70-80 kOhm·m after the sample was completely frozen.

Key words: gas hydrates, hydrate bearing sediments, physical properties, electrical resistivity, laboratory experiment.

Основной целью исследований удельного электрического сопротивления (УЭС) гидратосодержащих и мерзлых образцов является развитие геофизических методов поиска и разведки скоплений газовых гидратов в донных осадках глубоких водоемов. Для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их УЭС в ИНГГ СО РАН совместно с ИНХ СО РАН была создана экспериментальная установка, состоящая из рабочей камеры, измерительного и вспомогательного оборудования. На рис. 1 представлено схематическое изображение (1а) установки и внешний вид камеры высокого давления (1б).

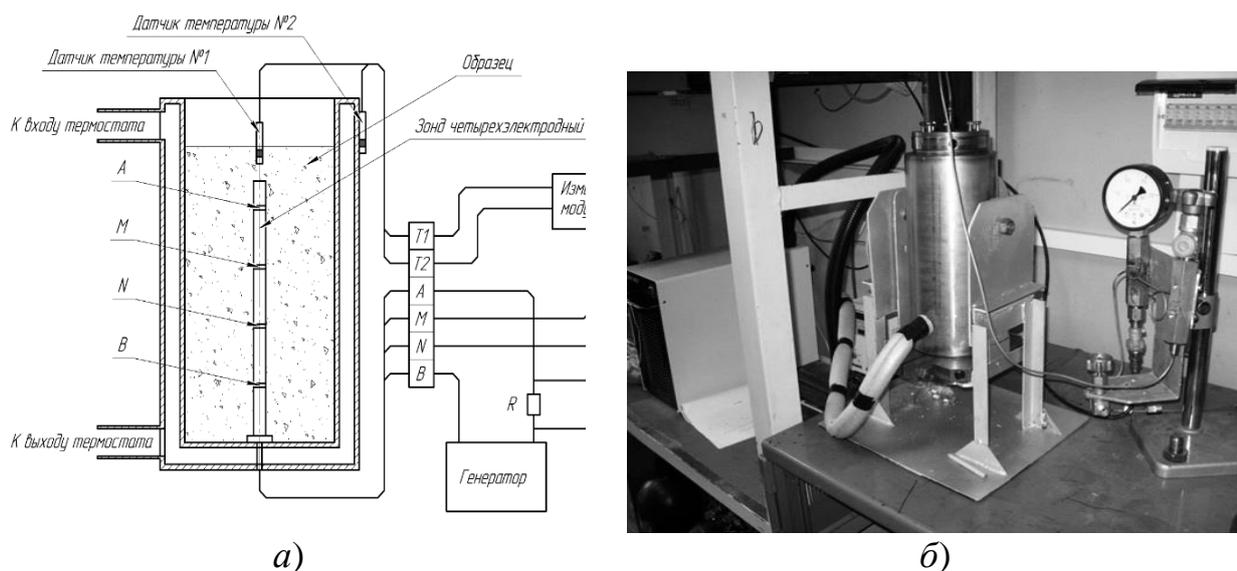


Рис. 1. Схема установки и камера высокого давления. В нижней части камеры виден теплоизолированный шланг, по которому подается термостатирующая жидкость

Основным блоком установки является стальная цилиндрическая камера высокого давления. Камера рассчитана на давление газа до 10 МПа. Внутренний диаметр камеры – 100 мм, длина – 250 мм, объем – порядка 4 дм³. Верх и низ камеры закрываются обтюраторами, которые уплотняются резиновыми и фторопластовыми кольцами. Для поддержания нужной температуры камера окружена стальной полостью (выполнена как единое целое с камерой), по которой в процессе эксперимента циркулирует термостатирующая жидкость. В качестве последней используется полиметилсилоксан – жидкость с высоким удельным электрическим сопротивлением. Термостатирование осуществляется с помощью жидкостного термостата со стабильностью 0.1 °С. Для измерения удельного электрического сопротивления образца применяется четырехэлектродный зонд АМNB, размещенный в центре камеры (рис. 1б). Зонд представляет собой пластиковую трубку, заполненную эпоксидной смолой, внутри которой размещаются соединительные провода, соединенные с кольцевыми электродами на внешней части зонда. Общая длина зонда – около 140 мм, расстояние между электродами – 26 мм, длина электродов – 3.5 мм.

При формировании гидратсодержащих образцов на разных этапах исследований мы использовали в качестве гидратообразователей метан (СН₄), углекислый газ (СО₂) и тетрагидрофуран (С₄Н₈О). Методика формирования гидратсодержащего образца из газовой фракции подробно описана в работе [1]. В настоящей статье приводятся результаты исследования образцов, содержащих гидрат тетрагидрофурана (ТГФ). ТГФ является прозрачной бесцветной жидкостью, замерзающей при минус 109°С. ТГФ хорошо смешивается с водой и формирует гидрат при замерзании гомогенной жидкости (19.4 масс. % раствор ТГФ в воде). Гидрат ТГФ весьма удобен для лабораторных экспериментов. При его применении гидрат формируется из растворенной фазы, что чаще всего и происходит в природе. Несмотря на различные типы структур (гидрат ТГФ – кубическая структура II, гидрат метана – кубическая структура I) и различную полярность гостевых молекул (ТГФ полярен, метан нет), большинство физических свойств гидрата тетрагидрофурана близки к таковым для гидрата метана (кроме диэлектрических и механических при оттаивании). Многочисленными исследованиями показано, что гидрат ТГФ можно использовать в качестве удобной экспериментальной модели гидрата метана при изучении теплопроводности, электросопротивления и акустических свойств гидратсодержащих образцов [2, 3 и др.].

Образцы с гидратом ТГФ изготавливаются следующим образом. В водный раствор тетрагидрофурана (22 % ТГФ по массе), залитый в камеру установки, засыпается при перемешивании кварцевый песок таким образом, чтобы измерительный зонд был полностью погружен во флюидонасыщенный образец. Все это делается при комнатной температуре и атмосферном давлении. В результате поровое пространство оказывается заполнено раствором. Чтобы избежать испарения ТГФ, верхний обтюратор камеры закрывается и начинается работа гидрата посредством понижения температуры. В водном растворе ТГФ при атмосферном давлении гидрат начинает образовываться после снижения тем-

пературы до +3–4°C. В ходе эксперимента температура измеряется цифровым датчиком DS18B20 на наружной стенке камеры и в зазоре между камерой и теплоизоляцией (рис. 1).

После окончания наработки гидрата проводятся измерения УЭС методом сопротивлений. Измерительная схема представлена на рис. 2. Во время измерений через образец пропускается синусоидальный электрический сигнал амплитудой в несколько вольт и заданной частотой (в основном использовалась частота 600–1000 Гц) от низкочастотного генератора сигналов ГЗ-109. Падение напряжения измеряется на электродах MN (ΔU_{MN}) и на эталонном сопротивлении $R_{эт} \approx 100$ Ом (ΔU_R). Последнее необходимо для оценки силы тока, протекающего через образец ($I = \Delta U_R / R_{эт}$).

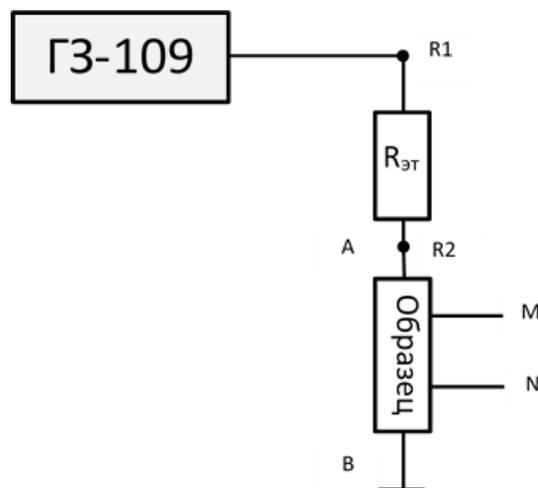


Рис. 2. Схема измерения УЭС методом сопротивлений.

Значение УЭС может быть вычислено по формуле:

$$\rho = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot R_{эт} (\Delta U_{MN} / \Delta U_R) = 32,7 (\Delta U_{MN} / \Delta U_R), \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

где $r = 0,026$ м – расстояние между парой соседних электродов в зонде. Экспериментальная процедура включает измерение падения напряжения между точками M и N, R1 и R2, температуры в образце и времени. Затем по формуле (1) рассчитывается значение УЭС. Измерения УЭС мерзлых или гидратсодержащих образцов в процессе их формирования или оттаивания обычно продолжаются длительное время (до суток).

При тестировании установки проводились измерения УЭС различных образцов, в том числе растворов различной концентрации NaCl в дистиллированной воде (для сравнения результатов с табличными данными), а также песка с насыщением порового пространства слабым раствором NaCl в дистиллированной воде. Также в ходе этих калибровочных экспериментов была установлена величина относительно погрешности получаемых результатов. Она составила 3 %. Образец изготавливался путем тщательного механического переме-

шивания песка с раствором и последующей его загрузки в камеру установки. Использовались образцы с содержанием раствора (по массе) 5, 10, 15, и 19 %. Получены следующие значения электрического сопротивления: 482 Ом·м, 240 Ом·м, 122 Ом·м, и 95 Ом·м соответственно. Для исключения случайных ошибок УЭС каждого образца измерялось дважды – сразу после загрузки и после выстойки в течение 20–40 минут. Таким образом, выполненный эксперимент показал, что применяемая техника и методика обеспечивает высокую точность измерений в диапазоне 90–500 Ом·м.

После тестирования проводились эксперименты по измерению УЭС образцов, содержащих гидраты ТГФ. На рис. 3а представлены примеры результатов измерения УЭС и Т образцов в процессе формирования в них гидратов ТГФ при сохранении в порах некоторого количества раствора ТГФ. Образцы в экспериментах 1 и 2 отличались между собой начальным количеством раствора при одинаковом соотношении компонент. В эксперименте 1 раствор был в избытке, он перекрывал песок, в эксперименте 2 после загрузки образца излишки раствора были удалены из камеры. После завершения образования гидратов Т и УЭС стабилизируются. Скачок УЭС, наблюдаемый перед стабилизацией, вероятнее всего, вызван перемещением оставшегося флюида в центральной части образца (вблизи зонда). Значения УЭС после стабилизации равны 210 (эксп.1) и 420 (эксп.2) Ом·м. Очевидно, что такое низкое УЭС гидратсодержащего образца определяется высокой электропроводимостью раствора ТГФ. Наличие в образце гидратов ТГФ повышает УЭС образца всего на 180 (эксп. 4) и 320 (эксп. 5) Ом·м.

Гидратосодержащие образцы с твердой фазой в поровом пространстве изготавливались по описанной выше процедуре с тем отличием, что рабочая температура в камере составляла $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты двух измерений УЭС таких образцов (эксп.3, эксп.4) представлены на рис. 3б.

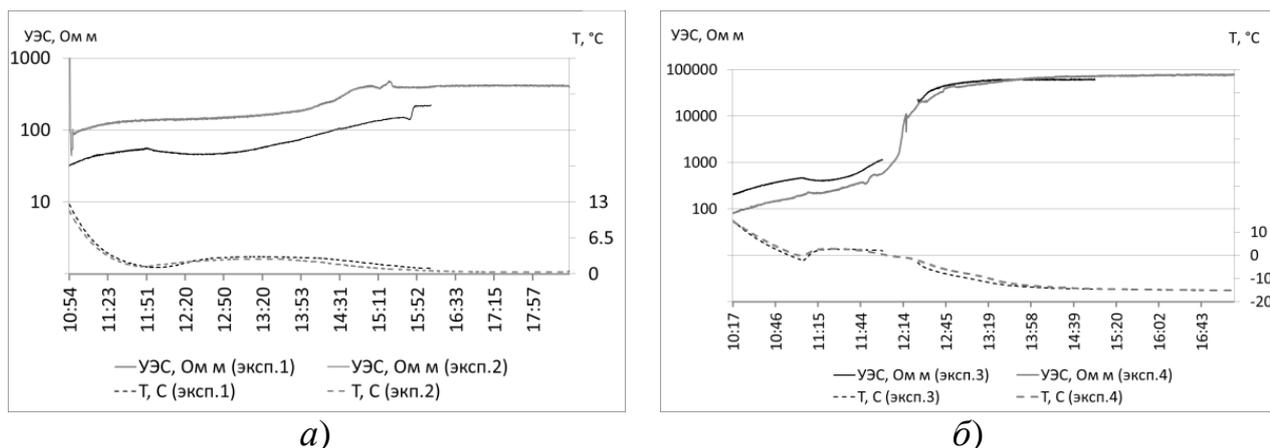


Рис.3. Изменение УЭС и температуры в процессе образования гидрата ТГФ в образце:

а) в поровом пространстве – раствор ТГФ в воде; б) в поровом пространстве образца – лед и гидрат ТГФ

После полного гидратообразования и замораживания образцов происходит стабилизация УЭС на уровне 70–80 кОм·м. Примерно такой же порядок величин УЭС наблюдался при завершении экспериментов и с мерзлыми образцами. Это наблюдение еще раз подтверждает, что гидраты ТГФ характеризуются электросопротивлением, сопоставимым с УЭС льда, что затрудняет их дифференциацию только лишь по этому параметру. В то же время в результате проведенных экспериментов показана пригодность созданной установки для моделирования и проведения измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дучков А. Д. и др. Измерение теплопроводности синтетических образцов донных осадков, содержащих гидраты метана // Физика Земли. – 2009. – № 8. – С. 42–50.
2. Lee JY, Santamarina JC, Ruppel C. Parametric study of the physical properties of hydrate-bearing sand, silt, and clay sediments: 1. Electromagnetic properties // J. Geophys. Res. – 2010. – 115: B11104.
3. Waite W.F. et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments // Reviews of geophysics. – 2009. – 47, RG4003. – P. 1–38

© М. Е. Пермяков, А. Д. Дучков, А. Ю. Манаков, Н. А. Манченко, 2015

ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ В ТРЕХ ПУНКТАХ

Валерий Викторович Плоткин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

С помощью численного эксперимента показана возможность синтеза площадного распределения поля по данным синхронной регистрации в трех пунктах наблюдений.

Ключевые слова: кажущееся сопротивление, магнитотеллурическое зондирование.

POSSIBILITIES OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING AT SYNCHRONOUS DATA RECORDING IN THREE POINTS

Valery V. Plotkin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Leading Research Scientist, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Using simulation, it is shown possibility of synthesis of a surface field distribution by synchronous data registration in three points.

Key words: apparent resistance, magnetotelluric sounding.

Основой магнитотеллурического зондирования является индукционное возбуждение Земли в поле естественных источников, обусловленное слабой проводимостью атмосферы. На больших удалениях от источника первичное поле (ТЕ-мода) на поверхности Земли хорошо представляется вертикально падающей плоской волной. Однако в зонах, близких к источнику, а также в общем случае в следующем приближении поле вдоль земной поверхности является неоднородным. Преодолеть возникающие в этой ситуации трудности теоретически можно с помощью синхронного площадного зондирования. Но на практике оно по причине высокой стоимости реализуется редко. Поэтому актуальным представляется эксперимент с регистрацией поля лишь тремя синхронно работающими пунктами, которых вполне достаточно для определения амплитуд двух преобладающих пространственных гармоник – вертикально падающей на среду волны и преобладающей волны наибольшей амплитуды, распространяющейся от источника вдоль земной поверхности. Важно также, что это дает возможность снизить вычислительные затраты при решении обратной и прямой задач за счет постановки верхних граничных условий на поверхности Земли – задания на ней в правых частях уравнений поля амплитуд пространственных гармоник, определенных экспериментально. Конечно, с увеличением количества пунктов синхронной регистрации данных (но и соответственно затрат) можно определить больший набор амплитуд простран-

ственных гармоник и точнее зарегистрировать неоднородную структуру поля на земной поверхности.

Существенно, что особенность данного подхода – задание на поверхности Земли в качестве источника части поля, представленной пространственными гармониками с амплитудами, надежно определенными из эксперимента. При постановке верхнего граничного условия можно использовать двумерное Фурье преобразование неоднородного поля на земной поверхности. Количество пространственных гармоник при решении прямой задачи определяется задаваемой детальностью описания неоднородной среды (размерами шагов по латеральным координатам). При малом количестве пунктов регистрации детальность описания среды не может быть высокой из-за существующей неопределенности эксперимента, проявляющейся в том, что неоднородность поля на земной поверхности обусловлена как первичными источниками, так и неоднородностью среды. Поскольку структура источника первичного поля неизвестна, верхние граничные условия для пространственных гармоник, не определяемых экспериментом, приходится связывать с неоднородностью среды, предполагая их затухание вглубь атмосферы. Следует отметить, что достоверность получаемых сведений о среде при таком подходе вполне контролируема: она зависит от количества пунктов регистрации.

При индукционном возбуждении горизонтально слоистого разреза поле ТМ-моды в среде не возникает, поскольку на границе с непроводящей атмосферой обращается в нуль вертикальная компонента электрического поля. Однако при наличии латеральных неоднородностей среды даже на границе с непроводящей атмосферой на поверхности Земли возникают ненулевые горизонтальные компоненты электрического поля ТМ-моды, обеспечивающие растекание поступающих из глубины токов вдоль этой поверхности. Таким образом, поле ТМ-моды обусловлено лишь латеральной неоднородностью среды, а источником первичного поля в непроводящей атмосфере не возбуждается. Поэтому высказанное выше предположение о затухании части пространственных гармоник вглубь атмосферы полностью выполняется по отношению к полю ТМ-моды.

Латеральные неоднородности вносят вклад и в компоненты магнитного поля обеих мод на поверхности Земли. Важно, что вклад приповерхностных неоднородностей в компоненты магнитного поля равен нулю на больших временных периодах, когда толщина скин-слоя существенно превышает мощность слоя неоднородностей. Это свойство поля ТМ-моды приводит к тому, что на земной поверхности удобнее выделять поле ТЕ-моды и задавать амплитуды преобладающих пространственных гармоник, определяемые по зарегистрированным компонентам магнитного поля.

Используя бимодальное представление электромагнитного поля на земной поверхности, в эксперименте можно выделить моды при наличии лишь трех пунктов синхронной регистрации. Это можно сделать как по данным о компонентах только электрического или только магнитного полей, так и по компонентам обоих полей совместно [1].

При площадном синхронном зондировании многими пунктами на полигоне фиксируется мгновенное неоднородное распределение поля и затем вычисляются спектры пространственных гармоник компонент этого поля на поверхности, чтобы использовать их для определения неоднородностей среды. Можно предположить, что из-за изменчивости естественных источников неоднородность первичного поля будет меняться от сеанса к сеансу. Возникает возможность последовательно в разных сеансах найти искомые спектры пространственных гармоник компонент поля на поверхности даже в случае трех пунктов синхронного зондирования. Действительно, в предположении неизменности среды в течение всего эксперимента в разных сеансах будут регистрироваться ее отклики на возбуждение различными пространственными гармониками первичного поля. Используя совместно результаты всех сеансов, можно синтезировать возбуждение исследуемой среды произвольно неоднородным первичным полем, тем самым осуществляя мало затратное “площадное синхронное зондирование”. Такой подход также позволит найти неоднородности среды.

Конечно, при трех пунктах регистрации можно определить лишь характеристики преобладающих пространственных гармоник в полях обеих мод электромагнитного поля. Это дает приближенное представление об отклике среды. Поэтому условия применимости данного подхода должны быть изучены в численных экспериментах и на практике.

С этой целью были проведены численные расчеты для модели трехмерно неоднородной среды – проводящего слоя с меняющимся по глубине и латерали удельным сопротивлением ρ , находящегося в однородном полупространстве с сопротивлением $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$:

$$r_s = 25 + 25 \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x}{144} \right)^2 - \left(\frac{y}{162} \right)^2 \right\},$$

$$\rho^{-1}(x, y, H) = 0.001 + 0.01 \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{H - r_s}{7} \right)^4 \right\},$$

$$0 \leq H \leq 80,$$

Используются положительные значения глубины $H > 0$, x, y, H, r_s , задаются в км, ρ – в Ом·м. В середине проводящего слоя на глубине 25 км сопротивление падает до $\sim 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Слой неоднороден по латерали: он испытывает локальное погружение в центре полигона. Размеры полигона составляют по оси ординат $L_y = 1620 \text{ км}$ и по оси абсцисс $L_x = 1440 \text{ км}$.

Расчеты электромагнитного поля выполнялись на основе представления поля в виде взаимосвязанных в трехмерно неоднородной среде ТЕ- и ТМ-мод [2, 3]. Вводились потенциалы магнитного и электрического полей обеих мод. Из уравнений Максвелла была получена система трех уравнений для введенных потенциалов, которая решалась с помощью метода матричной прогонки. Граничные условия на боковых гранях изучаемого объема представлялись условиями периодичности поля и среды по горизонтальным осям. На глубине 300 км

(нижнее граничное условие) потенциалы поля задавались равными нулю. Считалось также, что ниже 200 км электропроводность с глубиной экспоненциально увеличивается по закону Лаири-Прайса [4]. На поверхности Земли для ТМ-моды ставилось условие равенства нулю вертикального тока, а магнитный потенциал ТЕ-моды задавался в соответствии со сказанным одной из пространственных гармоник $\sim \exp(ik_x x + ik_y y)$. Волновые числа определялись размерами полигона $k_{x,y} = 2\pi m / L_{x,y}$, $m = 1, 2$. Были проведены расчеты поля в неоднородной среде отдельно для каждой из этих пространственных гармоник. В силу линейности уравнений Максвелла их решением будет также сумма всех рассчитанных полей пространственных гармоник. Расчеты выполнены для временного периода 15,71 с.

В качестве экспериментальных данных выбирались компоненты полей в трех пунктах регистрации с координатами $x_j, y_j = (0, 0), (240, 0)$ и $(0, -270)$ в км, начало системы координат – в центре полигона. Обработка экспериментальных данных проводилась по схеме, описанной в [1]. В качестве данных различных сеансов наблюдений использовались значения компонент поля, полученные для выбранных пространственных гармоник. При обработке с использованием данных синхронной регистрации в трех пунктах для всех сеансов определялись характеристики ТЕ- и ТМ-мод и волновые числа пространственных гармоник. Это позволяло затем синтезировать поля на всей поверхности полигона.

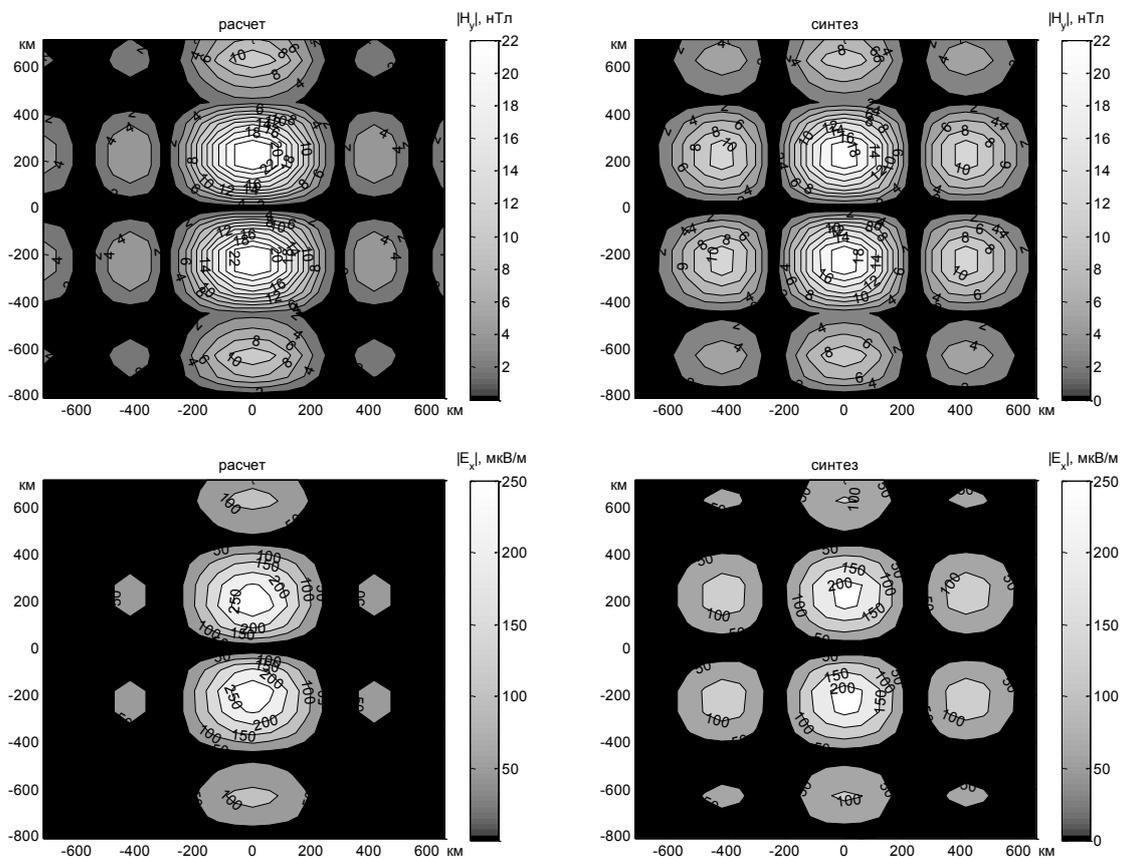


Рис. 1. Карты распределений суммарных полей до и после фильтрации

Качество подобной фильтрации данных проверялось сравнением расчетных и восстановленных полей. Для примера на рис.1 приведены карты распределений некоторых суммарных полей до и после фильтрации. Соответствие этих карт подтверждает возможность синтеза площадного распределения поля по данным синхронной регистрации тремя пунктами наблюдений.

Еще одним доказательством этого вывода может быть построение карт латерального распределения кажущейся электропроводности по площадным данным с помощью метода согласования компонент. Способы построения карт описаны в [2, 3]. На рис. 2 для примера приведено распределение кажущегося электрического сопротивления, полученное обычным способом по расчетным данным для полей одной пространственной гармоники, и для сравнения распределение кажущегося электрического сопротивления, найденное методом согласования компонент по данным о синтезированном поле. Карты вполне отражают основные особенности латерального распределения удельного электрического сопротивления исследуемого проводящего слоя.

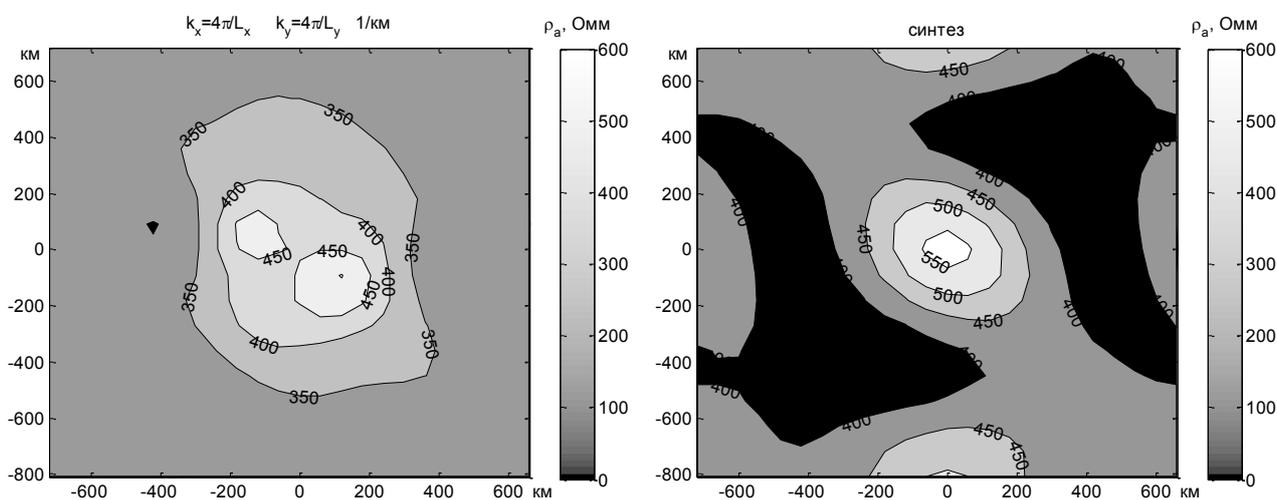


Рис. 2. Карты распределений кажущегося электрического сопротивления

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plotkin V.V. Synchronous magnetotelluric sounding with non-uniform source field excitation [Electronic resource] // Problems of Geocosmos: Proceedings of the 10th International Conference (St. Petersburg, Petrodvorets, October 6-10, 2014). - St. Petersburg, 2014. - P. 45–51. - Режим доступа: http://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2014/Geocosmos2014proceedings.pdf
2. Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А, Губанов А.И. Эффект нелокальности электромагнитного отклика при региональном магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49., № 11 - С. 1152–1160.
3. Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2012. - Т. 53, № 1. - С. 140–149.
4. Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли: монография. - Киев: Наукова Думка, 1981. - 296 с.

© В. В. Плоткин, 2015

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА «БЕЛЬТИР» В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ ПО ДАННЫМ МЕТОДА СОПРОТИВЛЕНИЙ

Петр Валерьевич Пономарев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (952)916-79-62, e-mail: PonomarevPV@ipgg.sbras.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (913)890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В статье рассмотрено геоэлектрическое строение западного замыкания Чуйской впадины по данным методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электротомографии, выполненных на территории западной части Чуйской впадины Горного Алтая. Работы проводятся в области наиболее близкой к эпицентру разрушительного Чуйского землетрясения (27.09.2003 $M=7,3$) – на полигоне «Бельтир» в долине реки Чаган. Измерения ВЭЗ были начаты в 2004 г. и продолжаются в настоящее время. Каждый год выполняются новые измерения для уточнения строения. Кроме того, существует целый ряд режимных пунктов, измерения в которых повторяются ежегодно.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование, электротомография, Чуйское землетрясение, геоэлектрическое строение западной части Чуйской впадины.

STRUCTURE OF «BELTIR» GEODYNAMIC TEST GROUND IN CHUYA BASIN BY RESISTIVITY METHOD

Peter V. Ponomarev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Researcher, tel. (952)916-79-62, e-mail: PonomarevPV@ipgg.sbras.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Senior Researcher, tel. (913)890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

The article describes the results of studies by vertical electrical sounding (VES) and electrical tomography performed in the western part of the Chuya basin in Altai mountains. Work conducted in the area closest to the epicenter of the devastating earthquake (09/27/2003 $M=7.3$) in the valley of Chagan river. VES measurements were started in 2004 and continues today. Each year, new measurements are carried out to clarify the structure. In addition, there are a number of regime points, in which the measurements are repeated every year.

Key words: vertical electric sounding, Chuya earthquake, seismically active zone, electrical tomography, geoelectric structure.

Современное строение Чуйской впадины обусловлено поэтапными тектоническими движениями, наиболее ярко проявляющимися в её краевых частях.

Целью данной работы является уточнение строения участка, расположенного в западном замыкании Чуйской впадины в зоне магистрального сейсморазрыва Чуйского землетрясения.

Участок полевых наблюдений ВЭЗ расположен в 20 км от эпицентра Чуйского землетрясения в долине р. Чаган. Расположение пунктов ВЭЗ и профилей электротомографии указано на рис. 1.

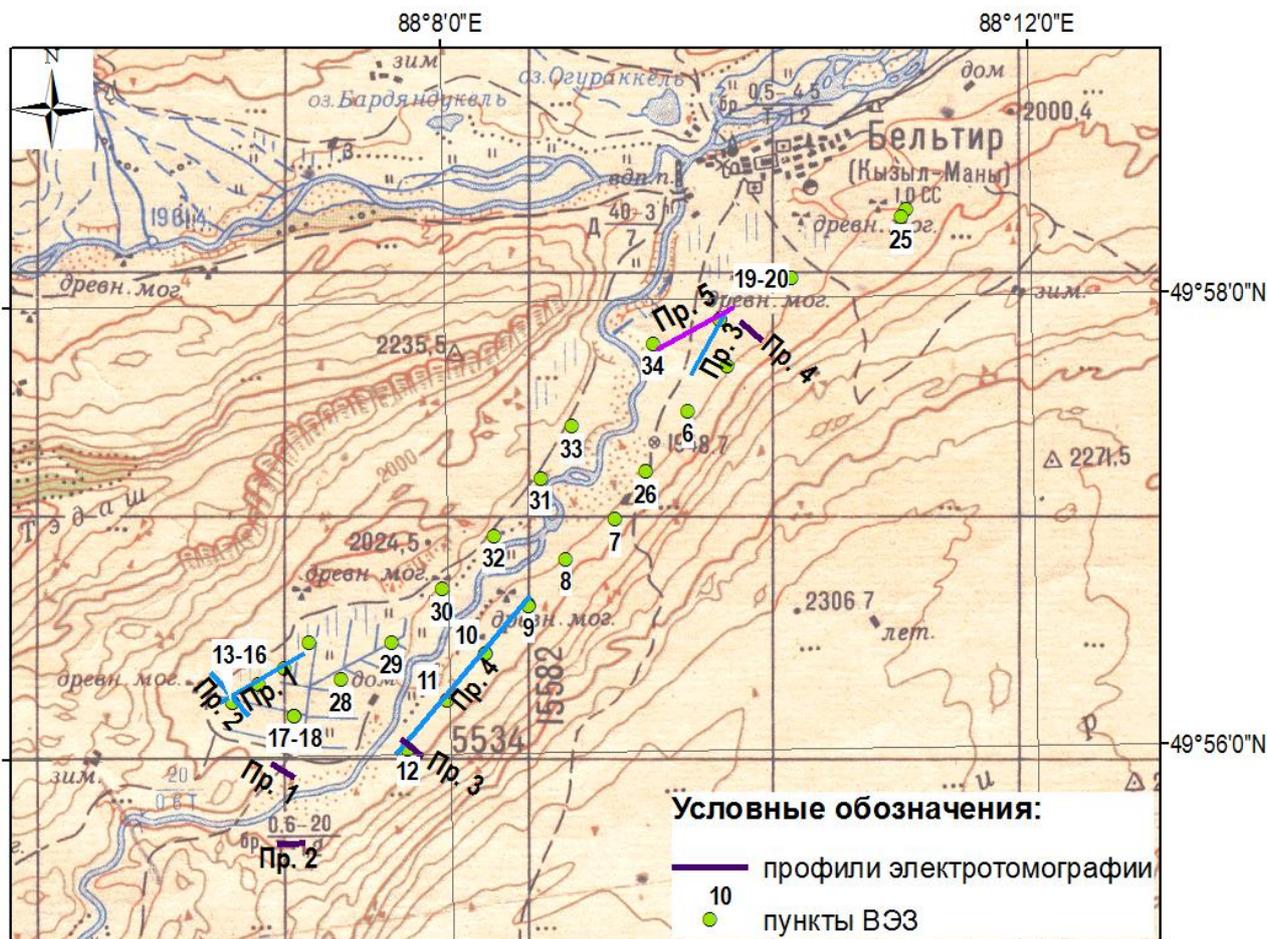


Рис. 1. Схема расположения пунктов ВЭЗ и профилей электротомографии на полигоне “Бельтир”

В верховьях реки Чаган после землетрясения образовалась система трещин, ориентированных преимущественно с северо-запада на юго-восток. Сейсмические дислокации наблюдались на поверхности долины в виде протяженных и глубоких трещин вспарывания длиной более 300 м со средним расстоянием между бортами трещин около 3 м. В 5 км от зоны трещиноватости в этой же долине находится протяженный участок, в пределах которого разрывных нарушений, видимых на поверхности, не обнаружено. Пункты зондирования были размещены в двух различных областях проявления последствий землетрясения. В трещиноватой зоне выполнены круговые и крестовые вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ 13-16, 17-18). В области с отсутствием тре-

щин размещен крестовый ВЭЗ 19-20. На участке были проведены также профильные измерения с шагом 250 метров (профиль 1) и с шагом около 500 метров (профиль 1, 2). Все крестовые, круговые ВЭЗ повторяются ежегодно. Кроме того, повторяются измерения в пунктах 9, 10, 11, 12 наиболее протяженного профиля 3, выполненного на правом берегу р. Чаган. Круговые и крестовые ВЭЗ выполнены для исследования анизотропных характеристик разреза.

Измерения методом ВЭЗ проводились симметричной градиентной четырехэлектродной установкой Шлюмберже. Размеры генераторной линии $AB/2$ находятся в интервале от 1.5 до 1000 м. Полевые данные ВЭЗ проинтерпретированы с использованием программных комплексов моделирования и инверсии «СОНЕТ» и ZondIP1D.

Для измерений методом электротомографии была использована станция «Скала-48М», предназначенная для работы методом сопротивлений в различных модификациях. Измерения проведены 48 электродной установкой Шлюмберже с расстоянием 5 метров между электродами. Обработка данных электротомографии проведена в программах двумерной инверсии ZondRes2d и Res2Dinv[5].

По результатам интерпретации данных ВЭЗ в комплексе «СОНЕТ» с привлечением априорной информации по скважинам получена многослойная модель среды. Характерные полевые кривые ВЭЗ и соответствующая им геоэлектрическая модель приведена на рис. 2.

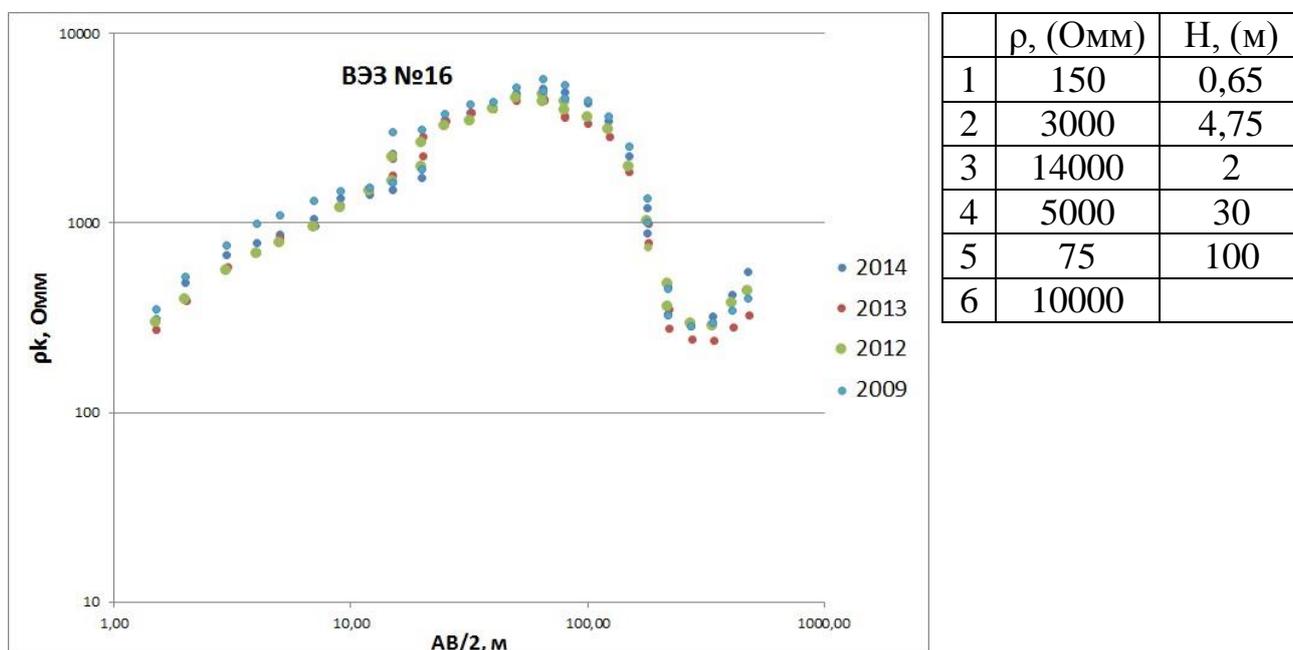


Рис. 2. Характерные полевые кривые ВЭЗ за несколько лет измерений

Два верхних маломощных слоя крайне неоднородны по удельному сопротивлению (УЭС), так как сложены речными отложениями различного состава: от мелкозернистых алевролитов до валунно-галечников. УЭС третьего и чет-

вертых слоев аномально высоко – от 5000 до 16000 Ом·м, что в соответствии с априорной информацией свидетельствует о присутствии в нем многолетней мерзлоты. Глубже залегает горизонт с мощностью до 100 м и УЭС 75 Ом·м, сложенный низкоомными озерными отложениями. На глубине 137 м находится опорный геоэлектрический горизонт с УЭС 10000 Ом·м.

Далее на рис. 3 представлена геоэлектрическая модель полигона по данным ВЭЗ (рис. 3а) и разрез по профилю ВЭЗ №3 (рис. 3б).

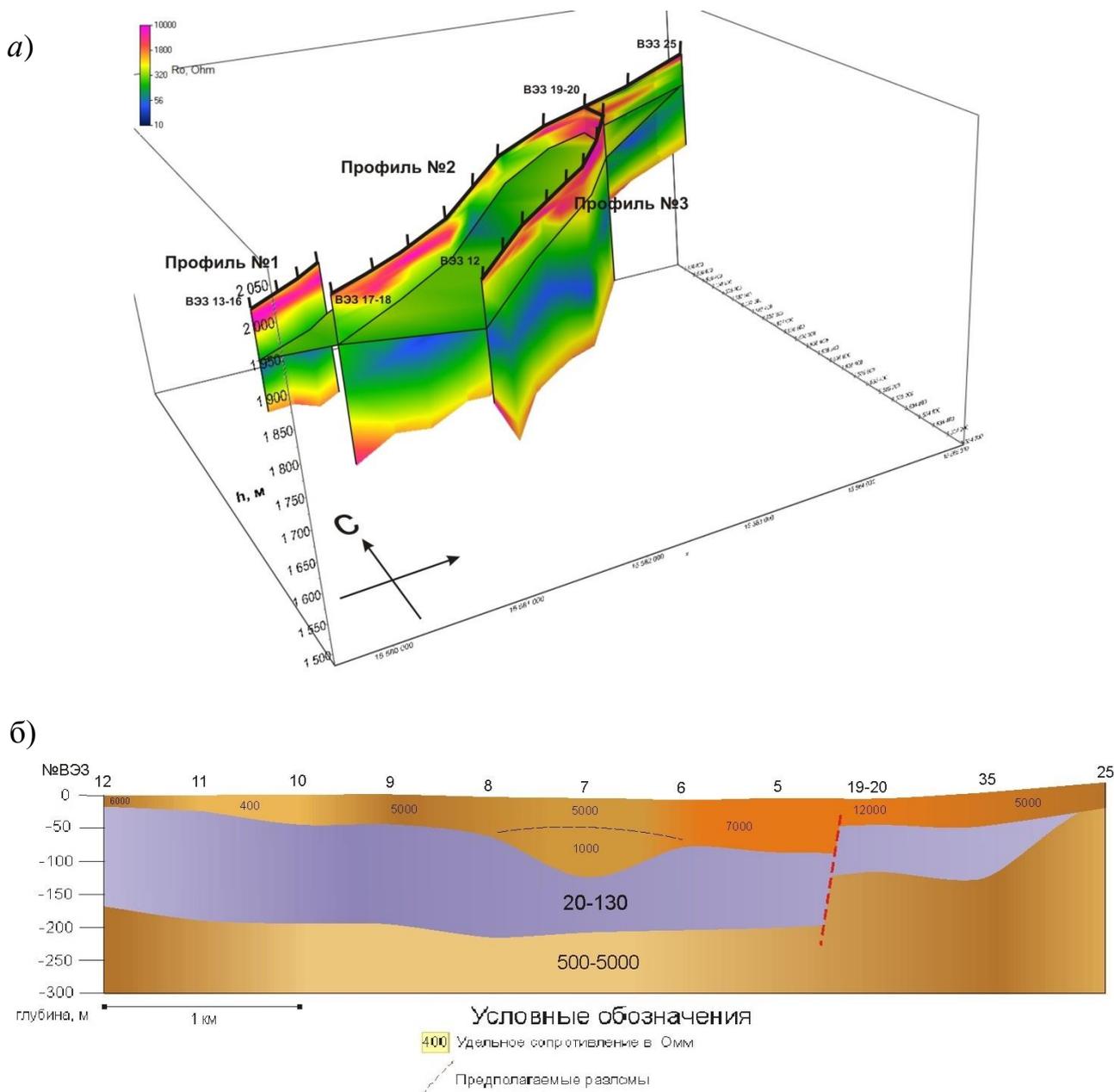


Рис. 3. а) геоэлектрическая модель полигона «Бельтир», б) разрез №3 по правому борту р. Чаган (одномерная инверсия)

Модель дает представление о строении всего участка исследований, а разрез характеризует блоковое строение участка, наличие разломов, а также особенности осадконакопления, присущие всей Чуйской впадине с присутствием на фундаменте мощного проводящего горизонта, сложенного тонкослоистыми песчано-глинистыми породами, на котором залегает высокоомные, неоднородные по составу породы.

Наличие в приповерхностном слое многолетнемерзлых пород, грубообломочных неоднородных по литологическому составу отложений формирует крайне неоднородную верхнюю часть разреза, что требует дополнительных исследований. Для уточнения строения верхней части разреза была применена электротомография на постоянном токе.

В качестве примера рассмотрим один из разрезов по профилю 1 по данным электротомографии. Профиль находится в районе кругового ВЭЗ №13-16 в трещиноватой зоне. На разрезе (рис. 4) детально отражена самая верхняя часть осадков с мощностью около 6–10 м и УЭС 300–1000 Ом м, представленная аллювиальными отложениями. Высокоомный горизонт с мощностью 20–30 м и УЭС до 10000 Ом м, залегающий ниже, представлен грубообломочными ледниковыми отложениями с наличием многолетней мерзлоты. Глубже 30–40 м наблюдается верхняя кромка слоя низкоомных озерных отложений. На отметке по профилю в 200 м выявлена аномальная зона, связанная с выходом на поверхность нескольких крупных сейсмодислокаций, которые выделены по геологическим данным и наблюдаются на дневной поверхности.

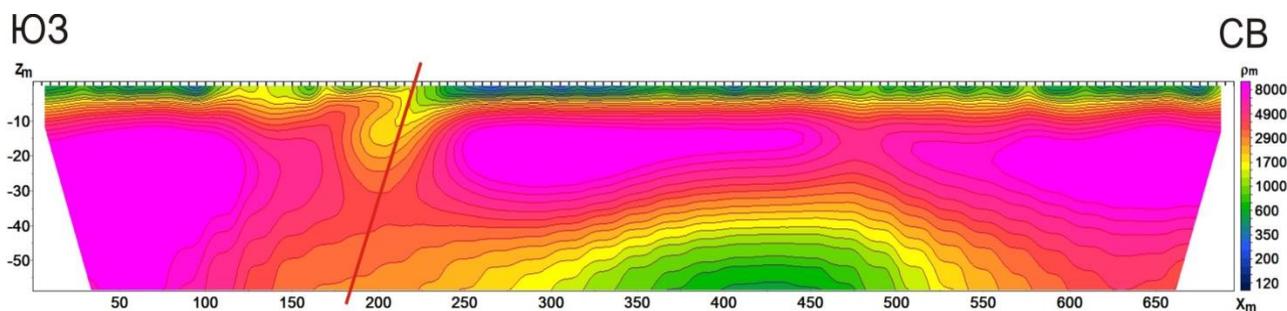


Рис. 4. Разрез по профилю электротомографии №1

По результатам интерпретации данных ВЭЗ и электротомографии с использованием программ одномерной и двумерной инверсии уточнено геоэлектрическое строение западного замыкания Чуйской впадины в долине р. Чаган. Получены глубины до фундамента и характеристики осадочных отложений практически для всего участка исследований. По данным электротомографии получены детальные геоэлектрические характеристики верхней части разреза до глубин в 40–50 м, а также характеристики разломных нарушений, связанных с современной сейсмической активностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девяткин, Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника юго-восточного Алтая. / Е.В. Девяткин. - Москва: Наука, 1965. - 244 с.
2. Неведрова, Н.Н. Реконструкция глубинного строения Чуйской Впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований. / Н.Н. Неведрова., М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Геология и геофизика. - 2001. - Т. 42., № 9. - С. 1399–1416.
3. Неведрова, Н.Н. Геоэлектрические исследования Чуйской впадины Горного Алтая для уточнения ее строения и четвертичной истории. / Н.Н. Неведрова, П.В. Пономарев, Е.В. Деев // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «Геобайкал 2010» (Иркутск, 5–20 августа 2010 г.).
4. Лузгин, Б.Н. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая. / Б.Н. Лузгин, Г.Г. Русанов // Геология и геофизика. - 1992. - Т. 4. - С. 23–27.
5. Zond – программы для геофизики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.zond-geo.ru>.

© П. В. Пономарев, Н. Н. Неведрова, 2015

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЫВА ДАВЛЕНИЙ НА ПОЛОГИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Борис Иванович Прилоус

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории многоволновой сейсморазведки, тел. (383) 333-39-08, e-mail: prilousbi@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты трехмерного моделирования поведения горного давления для двух слоев с пологой куполообразной структурой в нижнем слое. Показано, что при резкой смене отношений скоростей поперечных и продольных волн на границе слоев таких структур возможны два варианта отношений структуры и окружающих флюидов: от полного игнорирования структурного фактора вплоть до приобретения нижележащим слоем способности аккумулировать флюиды.

Ключевые слова: антиклинальные структуры, слоистая среда, разрыв давлений.

SIMULATION OF RUPTURE PRESSURE IN GENTLY SLOPING GEOLOGICAL STRUCTURES

Boris I. Prilous

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist of the Laboratory of Multiwave Seismic, tel. (383)333-39-08, e-mail: prilousbi@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of three-dimensional simulation of the behavior of rock pressure for two layers with gentle dome-shaped structure in the lower layer. It is shown that when there is an abrupt change of the relationship of the velocities of transverse and longitudinal waves at the boundary layers of such structures there are two possible relations between the structure and the surrounding fluids: from complete disregard for the structure factor up to the acquisition of the underlying layer of ability to accumulate fluids.

Key words: anticlinal structure, layered medium, rupture pressure.

Задачи использования сейсмических данных многоволновой сейсморазведки (пластовые скорости V_s , V_p и плотность горных пород) для расчета напряженного геодинамического состояния продуктивных пластов имеют двадцатилетнюю историю [1]. Их постановка и решение имели целью определение областей пониженного горного давления, предпочтительных для аккумуляции углеводородов. Разработанный метод прогноза применен для расчета давления в пологих антиклинальных складках для тестовых задач и для реальной модели Аригольского месторождения в Восточной Сибири.

Для двуслойной модели с пологой структурой в нижнем слое в трехмерном варианте необходимо решение уравнения равновесия с граничными условиями жесткого контакта на поверхности этой структуры и нулевой нагрузки на свободной поверхности. В нулевом приближении исходная модель сводится к модели двух слоев с горизонтальной границей между ними.

В [2] отмечено, что решение даже этой простейшей задачи нетривиально, что подтверждают следующие *простые выкладки*. Вертикальное напряжение равно весу вышележащих пород. Выражая напряжения через деформации $\sigma_{ik} = \lambda\theta\delta_{ik} + 2\mu e_{ik}$, получим для компонент тензора напряжений

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)e_{zz}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \lambda e_{zz}.$$

Напряженное состояние модели двух слоев с горизонтальной границей явно негидростатично, поскольку для отношения горизонтальных касательных напряжений к нормальному вертикальному напряжению получаем

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{zz}} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{zz}} = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} = 1 - 2\gamma^2, \quad \gamma = (V_s / V_p).$$

Обозначив через P_0 вес вышележащих пород, получим для горного давления как среднего всех нормальных напряжений

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \rho g z (1 - 4/3\gamma^2) = P_0 (1 - 4/3\gamma^2).$$

Именно это выражение приводит к необычным с обыденной точки зрения выводам:

- 1) давление оказывается значительно меньше веса вышележащих пород;
- 2) при разном отношении скорости поперечных и продольных волн в слоях при переходе между соседними слоями возникает скачок давления

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{4}{3}(\gamma_1^2 - \gamma_2^2)P_0.$$

При скачке давления, меньшем нуля, т.е. при $\gamma_1 < \gamma_2$, получим $\Delta P < 0$.

Происходит падение давления на границе и нижележащий слой становится областью низкого давления, что означает возможность внедрения в него флюидов.

Для изучения давлений в пологих (антиклинальных) структурах в слоях с разными сейсмическими характеристиками удобно выбрать модель, которая представляет собой полупространство, разделенное на два слоя (рис. 1).

Верхняя граница первого слоя (назовем его «покрывающим») – это свободная поверхность земли (плоскость $z = 0$). Нижняя граница второго слоя (назовем его «коллекторным») бесконечна. Ось z направлена вниз, перпендикулярно осям x, y .

Граница между слоями расположена на глубине 3000 м и представляет собой куполообразную поверхность $z_0(x, y) = H - h e^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}$, где $H = 3000$ м, амплитуда $h = 10$ м, размах купола $a = 200$ м. Поверхность $z_0(x, y)$ является границей структуры, принадлежащей нижнему слою, плотность слоев $\rho = 3000$ Кг/м³.

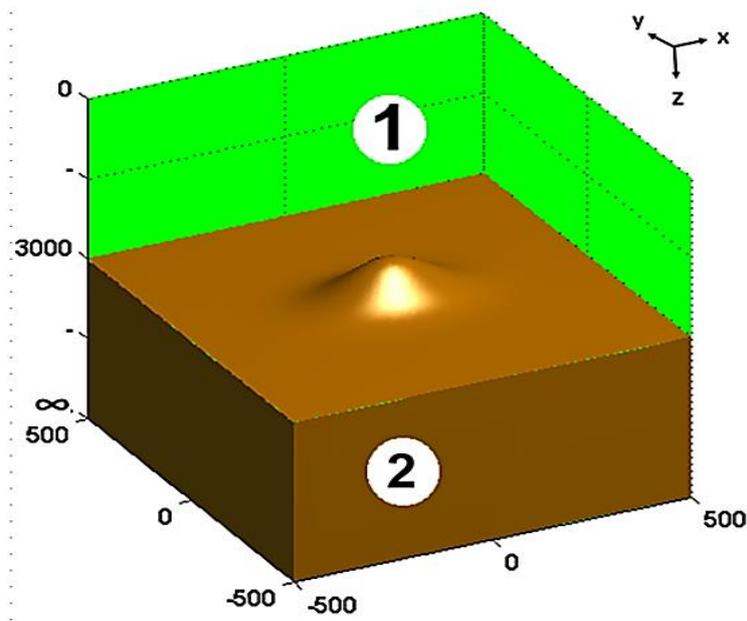


Рис. 1. Куполообразная структура в слое коллекторе ② на глубине 3000 м от свободной поверхности под действием гравитационного уплотнения покрывающего слоя ①

Главная цель прогноза напряженного состояния геологической среды, согласно [2], должна состоять в использовании самих природных сил, действующих в окрестности нефтегазоносных структур, для решения задач интенсификации процессов фильтрации наиболее экономичным и экологически разумным образом. Среди таких природных сил в пологих антиклинальных структурах важное место занимает давление.

Результаты расчетов давлений в слоях над и под поверхностью структуры представлены на рис. 2. На нем давления над поверхностью структуры отображены зеленым цветом – цифра ①, давления в самой структуре отображены коричневым цветом – цифра ②.

Левая половина рисунка относится к такому сочетанию отношений скоростей поперечных и продольных волн, когда оно в покрывающей среде больше, чем в среде-коллекторе ($\frac{\gamma_1}{\gamma_2} > 1$). При этом давление в структуре ② становится больше давления в покрывающем слое ① (рис. 2 (б) слева). Структура становится запечатанной своим более высоким давлением для возможной фильтрации в нее флюидов.

Правая половина рисунка относится к такому сочетанию отношений скоростей поперечных и продольных волн, когда оно в покрывающей среде меньше, чем в среде-коллекторе ($\frac{\gamma_1}{\gamma_2} < 1$). При этом давление в структуре ② становится меньше давления в покрывающем слое ① (рис. 2 (б) справа). Структура становится вполне предрасположенной к тому, чтобы стать аккумулятором флюидов.

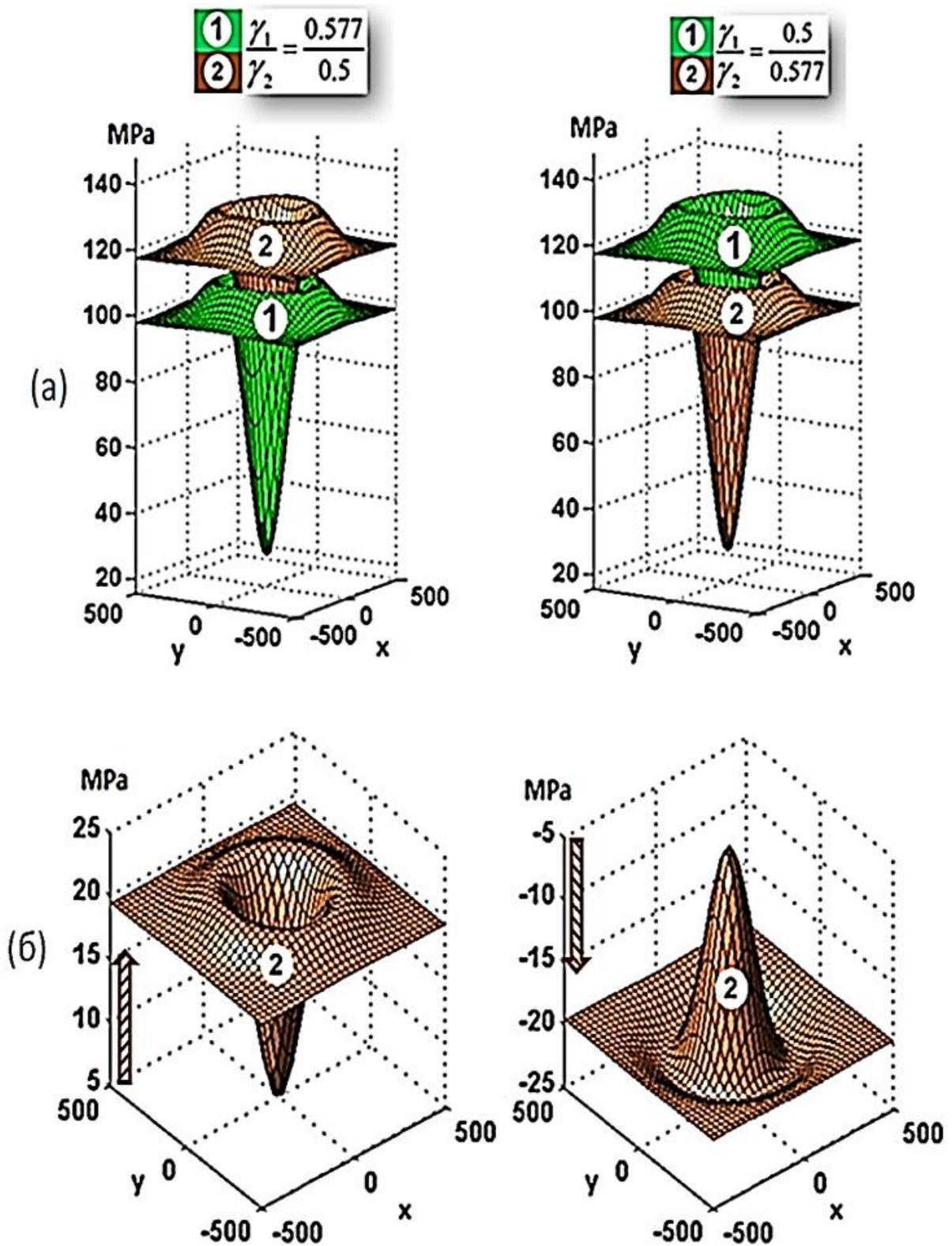


Рис. 2. (а) Сравнительное распределение давлений в покрывающем слое ① и в слое коллекторе ② в зависимости от разных значений в слоях для отношений скоростей поперечных и продольных волн $\gamma = \frac{V_s}{V_p}$; (б) Величины и направления разности значений давлений между коллектором ② и покрывающим слоем ①

Давление определяется как произведение дилатации на модуль всестороннего сжатия, изменение которого между слоями незначительно. Доминирующий вклад вносится дилатацией [3], изображенной на рис. 3. Ее расчетная формула приведена ниже.

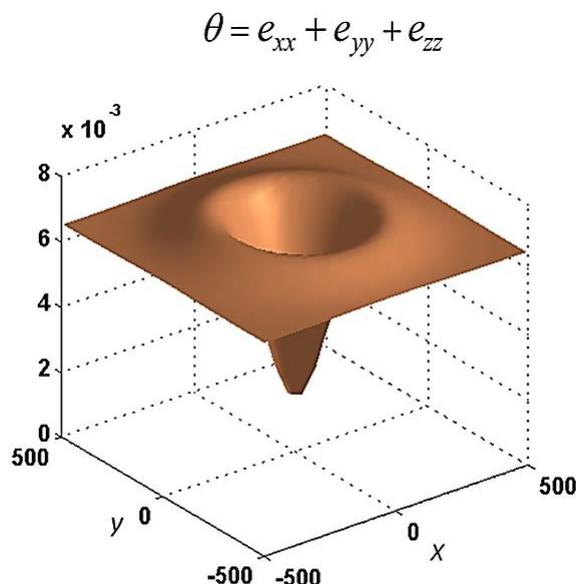


Рис. 3. Поверхность дилатации. Зоны относительного разуплотнения находятся между центром структуры и ее периферией, где наблюдаются зоны относительного уплотнения

Основными геометрическими характеристиками, влияющими на изменение дилатации, являются: а) углы наклона поверхности структуры, связанные с первыми производными z_x, z_y ; б) отрицательные кривизны поверхности структуры, связанные со вторыми производными z_{xx}, z_{yy} . Влияние углов наклона незначительно по сравнению с влиянием кривизны. Заданный вид структуры в виде куполообразной экспоненты определяет как зоны разуплотнения, так и зоны уплотнения, которые представляют собой своеобразный барьер для проникновения флюидов непосредственно к месту их аккумуляции.

$$\theta(z_0(x, y)) = -\frac{gz}{V_P^2} \left(1 + \frac{z_x^2 + z_y^2}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}} \right) - \frac{gz^2}{2V_P^2} \frac{z_{xx} + z_{yy}}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}} \left(1 - \frac{z_x + z_y}{1 + z_x^2 + z_y^2} \right)$$

$$z_0(x, y) = H - he^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}, \quad z = e^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}$$

Итак, трехмерное моделирование поведения давлений на пологой структуре, поверхность которой разграничивает две среды с контрастными сейсмическими характеристиками (либо коэффициентом Пуассона, либо отношением

скоростей поперечных и продольных волн), показало, что разрыв давлений на этой поверхности определяется не только указанной контрастностью, но и такими геометрическими характеристиками структуры, как углы наклона и средние кривизны, значения которых пропорциональны перепаду давлений. Отмечены условия, при которых в коллекторе пологих структур появляются отрицательные давления, благоприятствующие их превращению в аттракторы (аккумуляторы) флюидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сибиряков Б.П. Многоволновая сейсморазведка и прикладная геодинамика в нефтегазоносных областях / Б.П. Сибиряков, А.Д. Заикин // Геология и геофизика. - 1994. - №5 - С. 49–55.
2. Сибиряков Б.П. Динамика микронеоднородных геологических сред: учеб. пособие. - Новосибирск: НГУ, 2004.
3. Е.Б. Сибиряков, Б.П. Сибиряков Многоволновая сейсморазведка и динамика нефтегазоносных структур // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всерос. Конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.). - 2014. - С. 92–96

© Б. И. Прилоус, 2015

ПОСТРОЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДАННЫХ 3Д ВСП НА ОСНОВЕ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ*

Максим Игоревич Протасов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

В данной работе представлен метод построения трёхмерных сейсмических изображений в истинных амплитудах для многокомпонентных данных 3Д ВСП (вертикального сейсмического профилирования). Основой метода являются Гауссовы пучки в неоднородной упругой трёхмерной среде. Использование Гауссовых пучков помогает избежать артефактов изображения, которые связаны с ограниченностью апертуры, а также с нерегулярностью системы наблюдения. Использование нескольких компонент позволяет избежать артефактов, связанных с обменом сейсмических волн.

Ключевые слова: Гауссовы пучки, построение трёхмерных изображений, данные 3Д ВСП.

GAUSSIAN BEAM IMAGING OF 3D VSP DATA

Maxim I. Protasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Senior Research Scientist, tel. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.nsc.ru

The article presents true amplitude Gaussian beam 3D imaging method for multicomponent 3D VSP data. The basis of the algorithm is elastic Gaussian beams in 3D elastic media. Usage of the beams allows avoiding aperture artifacts and artifacts of acquisition irregularities. Multicomponent imaging algorithm eliminates artifacts produced by P to S conversion.

Key words: elastic Gaussian beams, 3D imaging, 3D VSP data.

Вместе с развитием методики ВСП к настоящему времени система наблюдения тоже претерпела значительный прогресс продольным ВСП до 3Д ВСП, соответствуя различным геологическим задачам. Широко известно, что данные 3Д ВСП являются источником информации, которая оказывается чрезвычайно полезной для структурных построений. На основе методов ВСП был достигнут определённый успех в оценке параметров, построении изображений и характеристике резервуаров, но получаемые наборы данных имеют различные ограничения, поэтому существующие методики построения изображений должны быть улучшены [1].

Здесь представлен метод построения трёхмерных сейсмических изображений в истинных амплитудах многокомпонентных данных 3Д ВСП, разработанный

* Исследования, описанные в этой публикации, были сделаны в сотрудничестве компаний Шлюмберже и поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (гранты 14-05-93090, 14-05-31257, 15-35-20015), а также президентским грантом МК-2909.2014.5.

ный алгоритм иллюстрируется численными примерами. Данные результаты обобщают подход для 2Д-геометрии ВСП [2]. Поэтому большинство свойств наследуются от 2Д-аналога.

Предлагаемый алгоритм является миграцией, основанной на взвешенном суммировании данных 3Д ВСП. Веса вычисляются с помощью трассирования Гауссовых пучков. Веса – это функции трех структурных углов: угол наклона, азимут и угол между начальными направлениями лучей. Следует подчеркнуть, что лучи трассируются из точек изображения к системе наблюдения, что позволяет избежать проблем в моделях с нерегулярным полем лучей. Фиксируя эти углы, можно получить так называемые селективные изображения. Полное изображение в истинных амплитудах строится по суперпозиции селективных для диапазона доступных углов наклона и азимутальных углов.

Селективные изображения очень важны для обнаружения объектов дифракции, таких как разломы и трещины. Трассирование из точек изображения и использование специальных пучков позволяет получать изображения с хорошим разрешением, которые имеют высокое соотношение сигнал/шум. Важной особенностью упругой алгоритма обработки изображений является следствием его многокомпонентности. Процедура устраняет артефакты, связанные с обменом волн и, следовательно, не требуется предварительного разделения данных на Р- и S-волны.

Предлагаемый алгоритм, как написано выше, работает с данными 3Д ВСП: $\phi(z_r; x_s, y_s; \omega)$. Также процедура является 3Д-аналогом 2Д-алгоритма, поэтому теоретические детали достаточно похожи и могут быть опущены. Тогда окончательная формула для построения изображений представляется в следующем виде:

$$f_{pp}(\bar{x}) = \int \tau_s^{gb}(x_s, y_s; \bar{x}; \alpha, \theta, \beta; \omega) \cdot \rho_r^{gb}(z_r; \bar{x}; \alpha, \theta, \beta; \omega) \cdot \phi(z_r, x_s, y_s, \omega) dx_s dy_s dz_r d\theta d\alpha d\omega. \quad (1)$$

Здесь $\rho_r^{gb}(z_r; \bar{x}; \alpha, \theta, \beta; \omega)$ – трёхкомпонентный вес, который является нормальной производной (по отношению к линии приёмников) упругого трёхкомпонентного Гауссова пучка. $\tau_s^{gb}(x_s, y_s; \bar{x}; \alpha, \theta, \beta; \omega)$ – нормальная производная скалярного (по отношению к поверхности источников) Гауссова пучка. Для того чтобы получить эти веса, необходимо трассировать пучки из точки изображения к системе наблюдения (рис. 1). Эти пучки выбираются специальным образом, чтобы получить наилучшую разрешающую способность в точке изображения.

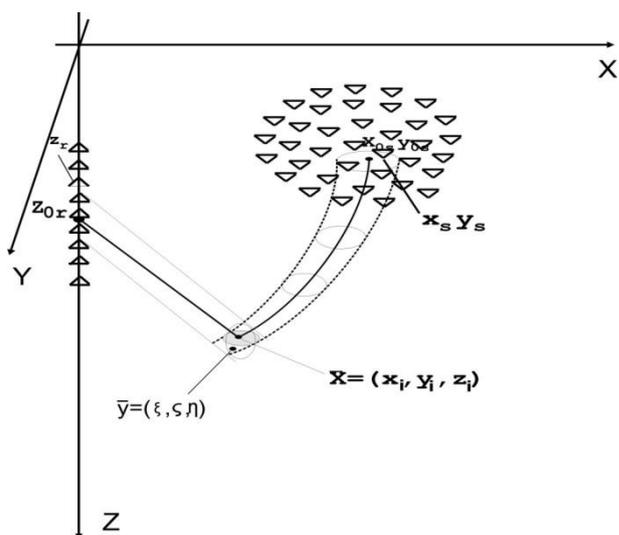


Рис. 1. Геометрия метода

Для всех точек изображения \bar{x} и для фиксированных структурных углов α , θ и β получается селективное изображение. Чтобы построить полное изображение в истинных амплитудах, необходимо просуммировать селективные изображения для всех доступных структурных углов α , θ и для фиксированного угла раствора β . Наилучшим способом оценки доступных углов является предварительное трассирование лучей в данной скоростной модели и системе наблюдения.

Численные результаты были получены для ряда моделей. Первая состоит из двух однородных слоёв, в верхнем слое расположены точечные рассеиватели (рис. 2). Многокомпонентные синтетические данные были получены посредством использования явных формул для отражённой волны и однократно рассеянной волны в однородной среде. На рис. 3 представлены сейсмограммы отражённых и рассеянных волн для одного из источников. В данном примере число источников равно 225, а число приёмников равно 80.

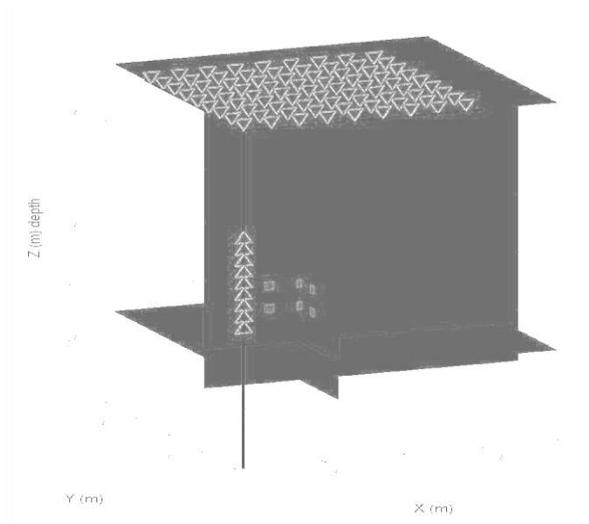


Рис. 2. Модель с рассеивателями и система наблюдения

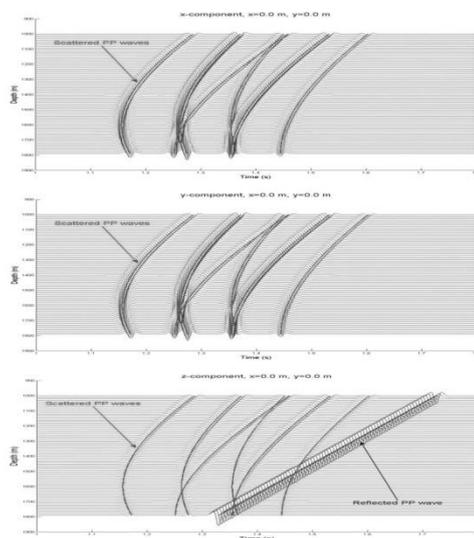


Рис. 3. X,Y,Z компоненты отражённых и рассеянных PP волн

Чтобы получить изображение, был выбран угол раствора - 30° и оценен диапазон углов наклона $[-50^\circ, 0^\circ]$ и диапазон азимутальных углов - $[25^\circ, 65^\circ]$. Разработанный алгоритм был применён в изотропной и анизотропной макро моделях. Селективные изображения для различных фиксированных углов наклона ($-50^\circ, -40^\circ, -20^\circ, -10^\circ$), а также сумма селективных изображений и истинная модель представлены на рис. 4. Видно, что положения границы, а также положение рассеивателей восстановлены правильно. Кроме того, рассеиватели получены практически на всех селективных изображениях, тогда как горизонтальная граница видна для углов наклона, близких к вертикальному. Эти изображения демонстрируют возможности алгоритма выделять объекты с различной пространственной ориентацией. Другой пример посчитан для слоистой модели (рис. 5). Для этого случая данные были посчитаны конечно-разностным

методом. На рис. 6 представлены сейсмограммы полных волновых полей для одного из источников.

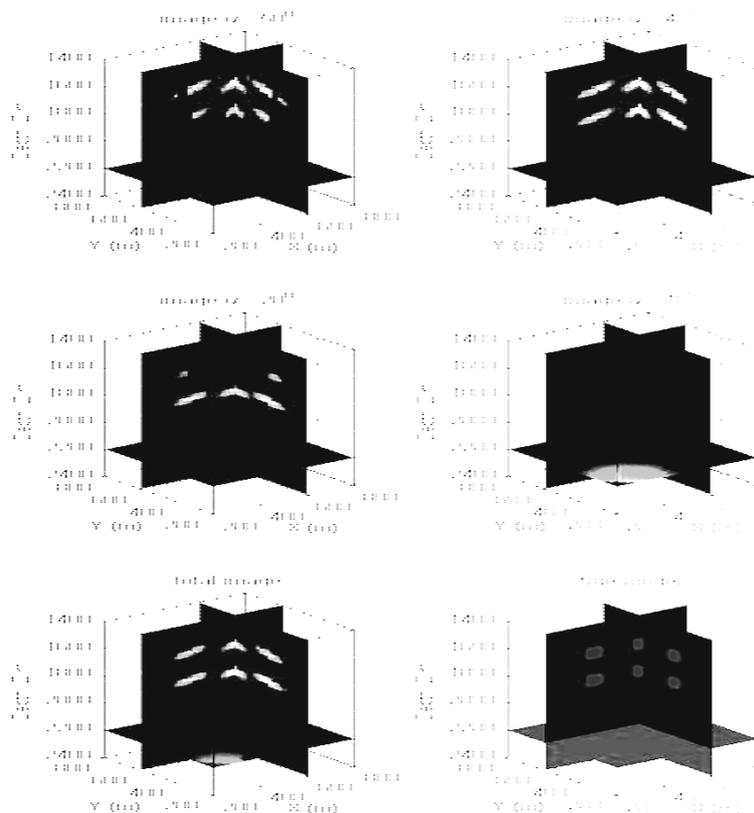


Рис.4 Селективные изображения для различных фиксированных углов наклона (-500,-400,-200,-100), сумма селективных изображений и истинная модель

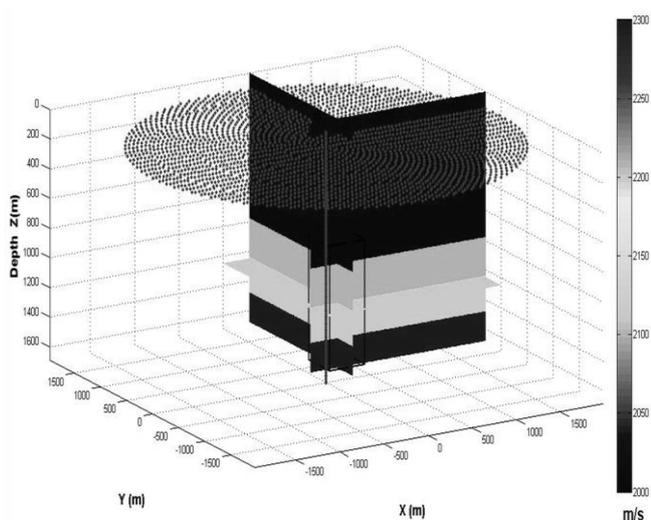


Рис. 5. Слоистая модель и система наблюдения

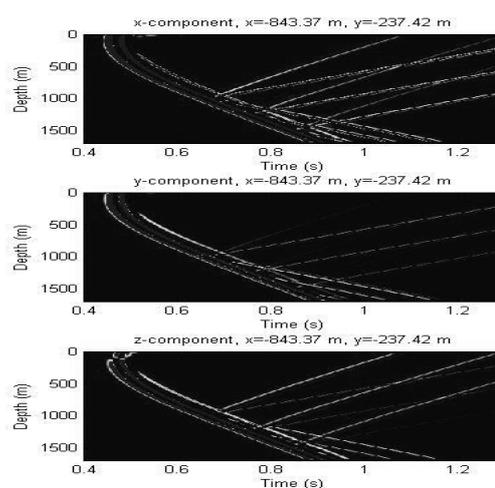


Рис. 6. X,Y,Z компоненты волнового поля в слоистой среде

Истинная структура и восстановленное изображение в целевой области представлены на рис. 7. Мы видим, что положения границ восстановлено правильно, а также нет видимых артефактов, связанных с обменом волн.

На рис. 8 представлены восстановленные амплитуды в плоскости $y = 0$ м (черным) и истинные амплитуды (серым). Видно, что восстановленные амплитуды достаточно хорошо коррелируют с истинными значениями.

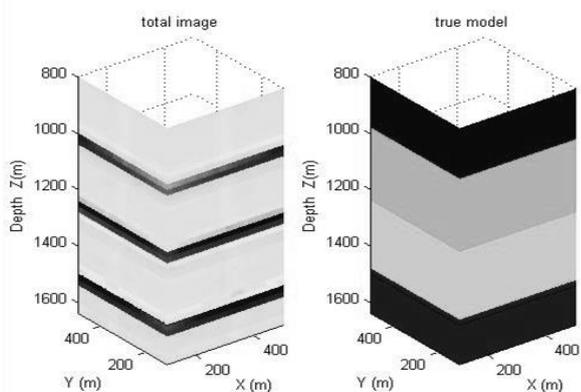


Рис. 7. Истинная структура (справа) и восстановленное изображение (слева)

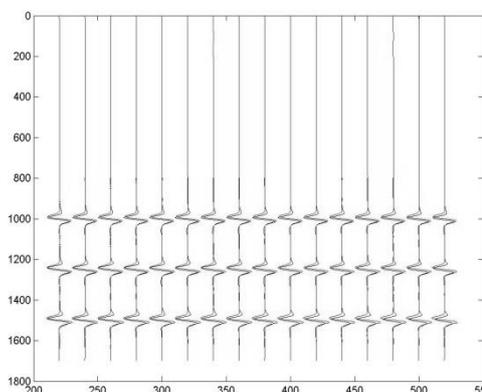


Рис. 8. Восстановленные амплитуды в плоскости $y=0$ м (черным) и истинные амплитуды (серым)

Представленный здесь 3Д-аналог ранее развитой процедуры построения изображений на основе Гауссовых пучков наследует все свойства своего 2Д-варианта. Данная методика имеет важное свойство, позволяющее получать селективные изображения, содержащие только лишь заданным образом ориентированные отражающие элементы. На этой основе может быть получена информация о распределении в среде неоднородностей субсейсмического масштаба. Стоит отметить, что данный подход не требует предварительного разделения Р- и S-волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schinelli M.C., Thedy E.A., Sansonowski R.C., Keller O.F. & Johann P.R.S. 3D-VSP from interpreter's perspective, Expanded abstracts of 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. - 2011.
2. Protasov, M.I, Tcheverda, V.A., 2012, True amplitude elastic Gaussian beam imaging of multicomponent walkaway VSP data // Geophysical Prospecting. - 2012. - V. 60. - P. 1030–1042.
3. Купрадзе В.Д., Гегелия Т.Г., Басилашвили М.О., Бурчуладзе Т.В. Трёхмерные задачи математической теории упругости. - М.: Наука, 1976. - 663 с.
4. Номофилов В.Е. Асимптотические решения системы дифференциальных уравнений второго порядка, сосредоточенные в окрестности луча [Текст] // Зап. науч. семин. ЛОМИ. - 1981. - Т. 104. - С.170–179.

© М. И. Протасов, 2015

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА ПРИ РАБОТАХ ГСЗ НА ФОНЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ И ОСРЕДНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ, РАССЧИТАННОЙ ПО МНОЖЕСТВУ РЕАЛИЗАЦИЙ

Илья Евгеньевич Романенко

Алтае-Саянский филиал Геофизической Службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (383)333-25-35, e-mail: ilya.e.romanenko@gmail.com

В работе разработаны алгоритм минимизации оценки импульсной характеристики среды по множеству сеансов на фоне нестационарного шума и последующее восстановление коррелограммы в пункте приёма с использованием этой характеристики для вибрационных данных ГСЗ.

Ключевые слова: коррелограмма, импульсная характеристика среды, виброисточники, ГСЗ, нестационарный шум.

VIBRATION SIGNAL RECOVERY AGAINST NON-STATIONARY NOISE IN DSS EXPLORATION, USING IMPULSE RESPONSE MINIMIZATION AND AVERAGING CALCULATED ON A SET OF REALIZATIONS

Ilya E. Romanenko

Altay-Sayan Filial of Geophysical survey of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, tel. (383)333-25-35, e-mail: ilya.e.romanenko@gmail.com.

In this article the algorithm is developed. This algorithm use minimization the impulse response on a set of sessions. The assessment of the characteristic allows to receiving a signal in reception point. It works for DSS vibration data.

Key words: DSS, correlogram, impulse response, vibrator source, non-stationary noise.

Для работ на профилях ГСЗ в качестве источника нередко используют мощные вибрационные установки, а также группу из 2-х виброисточников.

Для борьбы с шумами во время расстановки профиля делается всё возможное для борьбы с нестационарными шумами [1]. Но поскольку пункты приёма сигнала устанавливаются вдоль дорог общего пользования и порой в условиях сильных ветровых помех, для уверенного приёма на больших удалениях применяются методы борьбы с нестационарными шумами. Самый простой и часто используемый метод – это суммирование по множеству реализаций сигнала. Такой способ борьбы используется и при работе с виброграммами. Одним из методов является когерентный приём вибрационных сигналов [2].

Мы рассмотрим метод построения коррелограмм с помощью оценки импульсной характеристики сигнала по серии сигналов на входе и на выходе системы.

Для построения модели воспользуемся предположениями.

1. Геологическая среда представляет собой линейную систему.

2. Сеансы виброисточника обладают высокой повторяемостью во времени.
3. Геологическая среда не меняет своих свойств во времени.

Второе предположения в случае с группой вибраторов, строго говоря, не выполняется вследствие того, что во время работы каждая установка вносит корректировки в работу другой. И в конечном итоге мы получаем сигнал с искажённой фазой по сравнению с теоретическим свип-сигналом. Исходя из этого, рассмотрим модель линейной системы, описывающую процесс приёма сигнала на удалении от источника (рис. 1).

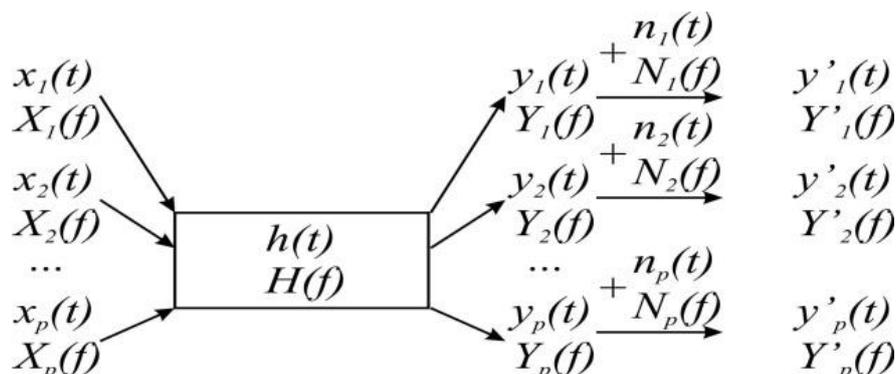


Рис. 1. Схема модели линейной системы

Для любого входа $x(t)$ и характеристики линейной системы $h(t)$ выход в случае с дискретными значениями $t \in [0, T]$ задаётся уравнением свёртки:

$$y(t_n) = \sum_{\tau=0}^T h(\tau)x(t_n - \tau)$$

для $N + 1$ -точечной последовательности с дискретизацией Δt , $T = N\Delta t$, $t = n\Delta t$, $n = [0, 1, \dots, N]$. Применим преобразование Фурье для обеих частей соотношения, получим:

$$Y(f_n) = H(f_n)X(f_n), \quad f_n = n\Delta t, \quad n = [0, 1, \dots, N].$$

Соответственно для одного входа и одного выхода можно найти частотную характеристику, как $H(f_n) = Y(f_n)/X(f_n)$.

Для системы на рис.1 на выходе наблюдаемый сигнал представляет собой сумму отклика системы и шума. Наша задача выделить этот отклик. Такая система описывается простой системой линейных уравнений (здесь и далее мы не будем использовать индексы, подразумевая, что вычисления ведутся в дискретном случае):

$$H_i(f) = (Y_i(f) + N_i(f))/X_i(f), \quad \forall i, j \in [1, \dots, p] \quad (1)$$

$$H'_i(f) = Y'_i(f)/X_i(f),$$

Если решать её методом наименьших квадратов относительно H (приняв $H' = H_i = H_j, \forall i, j \in [1, \dots, p]$), то задача сводится к нахождению среднего значения H_i . Мы будем находить оценку характеристики немного иным способом.

Умножив числитель и знаменатель правой части уравнения (1) на $X^*(f)$, получим выражение:

$$H_i(f) = S_{xy}^i(f)/S_{xx}^i(f).$$

Существует несколько методов оценки спектральной плотности мощности $S_{xx}(f)$ и $S_{xy}(f)$ [3]. Мы будем пользоваться оценкой по полезной части автокорреляции на входе ($r_{xx}(t)$) и взаимной корреляции на выходе ($r_{xy}(t)$). Полезной частью взаимной корреляции назовём временной отрезок $[\tau, \tau']$, в который попадают все целевые волны в пункте приёма сигнала.

Соответственно:

$$S_{xy}^i(f) = R_{xy}^i(f), \quad (2)$$

где $R_{xy}^i(f) = F(r_{xy}^i(t)), t \in [\tau, \tau']$;

$$S_{xx}^i(f) = R_{xx}^i(f), \quad (3)$$

где $R_{xx}^i(f) = F(r_{xx}^i(t)), t \in [0, \tau' - \tau]$, F преобразование Фурье.

В заключительной части расчёта коррелограмм мы просто введём поправку для временной последовательности выхода, равной τ . Изначально значение τ можно брать из априорной информации времён вступлений региона исследования либо, как в случае работ ГСЗ, с соседних годографов, полученных от взрывных источников. Вычисление спектров по r дополнительно избавляет нас от шумов, которые не попадают в отрезок $[\tau, \tau']$. В нашем случае, когда виброграмма длится около часа, а длина отрезка $[\tau, \tau']$ на порядок меньше, такой расчёт более чем оправдан.

Функция $H_i(f)$ несёт в себе исчерпывающую информацию о прохождении сигнала через среду, а именно: об усилении или затухании амплитуды и о сдвиге фазы (для каждой частоты).

Коэффициент усиления: $|H(f)| = \sqrt{(Re[H(f)])^2 + (Im[H(f)])^2}$,

Фазовый угол в радианах: $\tan \varphi(f) = \frac{Im[H(f)]}{Re[H(f)]}$.

Ещё одно важное дополнение: для того чтобы каждый i -ый сигнал давал равный вклад в распределение $H_i(f)$ (для более равномерного распределения $H_i(f)$ по амплитудам), необходимо перед расчётом r_{xx}^i выравнять и нормировать сигнал от источника [4].

Для нахождения оценки характеристики решаем систему уравнений (1). Находим для каждого входа и выхода $H_i(f)$. Для каждой частоты f_n , $H_i(f_n)$

представляют собой набор точек на комплексной плоскости. Для того чтобы найти оценку распределения $H'(f)$, необходимо найти усреднённые значения $H_i(f)$. Для более точного определения оценки предлагается считать среднеквадратичное отклонение распределения p точек

$$\sigma = \frac{1}{p} \sqrt{(H_i(f) - \overline{H(f)})^2}, \quad (4)$$

и отбрасывать значения, не попадающие в радиус среднеквадратичных значений,

$$\text{if } |H_j(f) - \overline{H(f)}| > \sigma, \quad i = 1, 2, \dots, p \text{ \& } i \neq j. \quad (5)$$

и только потом проводить усреднение распределения. Расчёт ведётся отдельно для мнимой и реальной частей.

Поскольку свип-сигнал вибрационной установки представляет собой частотно модулированную синусоиду с ограниченным набором частот, мы можем определить $H'(f)$ только на отрезке от F_n до F_k . На этом отрезке и происходит усреднение $H'(f)$ для каждой частоты.

Теперь с известной оценкой $H(f)$ мы имеем все необходимые данные о характере прохождения сигнала, находим отклик системы в нашей точке наблюдения, используя теоретическую синусоиду $x = \sin(\omega t)$ по формуле:

$$r_{xy} = F^{-1}(S_{xy}(f)) = F^{-1}(S_{xx}(f) \cdot H'(f)),$$

где, $S_{xx}(f) = F(r_{xx})$, $r_{xx}(t) = \sum_{\tau=0}^T \sin(\omega t) \sin(\omega t - \omega \tau)$.

Результат обработки представлен на рис. 1. Хорошо выделяется волна в первых вступлениях (прослеживаются первые вступления головной волны на сложном участке годографа). Времена вступлений отлично коррелируют с данными от взрывных источников. Методика статистической фильтрации характеристики по частотам работает со всем набором наблюденных сигналов без предварительной отбраковки, что дает возможность применять её для оперативной обработки большого количества данных.

На самом деле с известной характеристикой мы можем отправлять на вход любой сигнал, определённый на отрезке частот от F_n до F_k . Это даёт возможность оценивать то, как проходят разные частоты через среду, и разделять волны по частотам.

Для методов статистических оценок важную роль играет количество выборки, поэтому чем больше повторных сеансов на точке, тем точнее оценка H . Увеличение количества повторных сеансов влечёт за собой значительный рост затрат и времени работ. Логично было бы уменьшить длину сеансов. Например, уменьшив свип-сигнал в 4 раза, мы получаем в 4 раза больше сеансов без суммарной потери излучённой энергии. Кроме того, во время «длинного» сеанса возникновение кратковременных шумов влечет за собой потерю частот на выходе. В случае, когда за тоже время мы имеем 4 свипа, каждый проходит все

частоты по 4 раза. Это увеличивает вероятность выделения частоты на выходе. Но для уменьшения длины сеанса требуется серьёзное обоснование, поскольку используются резонансные вибраторы и на «раскачку» слоев на какой-либо частоте необходимо время, которого может не хватить при использовании коротких свипов. Кроме того, уменьшение длины синусоиды приводит к появлению дополнительных корреляционных шумов. На практике, прежде чем применять короткие свипы, необходимо проводить дополнительные опытные работы.

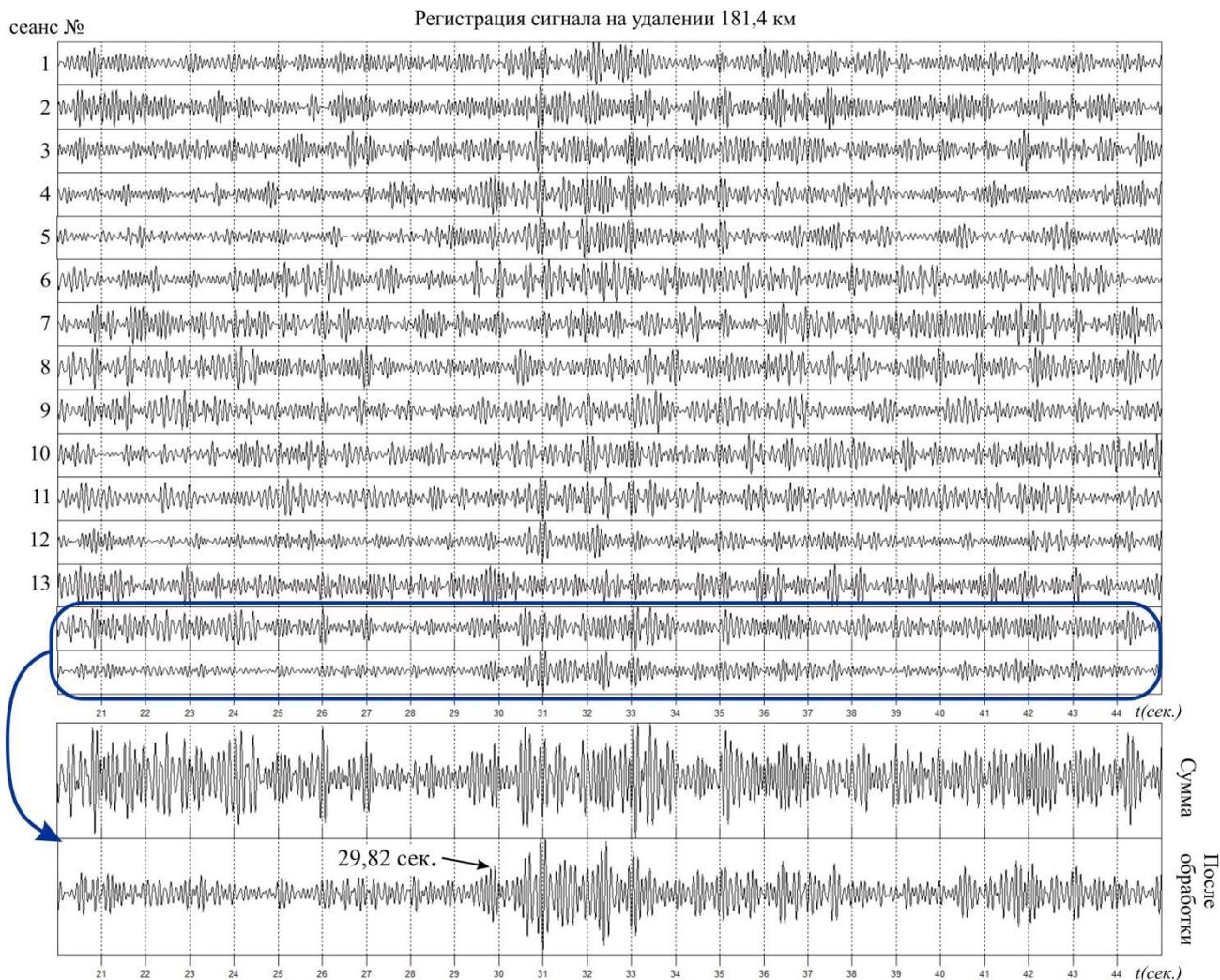


Рис. 1. Пример получения коррелограммы по минимизированной оценке характеристики среды и сравнение результатов с обычной суммой сеансов

Применение данного метода возможно для ряда сигналов, по-разному испорченных нестационарным шумом, в том случае, когда выделить первые вступления другими способами не удастся.

Предложенный подход схож с методом когерентного приема вибрационного сигнала [2], за тем лишь исключением, что вместо взвешивания по частотам происходит исключение из осреднения значений $H_i(f)$ по критерию (5).

Рассмотренный критерий восстановления коррелограмм не требует затраты времени на анализ множества сеансов вручную, а использует все наблюдаемые данные, что дает возможность применять её для оперативной обработки большого количества данных.

Кроме того, известные параметры H дают возможность пропускать через систему любой теоретический сигнал для разделения волн с помощью подавления или выделения необходимых частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьёв В. М., Романенко И. Е., Елагин С. А., Кашун В. Н. Повышение качества вибрационных записей при изучении глубинного строения сейсмоактивных территорий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012.

2. Еманов А.Ф., Жемчугова И.В. Когерентный прием вибрационных сигналов на фоне нестационарных шумов. // 2-ой международный симпозиум Активный Геофизический Мониторинг Литосферы Земли. - 2005. - С. 42–51.

3. Отнес Р.К. Элексон Л. Теория и применение цифровой обработки сигнала. - «Мир», 1982. - С. 293–294.

4. Романенко И. Е., Елагин С. А. Практические способы обработки и использования сигнала ближней зоны системы из двух виброисточников при работах на профилях ГСЗ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 3. – С. 43–48.

5. Еманов А.Ф., Капцов О.В. Цифровая обработка вибрационных сигналов при глубинных сейсмических исследованиях // Геология и геофизика. - 1992. - № 4. - С. 70–72.

© И. Е. Романенко, 2015

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА НЕФТЕГАЗОНОСНОМ УЧАСТКЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Марина Геннадьевна Рохина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-54, e-mail: RohinaMG@ipgg.sbras.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, тел. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В работе рассмотрен нефтегазоносный участок в Иркутской области Восточной Сибири, на котором проведена детальная площадная съемка методом зондирования становлением электромагнитного поля. По результатам интерпретации полевых данных с применением геоинформационных технологий построены схемы распределения геоэлектрических параметров по площади, геоэлектрические разрезы и трехмерная модель. По результатам геолого-геофизического анализа предварительно выделены зоны, перспективные на углеводороды.

Ключевые слова: нефтегазоносный участок, метод зондирования становлением электромагнитного поля, детальная съемка, геоинформационные технологии, результаты интерпретации, 2-3 D-визуализация.

THE INTERPRETATION'S RESULTS OF TEM-SOUNDINGS AT IRKUTSK REGION PETROLEUM-BEARING LAND WITH THE GIS-TECHNOLOGIES

Marina G. Rohina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer of the electromagnetic fields laboratory, tel. (383)330-49-54, e-mail: RohinaMG@ipgg.sbras.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Leading Researcher, docent, tel. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

The petroleum-bearing site at Irkutsk region of Eastern Siberia where areal detailed TEM-soundings are executed is considered in this work. The map-schemes of the geoelectric parameters' distribution, the geoelectric sections and the three-dimensional model based on the results of the field-data's interpretation with application of the geoinformation technologies are constructed. According to results of the geological-geophysycal analysis perspective hydrocarbons' zones were pre-allocated.

Key words: petroleum-bearing site, method of TEM soundings, detailed survey, GIS-technologies, results of the interpretation, two-dimensional and three-dimensional visualization.

Для поиска залежей углеводородов в районах Сибири применяется метод зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС), позволяющий получить электрофизические параметры разреза в широком диапазоне глубин [1]. В ходе интерпретации полевых данных ЗС необходимы не только полевые измерения, но и точная географическая привязка участка исследования, пунктов измерений, а также имеющихся дополнительных данных альтернативных геофизических методов, геологических, скважинных материалов [1, 2].

В этой работе рассмотрен нефтегазоносный участок в Иркутской области Восточной Сибири, на котором проведена детальная площадная съемка методом ЗС с генераторными установками размером 600х600 м и приемными модульными рамками 18х18 м. Всего было выполнено 2216 измерений, при этом два приемных пункта находились внутри каждого генераторного контура, а остальные (от 4 до 11 пунктов) с различными разносами – за контуром (рис. 1). Применяя имеющуюся априорную информацию, была составлена карта-схема расположения пунктов и скважин с использованием программного комплекса ESRI ArcGIS [2], по которой легко выбрать пункты, находящиеся наиболее близко к скважинам (рис. 1). Именно по данным этих пунктов построены стартовые геоэлектрические модели. Интерпретация всего объема полевых данных ЗС выполнена с использованием программного пакета EMS [3]. В ходе интерпретации были выявлены 4 основных типа кривых ЗС, на рис. 1 цветовой палитрой отмечены области размещения пунктов с разными типами кривых. Полученные в результате инверсии базовые геоэлектрические модели содержат 9 слоев, отличающихся по удельному сопротивлению (табл. 1). Следует отметить, что все слои геоэлектрических моделей достаточно хорошо выдержаны по мощности.

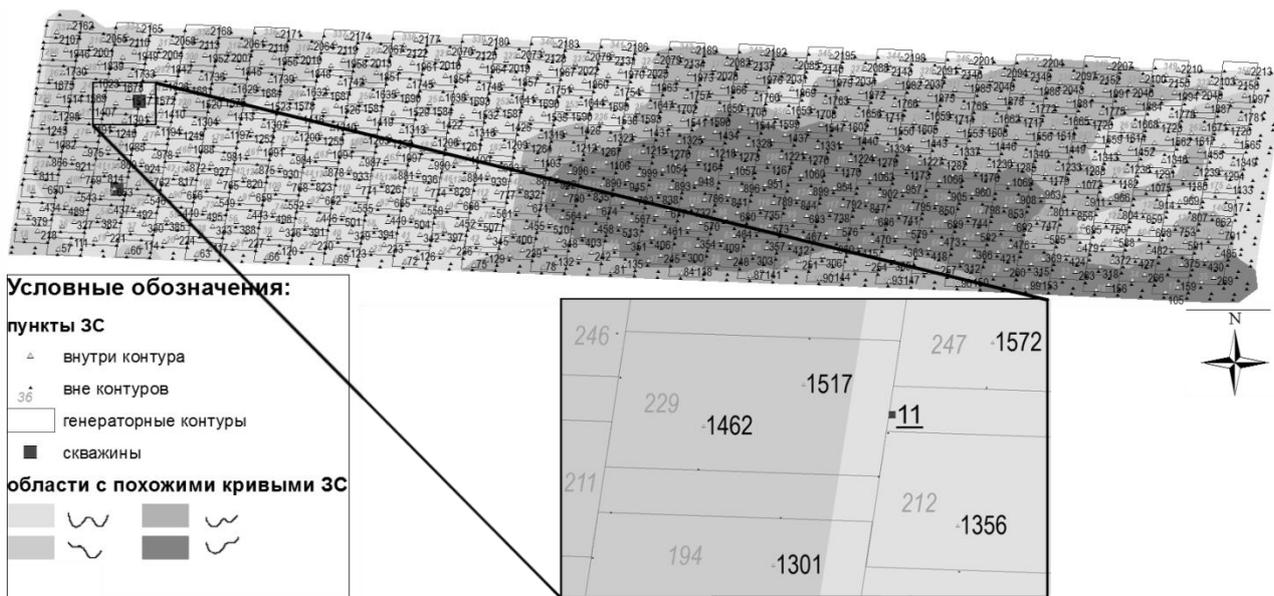


Рис. 1. Расположение пунктов ЗС на участке исследования в Иркутской области Восточной Сибири (на врезке показана схема наблюдений)

Базовые геоэлектрические модели

№ ЗС	120		138		585		1203	
№ сл.	УЭС, Ом*м	Н, м						
1	130	45	82	63,5	100	44	200	43
2	30	58	24,5	62	24	52	48,5	61
3	200	145	115	200	137	220	145	200
4	430	370	153	410	280	400	150	365
5	250	275	450	275	1000	260	140	295
6	48	260	59	240	68	250	38	260
7	75	260	79	250	85	245	95	250
8	43	330	43	270	53	300	41	320
9	2000		2000		2000		2000	

По результатам интерпретации данных высокоплотной съемки получены детальные геоэлектрические разрезы и схемы. Глубины до фундамента изменяются от 1710 до 1805 м. На карту глубин до фундамента с учетом альтитуд с использованием геоинформационных технологий нанесены элементы топографии и тектоники (речная сеть, разломные нарушения). Наблюдается сложный рельеф опорного горизонта с ярко выраженными поднятиями и прогибами. В западной части прогибы хорошо совпадают с руслами рек, а в восточной части – с одним из разломов, проходящим с юго-запада на северо-восток (рис. 2).

По скважинным данным, к продуктивному отнесен восьмой геоэлектрический горизонт. Для него построена схема распределения удельного электрического сопротивления (рис. 3). На этой схеме хорошо выделяются аномалии пониженных значений удельного сопротивления, в том числе приуроченные к продуктивным скважинам.

Учитывая результаты предшествующих работ методом ЗС, а также структурные особенности участка, можно выделить возможные перспективные на углеводороды зоны. Через них построены геоэлектрические разрезы по профилям. В качестве примера показан разрез по профилю между скважинами (рис. 4), расположение профиля указано на рис. 2. На всех разрезах хорошо прослеживаются латеральные изменения удельного электрического сопротивления слоев, включая продуктивный горизонт.

Дальнейший анализ полученных результатов, сопоставление с геологическими и сейсмическими данными позволит дополнительно обосновать зоны, перспективные на углеводороды.

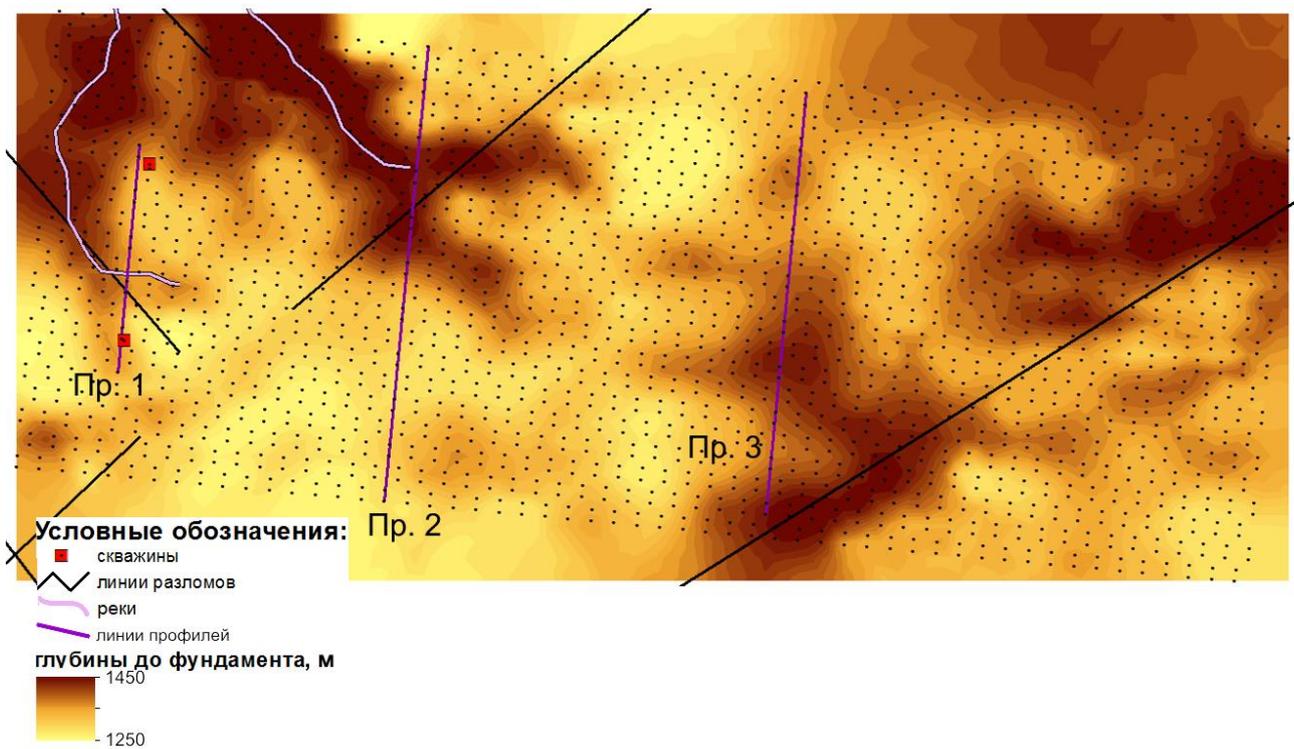


Рис. 2. Распределение глубин до фундамента с учетом альтитуд по итогам интерпретации ЗС

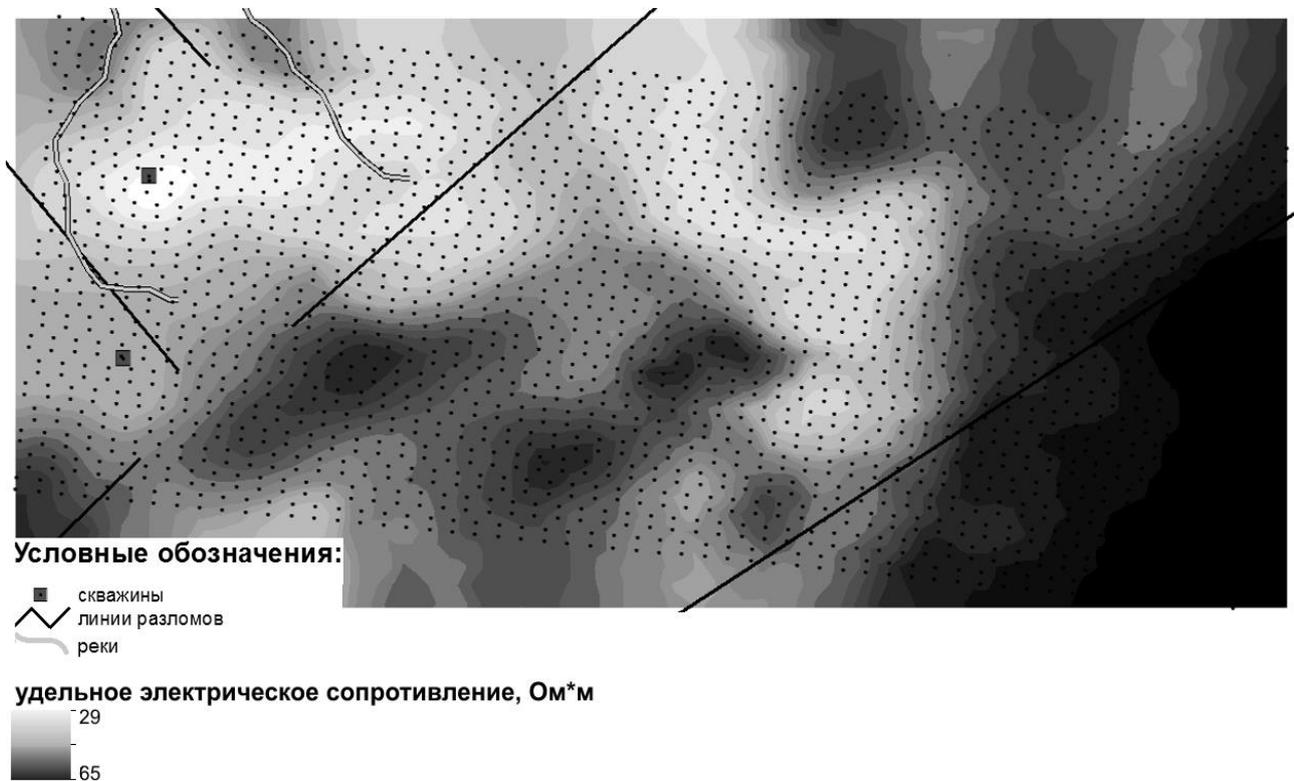


Рис. 3. Распределение удельного электрического сопротивления продуктивного горизонта по итогам интерпретации ЗС

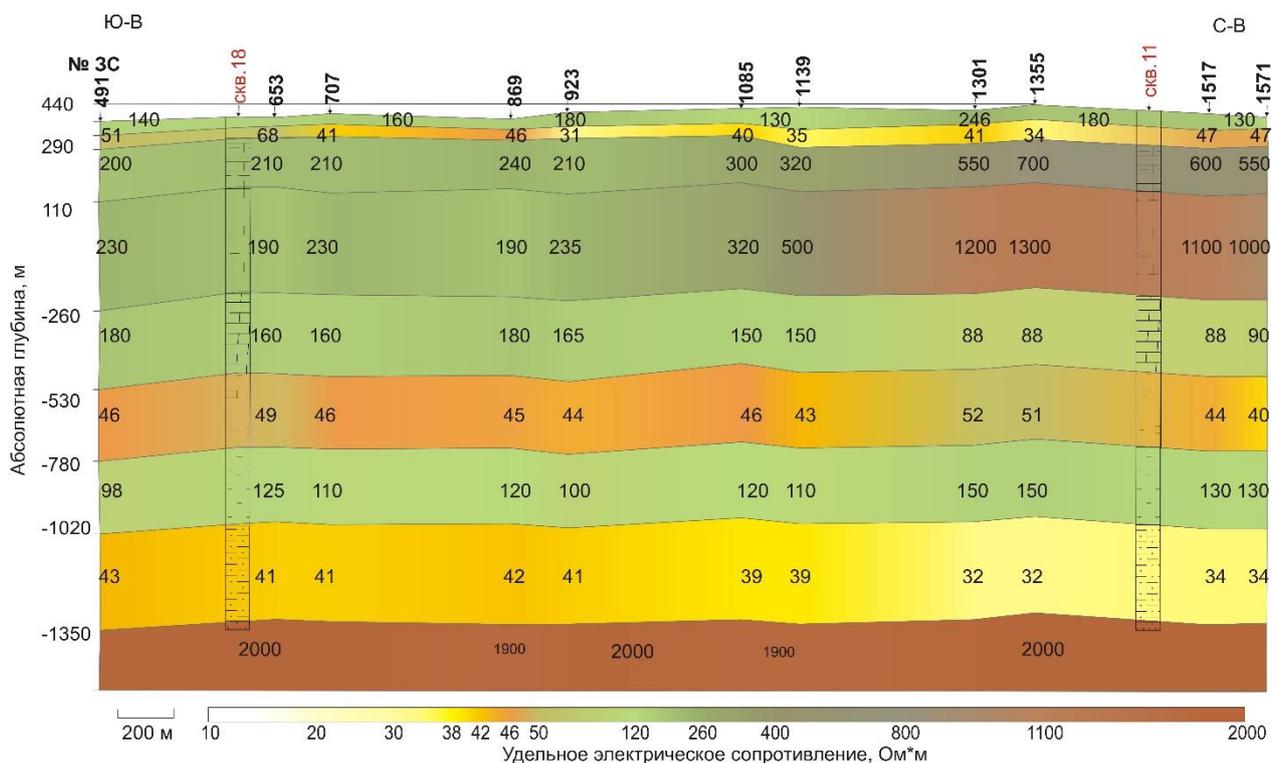


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю 1, проходящему между скважинами, по итогам интерпретации ЗС

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неведрова Н. Н., Эпов М. И., Санчаа А. М., Бабушкин С. М. Геоэлектрические исследования перспективных участков нефтегазоносности юга Сибирской платформы // Записки Горного Института. - 2008. - С. 260–263.
2. ДеМерс М. Н. Географические Информационные Системы. Основы. - М.: Дата+, 1999. - 490 с.
3. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS / О. Г. Хабинов, И. А. Чалов, А. А. Власов, Е. Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 108–113.

© М. Г. Рохина, Н. Н. Неведрова, 2015

**ПРЕПРОЦЕССИНГ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАНАЛА
ВЕРТОЛЕТНОЙ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
СЕРИИ «ИМПУЛЬС-АЭРО»**

Георгий Михайлович Тригубович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Антон Владимирович Чернышев

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Андрей Сергеевич Сверкунов

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

Сергей Владимирович Барсуков

ООО «ГП Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 30/1, оф. 905, инженер, тел. (383)344-92-44, e-mail: turmalin@ngs.ru

В статье приводятся основные этапы предварительной обработки данных электромагнитного канала вертолетной разведочной платформы серии «Импульс-Аэро».

Ключевые слова: «Импульс-Аэро», аэроэлектроразведка, препроцессинг, компилятивное моделирование, короткие импульсы.

**PREPROCESSING OF DATA OF ELECTROMAGNETIC CHANNEL
IN «IMPULS-AERO» HELICOPTER AIRBORNE SYSTEM**

Georgiy M. Trigubovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Professor, Supervisor of Geophysical Research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Anton V. Chernyshev

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Andrey S. Sverkunov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

Sergey V. Barsukov

Sibgeotech, LLC, 630087, Russia, Novosibirsk, 30/1 Karl Marx St., room 905, Engineer, tel. (383)344-92-44, e-mail: turmalin@ngs.ru

Main stages of high resolution electromagnetic channel data processing of geophysical prospecting helicopter platform "Impuls-Aero" are given.

Key words: "Impulse-Aero", airborne TEM, data processing, compilation modeling, short impulses.

Вертолетная разведочная платформа серии «Импульс-Аэро» с электромагнитным каналом высокой грунтопроникающей способности предназначена для проведения поисково-оценочных и инженерных исследований. Система успешно используется для гидрогеологических, экологических, инженерных изысканий, а также решения рудных и нефтяных задач. Отличительными особенностями системы являются высокая производительность, высокая разрешающая способность, а также короткие сроки выполнения исследований.

Регистрация сигналов осуществляется с помощью современного программного обеспечения QAeroRecorder, установленного на бортовом промышленном компьютере. Препроцессинг данных выполняется в программе QAeroProcessor. Общая схема обработки данных изображена на рис. 1.

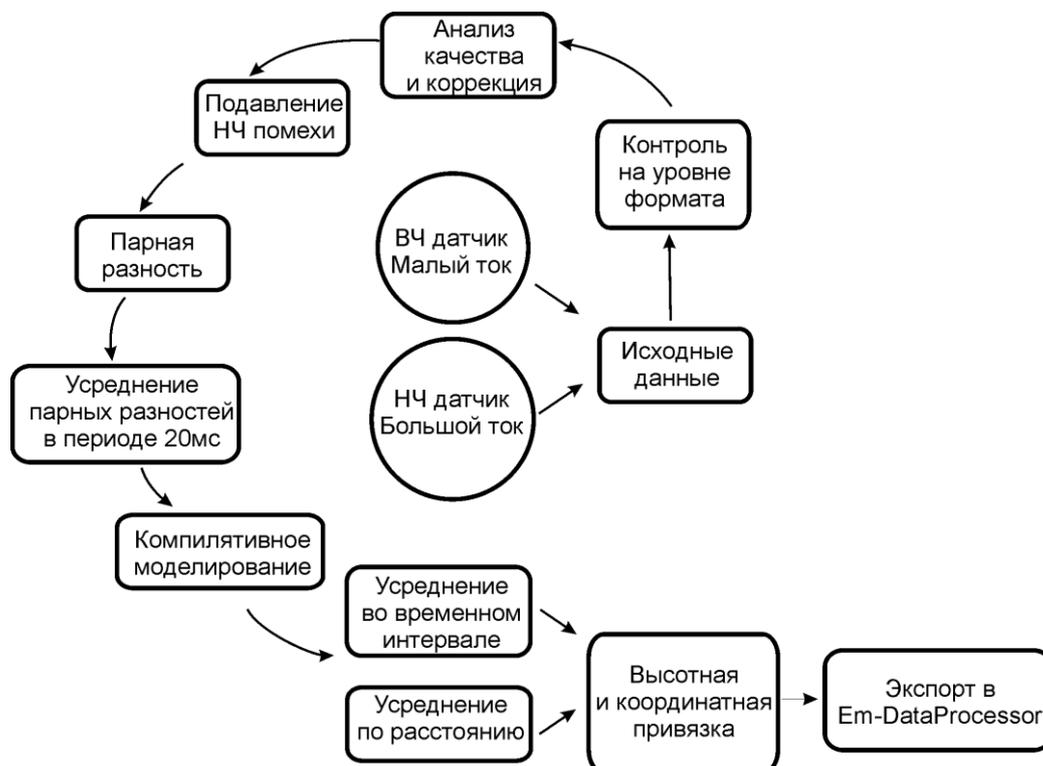


Рис. 1. Структурная схема препроцессинга данных в программе QAeroProcessor

На первом этапе препроцессинга данных осуществляется контроль на уровне формата данных, которые записаны бортовым программным обеспечением QAeroRecorder вертолетной разведочной платформы «Импульс-Аэро». Программа препроцессинга QAeroProcessor контролирует входной поток дан-

ных и в случае обнаружения ошибок выполняет попытку восстановления данных. На втором этапе контролируется корректность следования положительных и отрицательных полярностей токовых импульсов, а также производится анализ качества материала.

При выполнении аэроэлектроразведочных работ неизбежно колебание контура приемной петли в магнитном поле Земли и, соответственно, изменение магнитного потока, проходящего через приемную петлю. В результате чего сигналы искажены низкочастотной помехой. Алгоритм подавления НЧ помехи, в программе QAeroProcessor позволяет понизить уровень НЧ помехи примерно на 2 порядка. На рис. 2 представлен исходный сигнал во временном интервале 25 с, а на рис. 3 – результат фильтрации НЧ помехи.

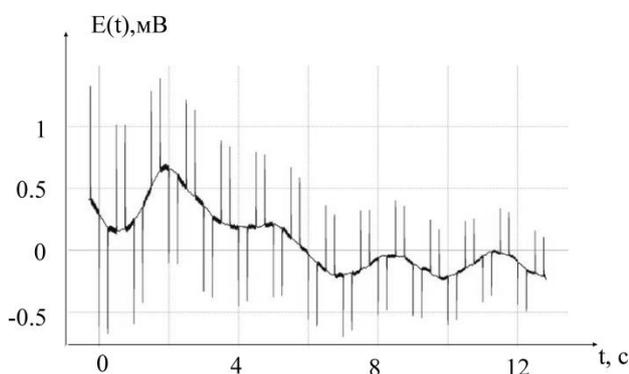


Рис. 2. Исходный сигнал, осложненный НЧ помехой

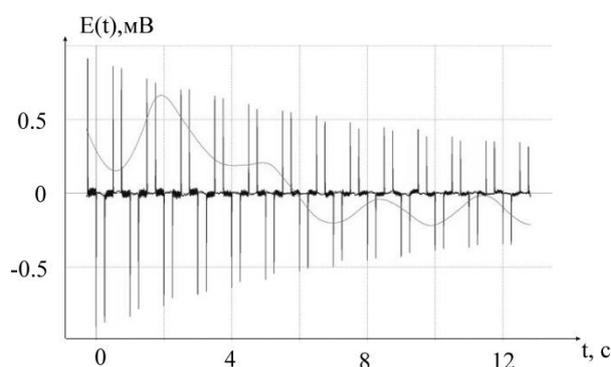


Рис. 3. Результат фильтрации НЧ помехи

Для повышения достоверности параметризации верхней части разреза и обеспечения высокой глубинности аппаратный комплекс "Импульс-Аэро" использует двухступенчатое переключение тока. Зондирования на малом токе (до 20А) применяются для высокоточной детализации верхней части разреза, а на большом токе (до 250А) – для регистрации сигналов от глубокозалегающих объектов. Для коррекции смещения уровней сигнала в аналого-цифровых преобразователях и каскадных усилителях используются биполярные импульсы тока. Форма генерирующих импульсов представлена на рис. 4.

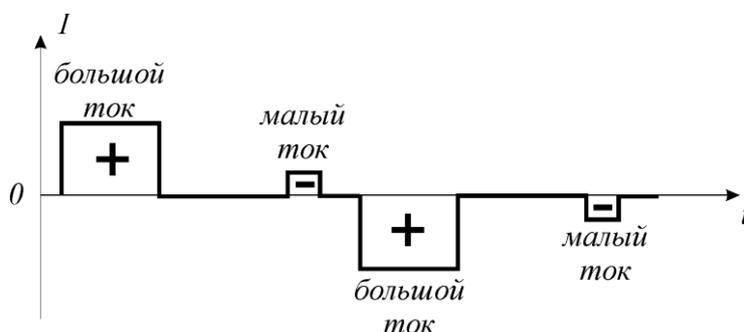


Рис. 4. Форма генерирующих импульсов

На малом токе регистрация сигнала осуществляется с помощью ВЧ датчика, на большом – с помощью НЧ датчика. Кроме того, для расширения динамического диапазона в измерительной системе комплекса применяется 3-х канальный усилитель, который обеспечивает динамику сигнала в 140 дБ.

С учетом сложной схемы генерации импульсов, а также применения каскадного усилителя для расширения динамического диапазона сигнала, одно измерение представляет собой три сигнала с разными коэффициентами усиления с ВЧ датчика на малом токе и три сигнала с разными коэффициентами усиления с НЧ датчика на большом токе. Программа QAeroProcessor позволяет получить одну результирующую кривую с помощью модуля "Компилятивное моделирование". На рис. 5 представлен пример исходных единичных реализаций, а на рис. 6 – результат компиляции этих сигналов.

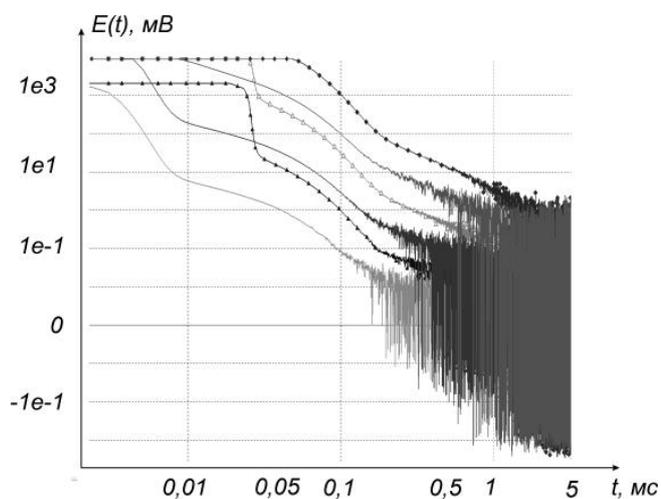


Рис. 5. Исходные сигналы

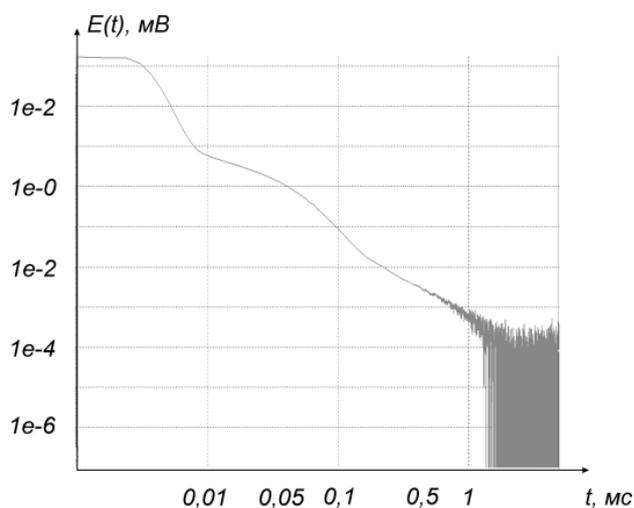


Рис. 6. Результат компиляции сигналов

Зачастую аэрогеофизическая съемка выполняется вблизи техногенных объектов, поэтому измерения могут быть осложнены промышленными помехами с частотой 50Гц. Одним из способов их подавления является использование периода «ток-измерение» кратного 20мс. Однако 20-ти мс, которые соответствуют, например, диаграмме "10мс ток – 10мс измерение" может быть недостаточно для высокоточной координатной привязки, а также для качественной статистической фильтрации данных при полетах платформы на высокой скорости. Поэтому при малоглубинных исследованиях необходимо применение более коротких диаграмм. Для этого коммутатор тока системы позволяет генерировать короткие импульсы тока: 1мс, 2мс или 2.5мс. На рис. 7 схематично показаны периоды тока и измерений (осложненных промышленной помехой) для диаграммы "1мс ток – 1мс измерение". Помеха 50Гц при этом подавляется за счет осреднения 5 парных разностей в интервале времени 20 мс. Знаком "+" на рис. 7 показаны положительные импульсы тока, знаком "-" – отрицательные.

Цветом показаны моменты токовых импульсов, без цвета – моменты измерений. Таким образом, применение схемы усреднения сигналов от коротких импульсов в периоде 20 мс позволяет эффективно подавить промышленную помеху. Данная процедура выполняется в модуле "Усреднение парных разностей в периоде 20мс" программы QAeroProcessor.

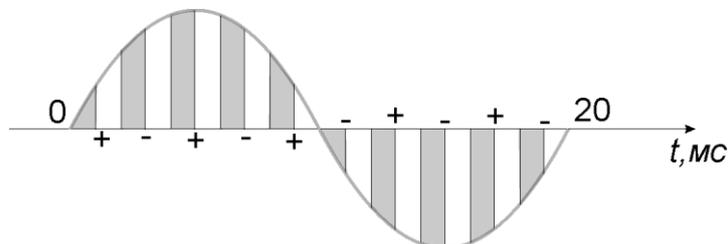


Рис. 7. Схема усреднения 5 парных разностей в периоде 20 мс для диаграммы "1мс ток – 1мс измерение"

Для координатной привязки данных программа "QAeroProcessor" использует координаты, полученные с высокоточного GPS-приемника, установленного на платформе "Импульс-Аэро". Точность навигационной системы составляет ± 0.5 м. Для высотной привязки используются данные с радио и лазерного высоотомеров. Точность высотной привязки составляет ± 1 м.

После компиляции сигналов, подавления низкочастотной помехи, координатной привязки программа QAeroProcessor экспортирует данные в формате, который может быть загружен в программном комплексе EM-DataProcessor для дальнейшей обработки и интерпретации.

Высокоточная аэрогеофизика с оборудованием серии «Импульс-аэро» позволяет проводить поиск не только высокопроводящих рудных объектов, однозначно идентифицируемых по регистрируемым сигналам, но и слабо проявленных в геофизических полях, а также перекрытых проводящими породами. Повышенная амплитуда высокочастотной области спектра зондирующего импульса позволяет более детально параметризовать верхнюю часть разреза и повысить достоверность обнаружения и определения свойств поисковых объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тригубович Г.М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования // Разведка и охрана недр. - 2007. - № 8. - С. 80–87.
2. Особенности построения высокоточной аэрогеофизической системы серии «Импульс-Аэро» / С. В. Барсуков, А. А. Белая, Ю. Ю. Дмитриев, А. С. Сверкунов, Е. Н. Махнач, Г. М. Тригубович // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 199–204.

© Г. М. Тригубович, А. В. Чернышев, А. С. Сверкунов, С. В. Барсуков, 2015

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MCWD ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СВЕРХГЛУБИННЫХ И АЗИМУТАЛЬНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА ВО ВРЕМЯ БУРЕНИЯ

Михаил Владимирович Свиридов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Антон Павлович Мосин

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 141), e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

Юрий Евгеньевич Антонов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 140), e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

Сергей Викторович Мартаков

Хьюстонский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 77073-5114, США, шт. Техас, г. Хьюстон, ул. Рэнкин Роуд, 2001, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. +1 713 879 4047, e-mail: Sergey.Martakov@bakerhughes.com

Для эффективной проводки ствола скважины на месторождении углеводородов (задача геонавигации) необходимо во время бурения уметь определять параметры разбуриваемой среды, вовремя обнаруживать приближающиеся геологические объекты и, соответственно, изменять направление бурения с учетом полученной информации.

Зачастую геонавигация осуществляется с помощью приборов электромагнитного каротажа, предоставляющих интерпретатору широкий набор независимых многокомпонентных измерений. При этом глубинность измерений и их азимутальная чувствительность имеют решающее значение, поскольку позволяют не только вовремя обнаруживать приближающиеся объекты, но и определять их пространственную ориентацию относительно ствола скважины. Интерпретация таких измерений достаточно сложна и стандартные техники зачастую не дают приемлемых результатов, что может привести к ошибкам в процессе геонавигации.

Программный комплекс MCWD был разработан для анализа, предварительной обработки и совместной интерпретации разнообразных измерений электромагнитного каротажа в процессе бурения, включая сверхглубинные и азимутально-чувствительные. Ядром комплекса является алгоритм инверсии, основанный на методе наиболее вероятного ансамбля. Программное обеспечение отличается высокой производительностью, что позволяет решать задачу геонавигации в реальном времени.

Работоспособность программного комплекса MCWD продемонстрирована на примере интерпретации данных, полученных во время полевых испытаний прибора EDAR на тестовом полигоне BETA (США, штат Оклахома). В результате совместной интерпретации измерений приборов электромагнитного каротажа во время бурения EDAR и AziTrak восстановлена геоэлектрическая модель среды. Отмечена хорошая согласованность модели с результатами исследования керна. Приведена оценка глубинности каротажных измерений.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, инверсия данных каротажа во время бурения, программный комплекс MCWD, геонавигация, проводка ствола скважины, прибор AziTrak, прибор EDAR, полигон Baker Experimental Test Area (BETA).

MCWD SOFTWARE PACKAGE FOR INTERPRETATION OF EXTRA-DEEP AND AZIMUTHAL LWD RESISTIVITY DATA

Mikhail V. Sviridov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, Russia, 630128, Novosibirsk, 4A Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Anton P. Mosin

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, Russia, 630128, Novosibirsk, 4A Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 141), e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

Yuriy E. Antonov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, Russia, 630128, Novosibirsk, 4A Kutateladze St., PhD, Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 140), e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

Sergey V. Martakov

Baker Hughes Houston Technology Center, 2001 Rankin Road, Houston, Texas 77073-5114, USA, PhD, Senior Scientist, tel. +1 713 879 4047, e-mail: Sergey.Martakov@bakerhughes.com

For the effective placement of a producing well in an oilfield (geosteering task), it is necessary to estimate in real time the parameters of the formation we are drilling in, to detect the approaching geological objects in time and to correct the drilling direction based on the obtained information.

Reservoir navigation is very often performed using LWD resistivity tools providing a wide range of independent multi-component measurements. The depth of investigation of the measurements and their azimuthal sensitivity plays a very important role in geosteering decision making because they enable not only the early detection of approaching geological objects but to determine their orientation relative to the wellbore. However, the interpretation of such measurements is rather difficult, so the conventional approaches may not give adequate results and can lead to the incorrect geosteering decisions.

The MCWD software package has been developed for the processing, analysis and joint interpretation of various LWD resistivity measurements, including extra-deep and azimuthal resistivity. The kernel of MCWD software is the inversion algorithm based on the method of the most probable parameter combination. High performance of MCWD software enables the real time interpretation of resistivity data and helps to make proper geosteering decisions.

A field case study from the Baker Experimental Test Area (BETA site), Oklahoma, USA, demonstrated the performance of the MCWD software package. Resistivity data was measured by the recently released EDAR tool during the field test. The geo-electrical formation model has been recovered as a result of joint interpretation of EDAR and AziTrak LWD resistivity data. A good correlation between the recovered model and results of core analysis has been shown. An estimation of depth of detection has been presented for each resistivity tool.

Key words: resistivity logging, inversion of LWD resistivity data, MCWD software, geosteering, reservoir navigation, AziTrak tool, EDAR tool, Baker Experimental Test Area (BETA).

Традиционно для задач геонавигации использовались приборы электромагнитного каротажа во время бурения с глубиной измерений до 5 м [1, 2]. При этом в неблагоприятных случаях (например, в условиях высокопроводящей среды вокруг ствола скважины) глубина измерений оказывалась существенно меньшей, что осложняло надежность процесса. Недавно выпущенные

каротажные приборы следующего поколения, такие как EDAR [3], обладают значительно большей глубиной измерений (до 30 м). Для работы с новыми сверхглубинными, азимутально-чувствительными измерениями, а также для анализа, предварительной обработки и совместной интерпретации любой другой комбинации измерений электромагнитного каротажа во время бурения был разработан программный комплекс MCWD [4].

В целях тестирования возможностей приборов нового поколения и для оценки эффективности программного комплекса MCWD в реальных условиях были проведены полевые испытания на полигоне BETA в штате Оклахома, США. Геологическое строение данного района хорошо изучено методами ядерного и электромагнитного каротажа с высокой разрешающей способностью, а также исследованиями на керне. В ходе тестирования было пробурено две горизонтально-наклонных скважины, осуществлен каротаж во время бурения приборами AziTrak и EDAR, проведена совместная инверсия каротажных измерений. Полученные геоэлектрические модели среды и оценка глубинности измерений приборов приведены на рис. 1 и 3. Можно отметить хорошую согласованность моделей с известным геологическим строением района. Качество инверсии на примере сверхглубинных и азимутально-чувствительных измерений EDAR можно оценить из рис. 2 и 4.

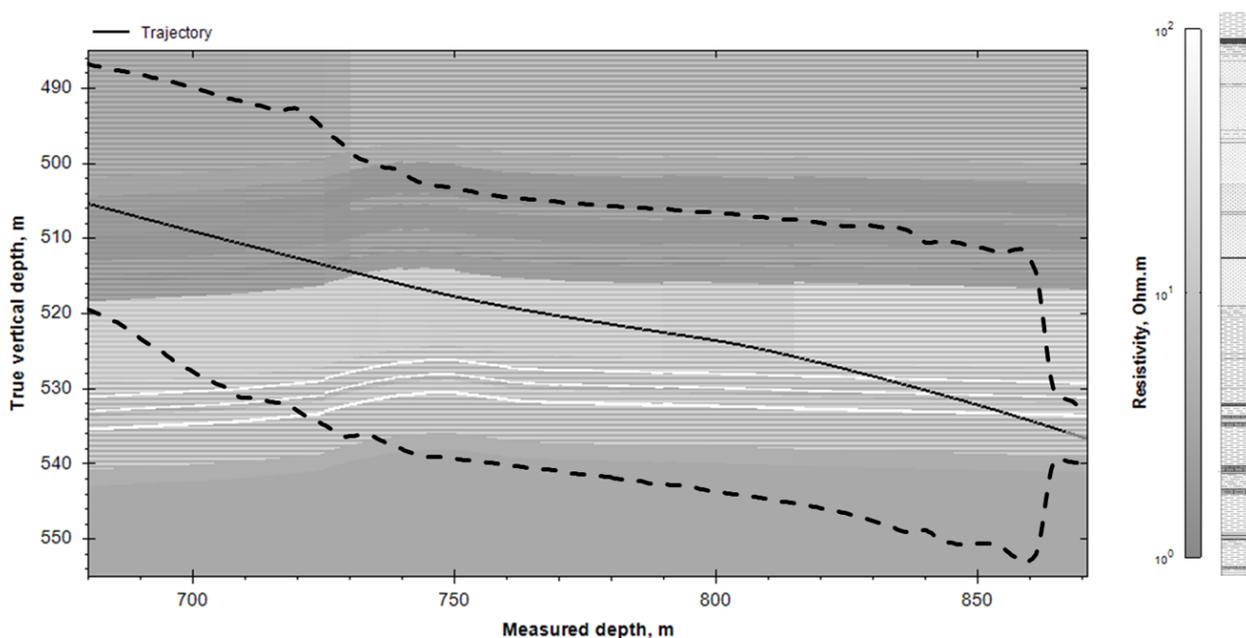


Рис. 1. Геоэлектрическая модель среды, полученная посредством совместной инверсии измерений зондов EDAR и AziTrak для участка скважины № 1 на полигоне BETA.

По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах вдоль скважины, траектория которой отмечена сплошной линией черного цвета. По вертикальной оси отложено восстановленное расстояние по вертикали в метрах до границ раздела пластов. Восстановленные значения УЭС пластов в Ом·м показаны цветом (соответствует палитре справа). Пунктирные линии черного цвета ограничивают область среды, которая вносит вклад в измерения зондов. Типичное строение района BETA показано на геологической колонке справа

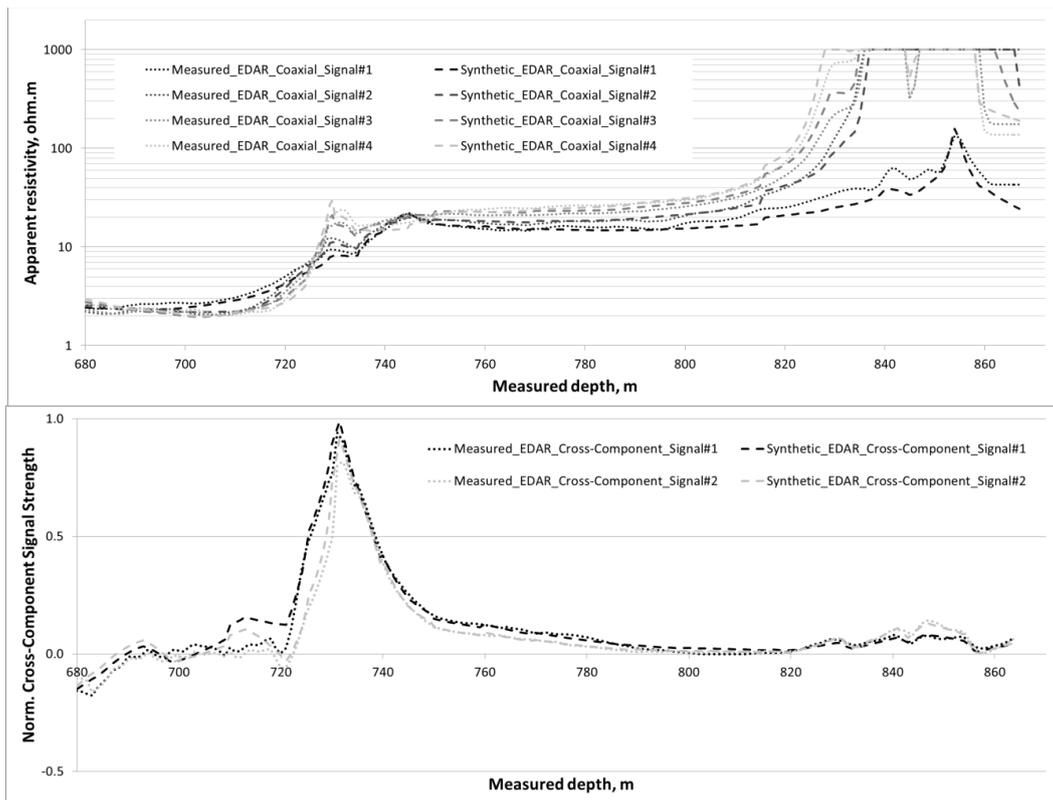


Рис. 2. Измеренные (пунктирные линии) и подобранные в ходе инверсии (показаны точками) сигналы прибора EDAR на участке скважины № 1

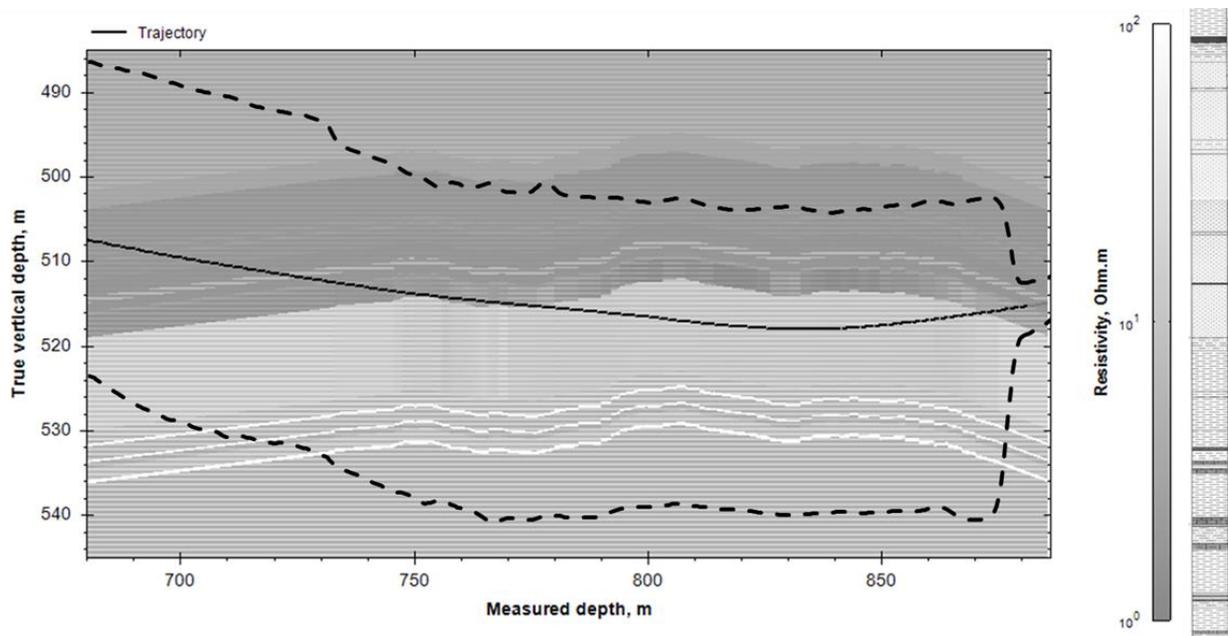


Рис. 3. Геоэлектрическая модель среды, полученная посредством совместной инверсии измерений зондов EDAR и AziTrak для участка скважины №2 на полигоне ВЕТА.

По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах вдоль скважины, траектория которой отмечена сплошной линией черного цвета. По вертикальной оси отложено восстановленное расстояние по вертикали в метрах до границ раздела пластов. Восстановленные значения УЭС пластов в Ом·м показаны цветом (соответствует палитре справа). Пунктирные линии черного цвета ограничивают область среды, которая вносит вклад в измерения зондов. Типичное строение района ВЕТА показано на геологической колонке справа.

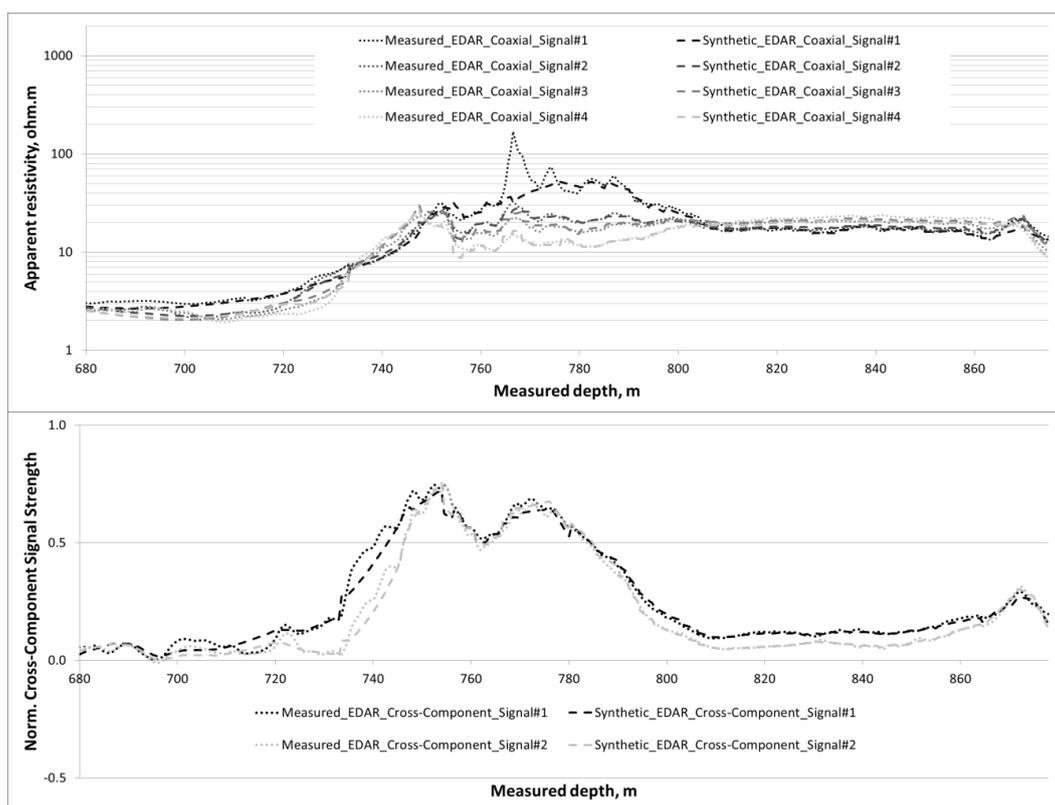


Рис. 4. Измеренные (пунктирные линии) и подобранные в ходе инверсии (показаны точками) сигналы прибора EDAR на участке скважины № 2

В работе рассмотрен пример интерпретации измерений электромагнитного каротажа с тестового полигона ВЕТА посредством программного комплекса MCWD. Восстановлена геоэлектрическая модель среды, приведены оценки глубинности измерений и качества выполненной интерпретации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A new slimhole multiple propagation resistivity tool / Meyer W.H., Thompson L.W., Wisler M.M., Wu. J.Q. // SPWLA 35th Annual logging Symposium (Tulsa, Oklahoma, USA, June 19-22, 1994). - Paper NN.
2. Navigating and Imaging in Complex Geology With Azimuthal Propagation Resistivity While Drilling / Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R.E., Helgesen T.B., Meyer W.H, Randall R., Peveto C., Poppitt A., Signorelli J., Wang T. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (San Antonio, Texas, USA, September 24-27, 2006). - SPE-102637.
3. Verification Testing of a New Extra-Deep Azimuthal Resistivity Measurement / Hartmann A., Vianna A., Maurer H.-M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A., Constable M.V. // SPWLA 55th Annual logging Symposium (Abu Dhabi, United Arab Emirates, May 18-22, 2014). - Paper MM.
4. Sviridov M., Mosin A., Antonov Yu., Nikitenko M., Martakov S., Rabinovich M. New Software for Processing of LWD Extradep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. - 2014. - V. 17. - P. 109–127.

© М. В. Свиридов, А. П. Мосин, Ю. Е. Антонов, С. В. Мартаков, 2015

ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОРОД НА РАЗРУШЕНИЕ ПЕСЧАНИКА ВО ВРЕМЯ БУРЕНИЯ

Олег Борисович Бочаров

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат физико-математических наук, заместитель директора, тел. (383)332-94-43 (доп. 179), e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

Александр Викторович Серяков

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доп. 143), e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

Проведено трехмерное численное моделирование напряженного состояния и изменения порового давления в окрестности скважины с учетом образования корки бурового раствора в неоднородном пласте, а также моделирование зоны внедрения в тех же условиях. Установлено, что зона внедрения в плотном песчанике значительно глубже, чем в более проницаемом слое. Численные эксперименты показали, что именно учет изменения прочностных свойств в прискважинной зоне в результате смачивания (эффект Ребиндера) позволяет объяснить эффект разрушения плотного песчаника.

Ключевые слова: стабильность скважины, разрушение, песчаник, пороупругая модель, двухфазная фильтрационная модель, эффект Ребиндера, корка бурового раствора.

THE ROCK WETTABILITY INFLUENCE ON THE SANDSTONE FORMATION BREAKOUTS WHILE DRILLING

Oleg B. Bocharov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Deputy Director, tel. (383)332-94-43 (int. 179), e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

Alexander V. Seryakov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (int. 143), e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

A 3D stress and pore pressure simulation in near wellbore zone has been conducted with mudcake taken into account and comparing with invasion zone numerical modeling for the same conditions. It has been determined that invasion zone width in tight sands is greater than in more permeable layers. The numerical experiments show it is rock failure properties changing caused by wetting (the Reh binder effect) that can explain the breakouts in the tight sandstones.

Key words: wellbore stability, breakouts, tight sandstone, poroelastic model, two phase filtration model, Reh binder effect, mudcake.

Бурение скважин на нефтегазовых месторождениях связано с изменением как гидродинамического режима пласта, так и напряженного состояния прискважинной зоны. Если величина внутреннего давления в скважине достигает критического значения, происходит обрушение стенок, при котором дальней-

шая эксплуатация невозможна. Целостность ствола скважины при бурении достигается поддержанием давления бурового раствора выше величины порового давления и ниже границы гидроразрыва пласта. Тем не менее даже при соблюдении технологии устойчивого бурения на стенках отверстия возникают разрушенные участки, которые могут значительно осложнить дальнейшие технологические операции и эксплуатацию. Понимание причин подобных разрушений в значительной степени помогает планированию и корректировке работ по всему месторождению.

Мотивацией представленной работы послужила проблема интерпретации данных, полученных для скважин на газосодержащем месторождении Северной Африки. Формация месторождения преимущественно сложена сланцами и песчаником. Продуктивный пласт представляет собой песчаник с проницаемостью, изменяющейся на порядок. Особенностью наблюдений является тот факт, что в интервале, где порода достаточно плотная и малопроницаемая, происходят разрушения, в то время как при прохождении более рыхлого слоя с большей проницаемостью образуется корка бурового раствора, под которой разрушений не наблюдается. Для объяснения данного явления проведены детальные численные эксперименты.

Используемые математические модели

Для совместного описания фильтрации флюида и деформации породы использовалась пороупругая модель [1], в которой уравнение для изменения порового давления имеет вид

$$S_e \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla^2 p + \alpha \frac{\partial e}{\partial t} = 0,$$

где S_e – коэффициент флюидоотдачи, p – поровое давление, k – проницаемость среды, μ – вязкость флюида, α – коэффициент Био-Уиллиса, e – объемная деформация.

Для полных напряжений рассматриваются уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = \rho_m \mathbf{g},$$

где σ_{ij} – компоненты тензора полных напряжений, ρ_m – плотность пористой среды, \mathbf{g} – вектор гравитации.

Физические уравнения связи напряжений, деформаций и порового давления в форме обобщенного закона Гука

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda e\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij},$$

где G , λ – параметры Ламе, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций.

Для определения толщины корки бурового раствора на стенке скважины используется двухпараметрическая модель

$$\frac{\partial h}{\partial t} = aq - \tau,$$

здесь $h(t)$ – толщина корки бурового раствора, a – параметр роста корки, определяющийся через концентрацию твердых частиц в растворе и пористость корки, q – величина скорости фильтрации, направленной по нормали к контуру скважины, τ – параметр смыва корки.

Расчеты напряжений и порового давления проводились с помощью трехмерного конечноэлементного пакета Geofluid [2]. Разрушение материала оценивалось по величине эквивалентного напряжения, записанного для критерия Кулона-Мора

$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3 \operatorname{ctg} \psi,$$

где σ_e – эквивалентное напряжение, σ_1, σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, $\operatorname{ctg} \psi = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$, φ – угол внутреннего трения. Разрушение (сдвиговое) наступает при достижении σ_e величины предела прочности на одноосное сжатие S_0 .

Моделирование двухфазной зоны внедрения выполнены с помощью двумерной программы на основе модели Баклея-Левретта [3]. Уравнение для насыщенности s :

$$\frac{\partial(\rho_1 sm)}{\partial t} + \operatorname{div} \left(-\rho \frac{k k_1(s)}{\mu_1} (\nabla p - \rho_1 \frac{\rho}{g}) \right) = 0.$$

Уравнение для давления p :

$$\frac{\partial((\rho_1 - \rho_2)sm + \rho_2 m)}{\partial t} - \operatorname{div} \left(k \left[\rho_1 \frac{k_1(s)}{\mu_1} + \rho_2 \frac{k_2(s)}{\mu_2} \right] \nabla p - k \left[\frac{\rho_1^2 k_1(s)}{\mu_1} + \frac{\rho_2^2 k_2(s)}{\mu_2} \right] \frac{\rho}{g} \right) = 0,$$

где ρ_i – плотности флюидов, $k_i, \mu_i, i=1,2$ – фазовые проницаемости и вязкости флюидов.

Результаты моделирования

Все необходимые параметры определялись для участка скважины на глубине 2334 м, пересекающего три слоя песчаника: с низкой проницаемостью ($k=7$ мД), высокой проницаемостью ($k=62$ мД) и снова с низкой ($k=7$ мД). Мощность слоев 2 м. Величина угла внутреннего трения для всех слоев одинакова – $\varphi=35^\circ$. Параметр S_0 в проницаемом слое ниже, чем в плотном. Значения исходных напряжений на указанной глубине: вертикальное 55 МПа, минималь-

ное горизонтальное 44 МПа, максимальное горизонтальное напряжение 80 МПа (предполагаем, что сжимающие напряжения положительны).

Регулятором стабильной работы скважины во время бурения является давление бурового раствора. Влияние этого параметра на напряженное состояние и нарушенность пласта и было исследовано. На контуре скважины задавался перепад давления dP . Первоначально поведено моделирование напряженно-деформированного состояния прискважинной зоны без учёта двухфазности зоны внедрения. Численные эксперименты показали, что для типичных значений dP при бурении песчаников на таких глубинах, с одной стороны, не возникает растягивающих тангенциальных напряжений, то есть гидроразрыв отсутствует, что подтверждается данными наблюдений. С другой стороны, быстрое гидродинамическое изолирование прискважинной зоны от фильтрата бурового раствора вследствие образования корки переносит сжимающую нагрузку на пористый скелет. Величина эквивалентного напряжения, характеризующего степень предразрушения формации, увеличивается с уменьшением перепада давления в скважине, поскольку внутреннее давление на стенках отверстия поддерживает формацию, не давая ей деформироваться в исходном поле сжимающих напряжений.

Также получено, что зоны сдвиговых нарушений должны возникать вдоль направления действия минимальных горизонтальных напряжений. При этом значение функции σ_e в слое с проницаемостью $k=62\text{mD}$ на 8-9 МПа превосходит показатель в плотном песчанике, что указывает на большую вероятность образования разрушения в пористой породе под слоем корки. Таким образом, в моделировании имеет место эффект, обратный наблюдаемому. Тем не менее предела S_0 функции σ_e не достигают, поэтому в данном случае существует лишь вероятность возникновения нарушения.

Рассмотрим теперь зону внедрения. Двухфазное моделирование с учетом корки показало, что глубина зоны проникновения в более плотном песчанике больше на 40 %, чем в хорошо проницаемом. Это объясняется более толстым (на 30 %) слоем корки бурового раствора над высокопроницаемым участком. Проникновение фильтрата, представляющего полярную жидкость (например, вода, спирт и т. д.), в плотный слой вызывает изменение прочностных свойств породы, так называемый эффект Ребиндера. Наибольшее его проявление имеет место при использовании буровых растворов на водной основе (WBM). Учтем это изменением угла внутреннего трения и напряжений на разрыв в слабопроницаемом песчанике. Так, при уменьшении угла внутреннего трения φ с 35° до 25° величина эквивалентного напряжения в плотном песчанике превышает на 6 МПа значения в высокопроницаемом пористом слое. На рис. 1 представлен пример расчета, когда давление в скважине кратковременно падает, что происходит при технологических операциях и в ходе, например, спуско-подъемных работ. При этом разрушение в направлении минимального сжимающего напряжения уже может начаться, если величина S_0 станет меньше значения 104 МПа. Вывалы породы инициируются вблизи границы контакта двух песчаников со стороны менее проницаемого слоя.

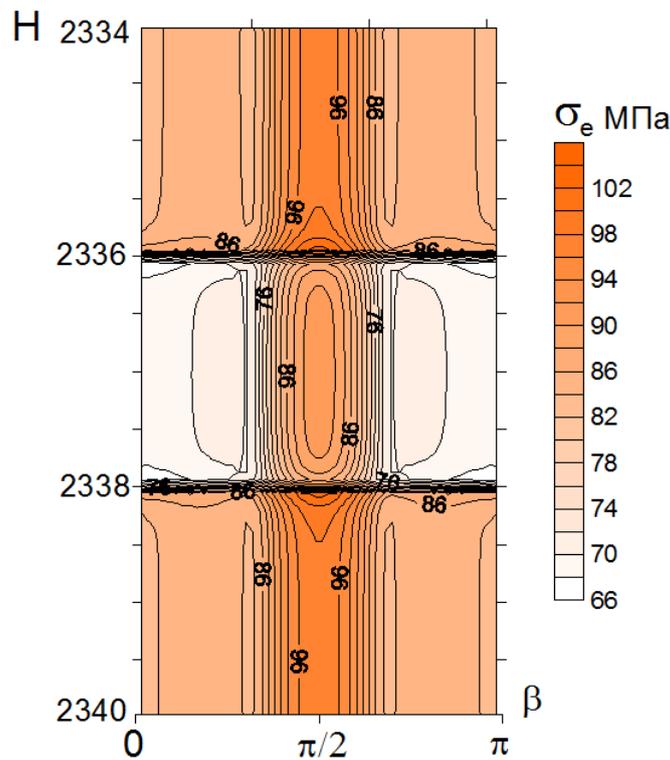


Рис. 1. Развертка значений эквивалентного напряжения σ_e , определяющего разрушение, по внутренней поверхности скважины для случая кратковременного понижения давления бурового раствора.

H – глубина залегания, β – азимутальный угол, отсчитываемый от направления действия максимального горизонтального напряжения

Данный факт можно наблюдать на развертке значений σ_e по внутренней поверхности скважины (рис. 1). Форма ожидаемого нарушения согласуется с наблюдаемыми контурами вывалов на азимутальных логах плотности.

Таким образом, показано, что при оценке стабильности скважины стандартная поропругая модель должна учитывать как двухфазность процесса внедрения, так и изменение прочностных характеристик породного скелета при смачивании (эффект Ребиндера).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang H.F. Theory of linear poroelasticity. - London: Princeton University Press, 2000. - 287 p.
2. Совместное моделирование процессов геомеханики и фильтрации в прискважинной зоне во время бурения / В. Я. Рудяк, А. В. Манаков, А. В. Серяков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посвященной 80-летию ак. М.В. Курлени (3–6 октября 2011 г.). В 2 т. - Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2011. - Т. I. - С. 383–388.
3. Бочаров О.Б., Пеньковский В.И. Введение в теорию фильтрации жидкостей и газов в пористых средах: учеб. пособие. - Новосибирск: НГУ, 2005. - 132 с.

© О. Б. Бочаров, А. В. Серяков, 2015

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ М-ЗСБ И МТЗ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ EM-DATAPROCESSOR

Георгий Михайлович Тригубович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Анастасия Александровна Белая

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, заведующая лабораторией, тел. (383)222-42-03, e-mail: nz1@ngs.ru

Антон Владимирович Чернышев

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Надежда Валерьевна Симанкович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: nadya-simankovich@gmail.com

При интерпретации данных, получаемых в методе МТЗ, существует проблема учета неоднородной по проводимости верхней части разреза. Для ее изучения и параметризации проводят дополнительные исследования методом М-ЗСБ, после чего по данным МТЗ независимо оцениваются параметры глубинных объектов. В работе рассмотрены возможности программного комплекса EM-DataProcessor при проведении совместной интерпретации данных М-ЗСБ и МТЗ на примере модели участка регионального профиля.

Ключевые слова: EM-DataProcessor, нормализация данных МТЗ, комплексная 3D-интерпретация.

COMPLEX INTERPRETATION OF TEM AND MT DATA IN EM-DATAPROCESSOR PROGRAM

Georgiy M. Trigubovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Professor, Supervisor of Geophysical Research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Anastasiya A. Belaya

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Laboratory Manager, tel. (383)222-42-03, e-mail: nz1@ngs.ru

Anton V. Chernyshev

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Ph. D., Leading Researcher, (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Nadezhda V. Simankovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: nadyasimankovich@gmail.com

In MT data interpretation there is a problem of accounting for nonuniform conductivity of the upper part of the section. For its parameterization additional studies using M-TEM are often conducted. After that the parameters of the underlying objects are independently estimated using MT data. The paper consider the capabilities of the EM-DataProcessor software for joint interpretation of the M-TEM and MT data based on the regional profile model example.

Key words: EM-DataProcessor, MT data normalization, complex 3D interpretation.

При интерпретации данных электроразведки в средах с неоднородной верхней частью разреза (ВЧР) часто возникают проблемы с определением параметров глубинных объектов [1, 2]. Для корректного изучения глубинной части разреза исследования проводят по технологии совместного использования М-ЗСБ и МТЗ, которая позволяет учесть неоднородность ВЧР и оценить параметры глубинных объектов. При такой технологии проведения электроразведочных работ необходимо программное обеспечение, которое позволило бы максимально быстро выполнять совместную трехмерную интерпретацию данных М-ЗСБ и МТЗ и получать результат в рамках единой модели среды.

Рассмотрим технологию комплексной интерпретации электроразведочных данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе EM-DataProcessor [3] на примере модели, построенной по данным, полученным на участке регионального профиля. Модель и схема наблюдений МТЗ приведена на рис. 1. Шаг съемки МТЗ – 1000 м, шаг съемки М-ЗСБ – 500 м, расстояние между генераторными петлями – 3500 м. Модель осложнена неоднородной ВЧР и наличием проводящих объектов в стороне от профиля.

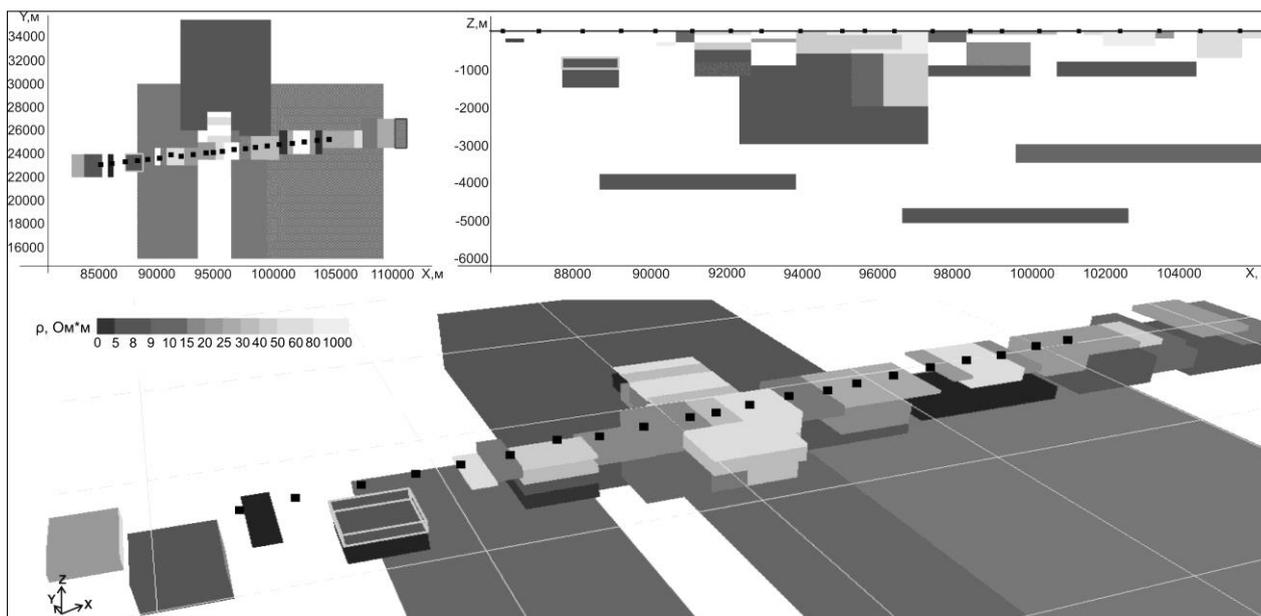


Рис. 1. Тестируемая трехмерная модель

Первым этапом интерпретации таких данных часто является 1D-инверсия. Результат полностью автоматической 1D-инверсии данных МТЗ в EM-DataProcessor изображен на рис. 2, из которого видно, что без выполнения процедуры нормализации данных МТЗ интерпретировать полученный разрез не представляется возможным. Для коррекции смещений графиков кажущихся сопротивлений, которые возникают из-за наличия локальных неоднородностей в ВЧР (Shift-эффект), часто прибегают к нормализации данных МТЗ [1].

Если мы располагаем только данными МТЗ, то нормализация проводится по среднему уровню в группе схожих кривых (близких по фазам). При такой нормализации искажается информация о ВЧР, которая хотя и не является целевым объектом исследования, но ее неточное восстановление может привести к существенному искажению глубинной части геоэлектрического разреза. Наиболее же корректным способом нормализации является использование данных М-ЗСБ, которые либо практически не реагируют на такого рода объективные помехи, либо дают достаточную информацию для их корректного учета. Поэтому следующим этапом интерпретации комплекса данных М-ЗСБ и МТЗ является инверсия данных М-ЗСБ.

В результате 1D-инверсии данных М-ЗСБ был получен геоэлектрический разрез, представленный на рис. 3. Как видно из рисунка, среда является существенно трехмерной, и для точной параметризации ВЧР необходимо проведение 3D-интерпретации, в результате которой был получен разрез, представленный на рис. 4.

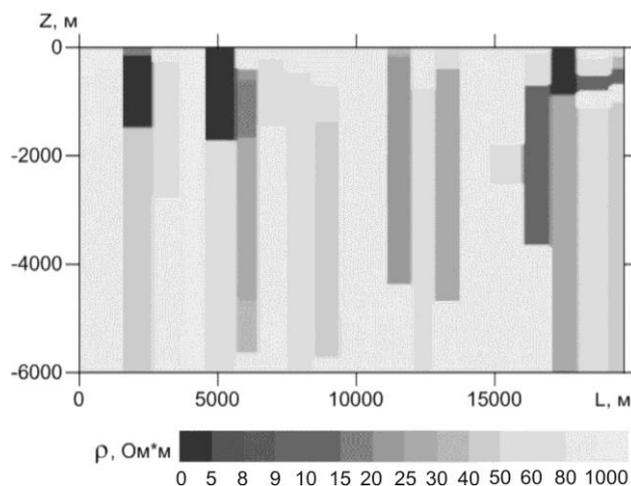


Рис. 2. Результат 1D-инверсии данных МТЗ по направлению ХУ

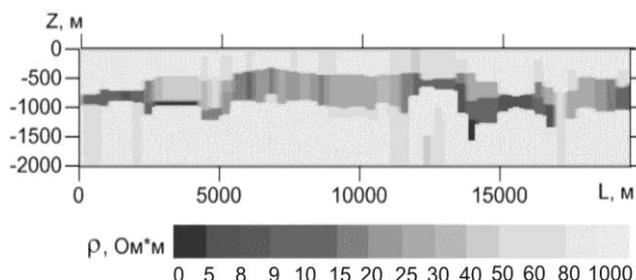


Рис. 3. Результат 1D-инверсии данных М-ЗСБ

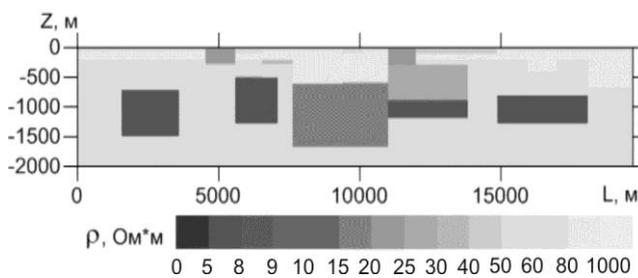


Рис. 4. Результат 3D-интерпретации данных М-ЗСБ

Далее проводится нормализация данных МТЗ с использованием 3D-модели, полученной по данным М-ЗСБ. Для этого рассчитывается прямая задача МТЗ для 3D-модели ВЧР и проводится совмещение рассчитанных и практических кривых кажущихся сопротивлений МТЗ в выбранном диапазоне частот. На рис. 5 приведены характерные кривые кажущихся сопротивлений до и после нормализации. Отметим, что нормализация, основанная на 3D-модели ВЧР, позволяет более адекватно интерпретировать глубинную часть исследуемой среды, а в рассматриваемом примере – даже по результатам 1D-инверсии. Так, на рис. 6 представлен геоэлектрический разрез, полученный в результате 1D-инверсии нормированных данных МТЗ, в сравнении с разрезом исходной модели. После нормализации в разрезе появился проводящий слой на глубине 3–5 км.

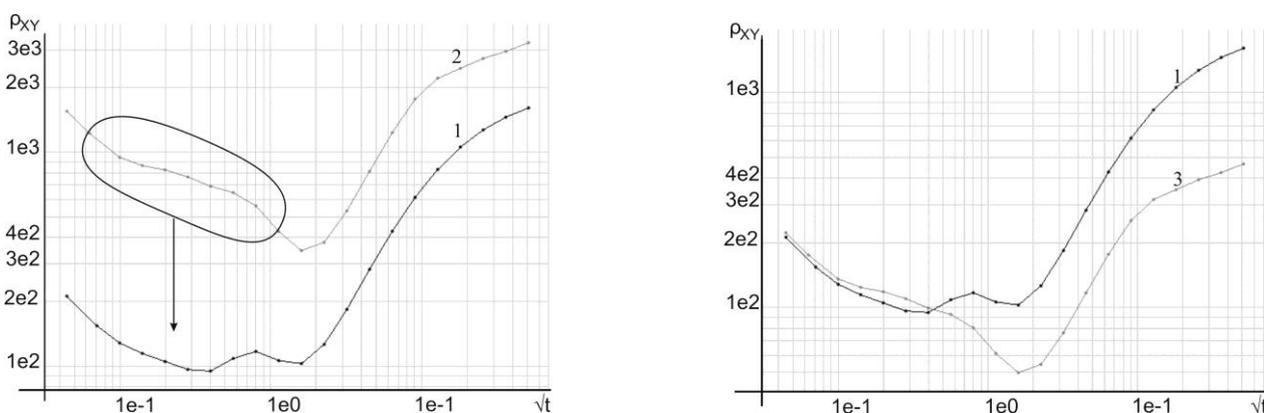
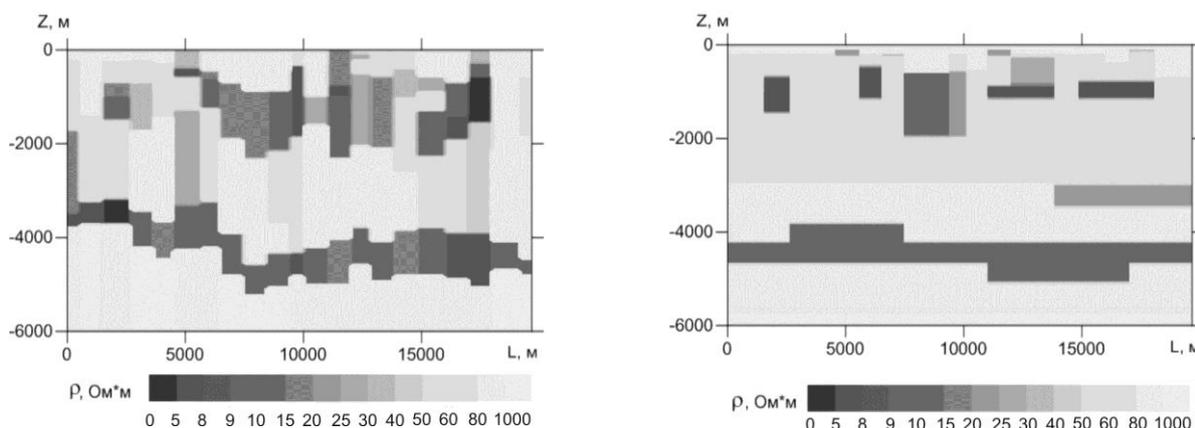


Рис. 5. Нормализация ρ_{XY} : кривая 1 получена путем расчета прямой задачи МТЗ от 3D-модели ВЧР; кривая 2 – экспериментальная; кривая 3 получена в результате нормализации в диапазоне $\sqrt{t} = 0.1..1 \text{ мс}^{1/2}$



а) геоэлектрический разрез по результатам 1D-инверсии нормированных данных МТЗ по направлению XY

б) геоэлектрический разрез по исходной 3D-модели

Рис. 6. Результат 1D-инверсии (МТЗ) в сравнении с тестируемой моделью

Для более качественной параметризации разреза далее проводится 3D-интерпретация данных МТЗ с фиксированной 3D-моделью ВЧР, полученной по данным М-ЗСБ. На этом этапе подбор выполняется только для глубинной части разреза. На рис. 7 приведены результаты 3D-интерпретации, полученные по данным МТЗ. Как видно из рисунка, в результате детализирована структура глубинной части разреза. Отличия в ВЧР обусловлены недостаточной плотностью измерений М-ЗСБ, а также влиянием объектов, расположенных сбоку от профиля [2]. Заметим, что осевая линия глубинного целевого горизонта, показанная на рис.7а пунктирной линией, и соответствующая суммарная продольная проводимость пласта на практике определяются с высокой точностью (2–3 % от глубины залегания), но в силу эквивалентности определить мощность таких пластов затруднительно без привлечения дополнительной информации (данные сейсморазведки, скважинные данные).

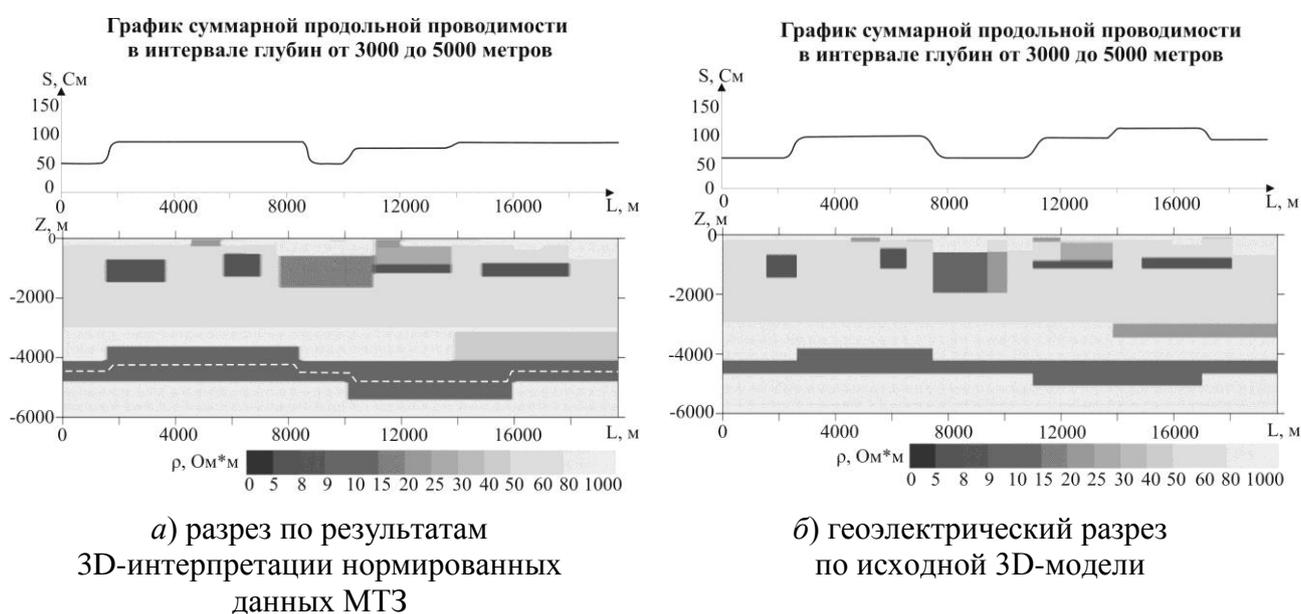


Рис. 7. Результат 3D-интерпретации нормированных данных МТЗ в сравнении с тестируемой моделью

Отметим также, что для учета влияния трехмерных неоднородностей в стороне от основного профиля необходимо применение адаптивной системы наблюдений М-ЗСБ: при превышении допустимого уровня невязки решения обратной задачи для горизонтально-слоистой среды в точках базового профиля проводят дополнительные измерения – «рассечки», ортогональные основному профилю. Дополнительные выносные измерения выполняются с целью параметризации искажающего фактора в ВЧР. При профильной системе наблюдений восстановить объекты в стороне от профиля невозможно.

Итак, совместная интерпретация данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе EM-DataProcessor позволяет повысить качество объемной реконструкции глубинной части разреза за счет детального восстановления неодно-

родной верхней части разреза по данным М-ЗСБ, нормализации данных МТЗ на основе полученной модели ВЧР и 3D-интерпретации глубинного строения среды по данным МТЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. - 668 с.

2. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Опыт применения 3D-моделирования для интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований // Актуальные вопросы современных зондирующих электромагнитных систем. Международная конференция. - Киев, 2012. - [Электронный ресурс].

3. EM-DataProcessor: оперативная 3D-инверсия данных импульсной индуктивной электро-разведки / Г. М. Тригубович, А. В. Чернышев, А. В. Куклин, Я. Ф. Ковальский, А. С. Сверкунов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 3. – С. 100–105.

© Г. М. Тригубович, А. А. Белая, А. В. Чернышев, Н. В. Симанкович, 2015

УДК 550.834.

К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НА ОПОРНЫХ ПРОФИЛЯХ НА ВОСТОКЕ РОССИИ

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.sbras.ru

Александр Сергеевич Сальников

Сибирский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом сейсморазведки, тел. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Алексей Владимирович Лисейкин

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Анастасия Евгеньевна Шенмайер

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: shen@gs.nsc.ru

Представлены материалы глубинных сейсмических исследований на опорных профилях на Востоке России. Показано, что от взрывов и мощных вибрационных источников на вертикальных и горизонтальных приборах устойчиво регистрируются поперечные волны от опорных границ в земной коре и поверхности Мохоровичича. По данным разнополяризованных S-волн установлена анизотропия упругих свойств верхней части земной коры, связанная с зонами трещиноватости. Даны глубинные сейсмические разрезы по данным S-волн и освещены вопросы использования поперечных волн при картировании рудных узлов.

Ключевые слова: профили ГСЗ, поперечные волны, анизотропия, отношения скоростей P- и S-волн, глубинный сейсмический разрез на P-и S-волнах.

TO USAGE OF TRANSVERSE WAVES ON BASE LINES IN EASTERN RUSSIA

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Deputy Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Ph. D., Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Victor S. Seleznev

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Doctor of Science, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Alexander S. Salnikov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Head of Seismic Prospecting Department, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Alexey V. Liseikin

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, candidate of geological-mineralogical Sciences, senior geophysicist, tel. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Anastasia E. Shennmayer

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, junior researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: shennastya@gs.nsc.ru

Materials of deep seismic investigations on the base lines in the East of Russia are presented in the paper. There is shown, that transverse waves from the boundaries in the Earth`s crust and the Moho have been recorded on vertical and horizontal instruments from explosions and high-power vibration sources. On data of heteropolar S-waves there was determined anisotropy of elastic properties of the upper part of the Earth`s crust, connecting with zones of jointing. There are given deep seismic cross-sections on data of S-waves, there are took up questions of transverse waves usage at mapping of different junctions.

Key words: DSS profiles, transverse waves, anisotropy, P- and S-waves ratio, deep seismic cross-sections on P- and S-waves.

Прирост минерально-сырьевой базы России в настоящее время связывается с освоением минерагенических провинций Сибири и Востока России [1, 2]. В последнее десятилетие здесь реализуются крупные проекты по геолого-

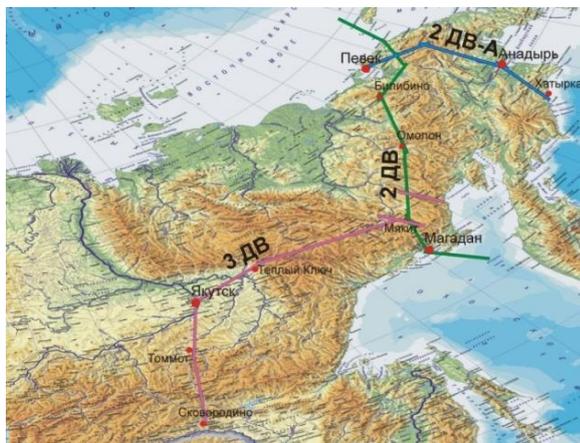


Рис. 1. Глубинные сейсмические исследования на опорных профилях на Востоке России

геофизическому изучению территорий. Так, с 2001 года Роснедра выполняются комплексные геолого-геофизические исследования на сети опорных профилей: 2-ДВ, 2-ДВ-А, 3-ДВ (рис. 1). В задачу каждого реализуемого метода на профилях (ОГТ, КМПВ, ГСЗ, МТЗ и др. [1, 3]) входит наиболее полное извлечение информации о глубинных структурах земной коры и верхней мантии. Ниже освещены вопросы использования поперечных волн при работах (ГСЗ) на опорных профилях.

Работы ГСЗ на опорных профилях выполняются по методике точечных дифференциальных сейсмических зон-

дирований [4]. На большей части опорных профилей реализованы достаточно плотные системы наблюдений из источников и приемников. Расстояния между источниками (взрывы массой 3–6 тонн, мощные вибраторы) составляли в среднем 15–30 км, между регистрирующими станциями (РОСА, Байкал) – в среднем 4–5 км с группами вертикальных приборов СВ-5 и 20 км – с трехкомпонентными приборами GS-20DX. Дальность регистрации на ряде участков достигала 300–400 км.

Анализ волновых полей на большинстве профилей показал, что за полем продольных волн менее уверенно на вертикальных и 3-х компонентных приборах выделяется поле поперечных аналогов (рис. 2).

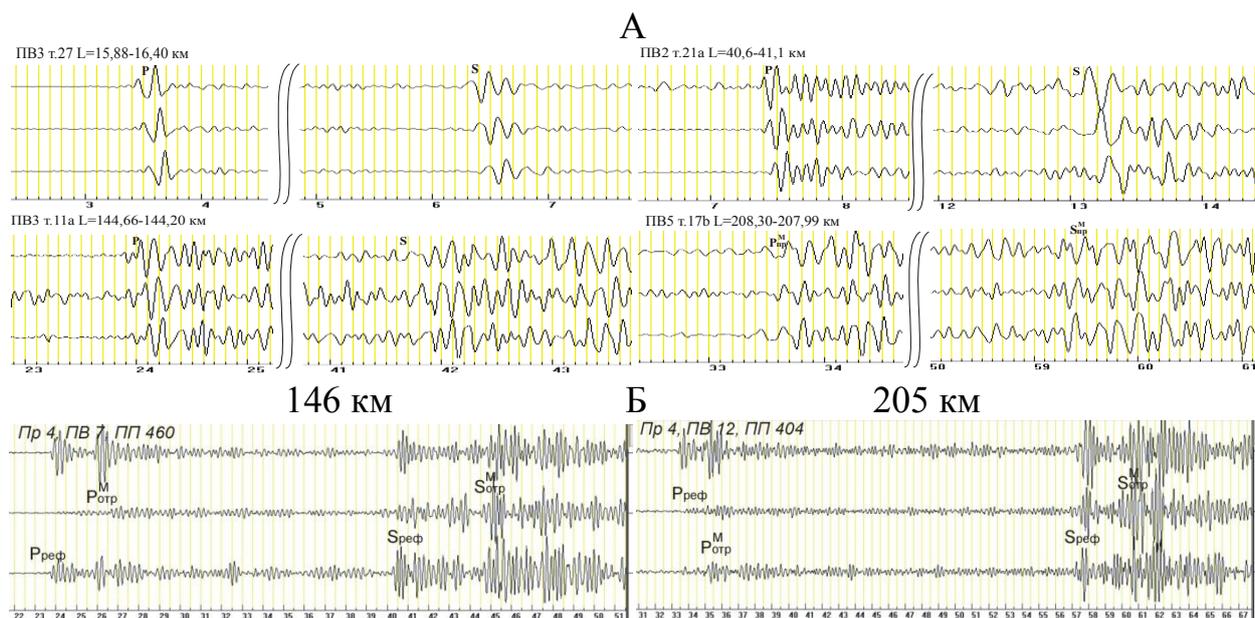


Рис. 2. Примеры S-волн на вертикальных (А) и 3-компонентных (Б) приборах

Наиболее представительный материал получен по данным преломленных (рефрагированных) поперечных волн от границ в земной коре и отраженным S-волнам от поверхности Мохоровичича. Поперечные волны лучше выражены при возбуждении и регистрации в высокогорных участках профилей и слабо выделяются на низкоскоростных участках. По сравнению с продольными волнами S-волны имеют пониженные в 1.5–2 раза времена регистрации, видимые частоты и кажущиеся скорости на сейсмограммах. По интенсивности они в значительной части записей соизмеримы соответствующим им аналогам поля продольных волн и даже превосходят их (рис. 2). Основной экспериментальный материал по S-волнам получен по записям с вертикальных приборов. Трехкомпонентные записи использовались как опорные при интерпретации поля S-волн на вертикальных приборах и анализировались на предмет выявления анизотропии упругих свойств среды. С этой целью выполнялась специальная обработка трехкомпонентных записей: определение параметров оптимальной фильтрации;

пересчитывание на направления P-, SH- и SV-составляющие. В результате пересчета сейсмограммы на направления P-, SH- и SV (которые определялись по поляризации P-волны) происходит «расщепление» группы S-волны на SH- и SV-составляющие, разделяющиеся или не разделяющиеся по временам регистрации.

По ряду хороших записей была проведена корреляция и построены редуцированные годографы поперечных преломленных (рефрагированных) волн от границ в земной коре и поверхности Мохоровичича и поперечных отраженных волн от поверхности Мохоровичича. Интерпретация данных S-волн на участках с отсутствием анизотропии упругих свойств выполнялась традиционными в ГСЗ способами, как и по данным продольных волн [1–4]. По данным рефрагированных S-волн строились томографические разрезы земной коры; по данным преломленных и отраженных поперечных волн от границы М- определялись средние (эффективные) скорости S-волн в земной коре, положение поверхности Мохоровичича и распределение воле нее значений скоростей S-волн. Результаты интерпретации данных P- и S-волн на одном из фрагментов профиля 3ДВ представлены на рис. 3.

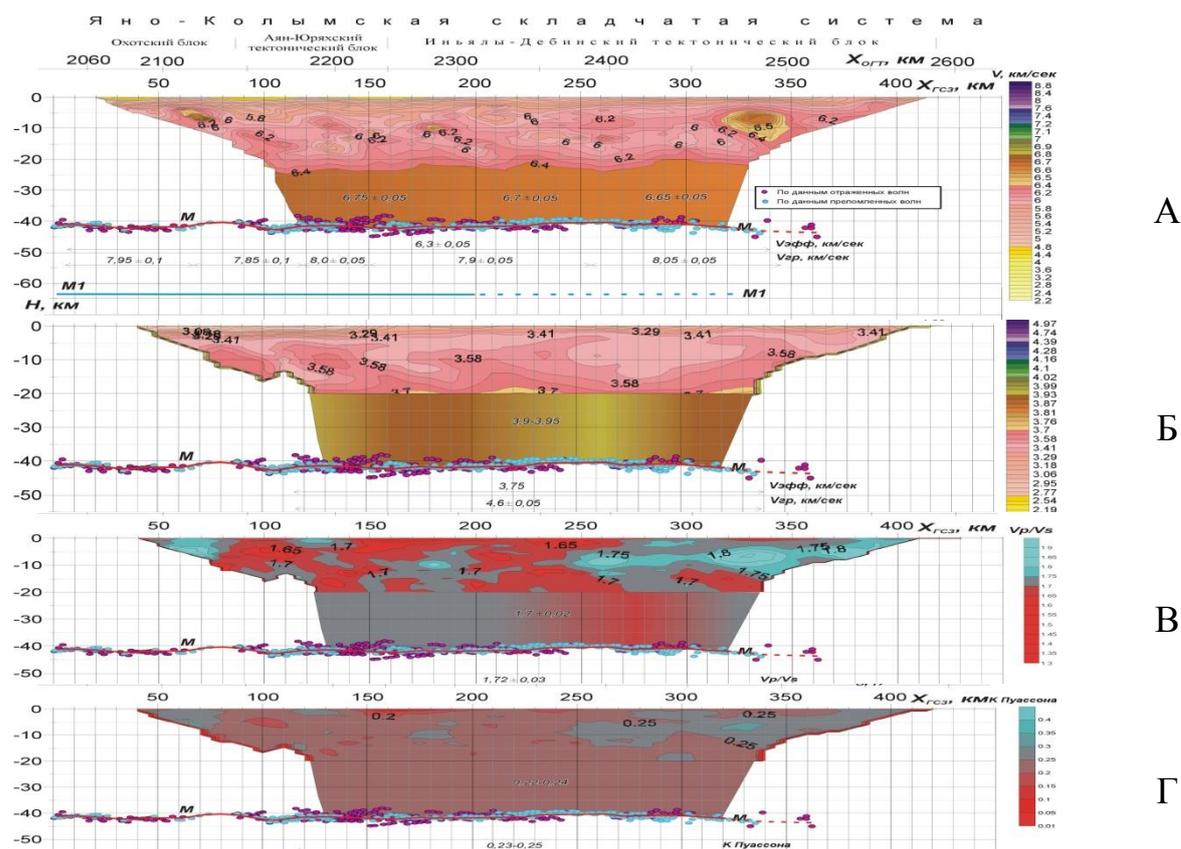


Рис. 3. Результаты интерпретации P- и S-волн на профиле 3-ДВ (участок п. Бугуях – п. Оротукан). А, Б – глубинные сейсмические разрезы на P- и S-волнах, В, Г – отношение V_p/V_s и распределение значений коэффициента Пуассона (σ) в земной коре и поверхности Мохоровичича

Сейсмические разрезы на Р- и S-волнах и их вторичные образы (отношения V_p/V_s , распределение коэффициента Пуассона) дают более полное представление о неоднородном строении тектонических блоков Яно-Колымской складчатой системы. По Р- и S-волнам выделяются зоны пониженных значений скоростей в самой верхней части разреза в пределах Охотского и Аян-Юрхского тектонических блоков. Чрезвычайно неоднородная по данным Р- и S-волн оказалась верхняя кора на глубинах 5–20 км. В нижней части разреза скорости Р- и S-волн составляют 6.65–6.75 км/с и 3.9–3.95 км/с и по границе М 7.85–8.05 км/с и 4.6 ± 0.05 км/с соответственно. По соотношению скоростей Р- и S-волн в земной коре исследуемого профиля явно выделяются значительные участки пониженных значений отношений V_p/V_s (в 1.60–1.70). Вообще центральная часть профиля 3-ДВ отмечается пониженными значениями отношений V_p/V_s в целом во всей земной коре, что связывается исследователями с повышенной раздробленностью земной коры в широкой зоне сочленения трех крупных континентальных плит (Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской) [2]. Аналогично отношению скоростей Р- и S-волн (но менее контрастно) на рис. 3Г ведут себя значения коэф. Пуассона.

Установленное на ряде участков опорных профилей различие времен регистрации SV- и SH- составляющих (достигающее 0.5 с) свидетельствует об анизотропии упругих свойств среды. Отмечено это различие времен SV- и SH-волн в основном на небольших удалениях от источников (~20–80 км). Отношения T_{sh}/T_{sv} , определенные по полным временам пробега волн от источника к регистрирующей станции, составили 1.01–1.05. Учитывая, что лучи SV- и SH-волн распространяются неглубоко на данных удалениях, полученная кажущаяся анизотропия может относиться к верхней части земной коры. Была установлена корреляция выявленной анизотропии с зонами крупных разломов. Причиной возникновения анизотропии в этих зонах, по мнению исследователей, являются мощные зоны упорядоченной трещиноватости в зонах разломов в верхней части земной коры.

На опорных профилях на Востоке России проводился анализ связи скоростных аномалий продольных и поперечных волн с известными и потенциальными рудопроявлениями. По соотношению времен регистрации Р- и S-волн на малых удалениях (t_s/t_p) отношению скоростей продольных и поперечных волн (V_p/V_s) и коэффициента Пуассона в верхней части разреза на профилях 2-ДВ, 2-ДВ-А и 3-ДВ был выделен ряд явно выраженных участков с пониженными (менее 1.70) значениями отношений t_s/t_p , V_p/V_s и коэффициента Пуассона менее 0.25. Практически все из них совпали с известными зонами рудопроявлений. Прежде всего это участки, в пределах которых размещены месторождения золота. Гранитоиды, в которых размещены золотоносные кварцевые жилы, являются причиной пониженных здесь отношений скоростей (V_p/V_s) и коэффициента Пуассона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сальников А. С., Ефимов А. С., Кузнецов В. Л., Еманов А. Ф., Соловьев В. М., Селезнев В. С. Глубинное строение земной коры северо-востока Евразии по данным глубинного сейсмического зондирования // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. - 2014. - Т. 2 - С.62–66.
2. Глубинные сейсмические исследования на субширотном трансекте Хандыга-Сусуман-Мякит в области сочленения Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской континентальных плит / В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. Ю. Тимофеев, С. В. Шибачев, А. В. Лисейкин, А. Е. Шенмайер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 3. – С. 61–67.
3. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Т.В. Кашубина Т.В., Шенмайер А.Е. Использование эффективных сейсмических моделей сред при работах ГСЗ на опорных профилях в Восточной части России // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. - 2014. - Т. 4, № 4. - С. 74–86.
4. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф., Тен Е.Н., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д.. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. - Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. - 199 с.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников,
А. В. Лисейкин, А. Е. Шенмайер, 2015

О НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГРУПП МОЩНЫХ ВИБРАТОРОВ ПРИ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ*

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.sbras.ru

Александр Федорович Еманов

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

Александр Сергеевич Сальников

Сибирский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом сейсморазведки, тел. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Владимир Николаевич Кашун

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, главный инженер, тел. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

Илья Евгеньевич Романенко

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, старший научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (383)333-25-35, e-mail: romanenko.ilyuha@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, старший научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке Партнерского интеграционного проекта 54 "Развитие методов математического моделирования геофизических полей и экспериментальные исследования геодинамических процессов в сейсмоопасных и вулканических зонах".

Анастасия Евгеньевна Шенмайер

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: shen@gs.nsc.ru

Представлены результаты полевых экспериментов с группами мощных вибраторов при глубинных сейсмических исследованиях на опорных профилях на Востоке России. В результате исследований установлены оптимальные расстояния между двумя вибраторами в группе в 1–2 м. Выявлена значительная роль в повторных сеансах вибраторов и использовании разных дебалансов для разных вибраторов в группе для повышения разрешенности коррелограмм и увеличения отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: вибратор ЦВ-40, профили ГСЗ, группирование мощных вибраторов, коррелограммы, резонанс, дебаланс.

**ABOUT SOME PROCESSING METHODS FOR RAISE
OF EMANATION EFFICIENCY OF HIGH-POWER VIBRATIONS
GROUP AT DEEP SEISMIC RESEARCHES**

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Deputy Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Ph. D., Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Victor S. Seleznev

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Doctor of Science, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Alexander F. Emanov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Deputy Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Doctor of Science, Researcher, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Alexander S. Salnikov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Head of Seismic Prospecting Department, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Vladimir N. Kashun

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

Ilya E. Romanenko

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: romanenko.ilyuha@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Anastasia E. Shenmayer

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: shennastya@gs.nsc.ru

There are presented the results of field experiments with groups of high-power vibration sources at deep seismic researches on the profiles in the East of Russia. As a result of research there were determined optimum distances of 1-2 m between two vibration sources in the group. There was determined significant role of repeated vibrator sessions and use of different unbalanced masses for various vibration sources in the group for raise of correlogram resolution and raise of signal/noise ratio.

Key words: vibration source CV-40, DSS profiles, high-power vibration sources grouping, correlograms, resonance, unbalanced mass.

В последние годы при глубинных сейсмических исследованиях на опорных профилях на Востоке России наряду с использованием взрывных источников используются мощные передвижные вибраторы ЦВ-40 [1, 2]. Для повышения мощности излучения при полевых исследованиях в 2009–2013 гг. на профиле ЗДВ были начаты эксперименты по группированию мощных вибраторов [2]. Схема одного из экспериментов по определению максимальных расстояний разносов между вибраторами при группировании и результаты представлены на рис. 1. От центра длинной оси вибратора расставлялись регистрирующие датчики на удалениях от 3 до 18 м через один метр. Диапазоны излучения вибратора составляли 7.91–11.5 Гц для средних дебалансов 46.2 кг*м.

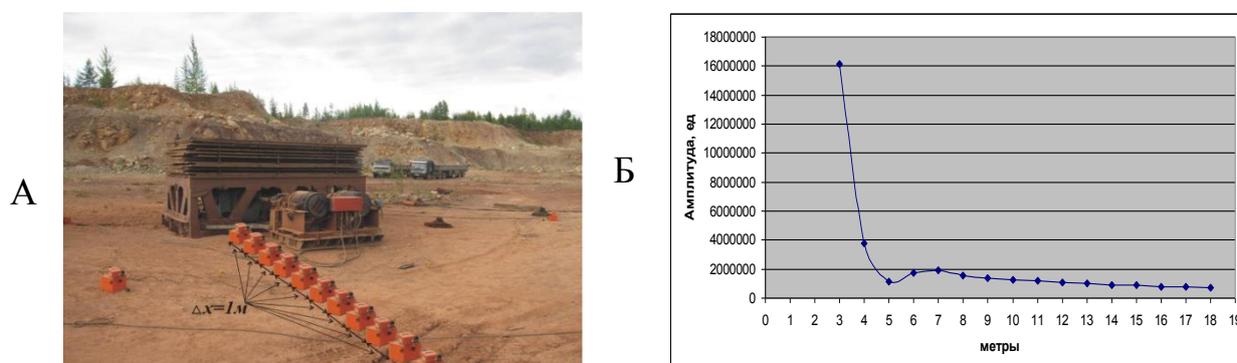


Рис. 1. Схема размещения регистрирующей аппаратуры в районе 40-тонного вибратора ЦВ-40 (А) и график амплитуд излучения в ближней зоне (приведенный от центра вибратора) (Б) соответственно

Из представленного рис. 1Б видно, что максимальные излучения от одиночного вибратора сохраняются примерно до удалений в 3 метра от центра вибратора; далее начинается резкий спад, затем некоторое возрастание и вновь спад. Результаты экспериментов коррелируют с результатами исследователей, измеряющих сейсмотермический эффект от работающего вибратора ЦВ-40 на Быстровском полигоне [3]. В этих исследованиях было установлено, что при

работе вибратора выделяется тепло, максимум которого происходит на полусфере радиусом от центра вибратора также около 3 м. Из результатов экспериментов следует, что для увеличения интенсивности излучения группы вибраторов расстояния между центрами вибраторов не должны превышать 4–6 м, соответственно между боками вибраторов – не более 2–4 м. В этом случае суммарная площадь синхронного излучения двух вибраторов, согласованных с грунтом, может достигать 80–90 кв. м. Соответственно, происходит увеличение суммарной мощности излучения и понижение центральной частоты эффективного спектра излучения. Материалы регистрации на профиле подтверждают вышесказанное. Как видно из рис. 2, качественные коррелограммы с записями опорных волн от границ в земной коре и верхней мантии получены только при регистрации на профиле группы из двух 40-тонных вибраторов с расстояниями в 1 м между боками вибраторов.

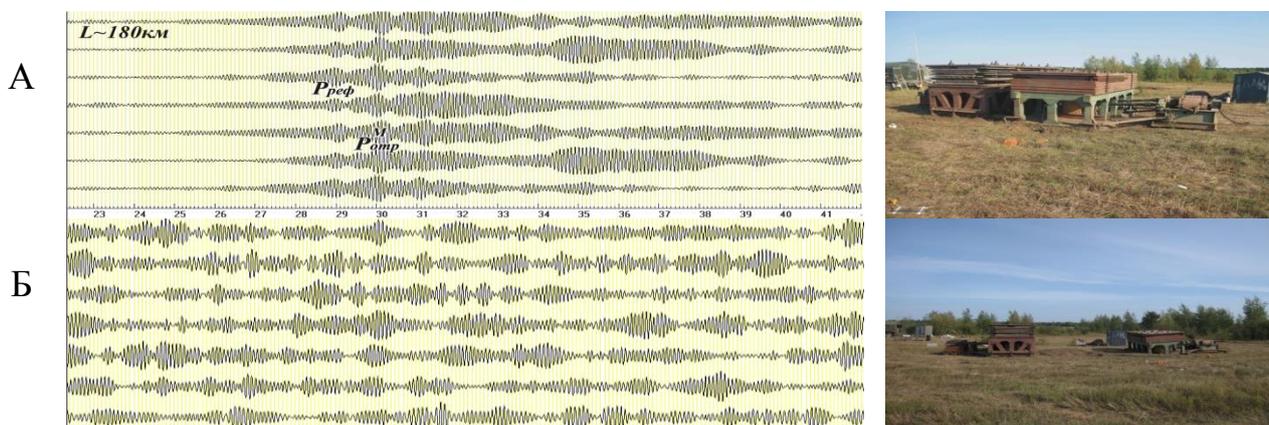


Рис. 2. Примеры коррелограмм на удалении ~180 км от группы из 2-х 40-тонных вибраторов с расстояниями между центрами в 3 м (вверху) и 8 м (внизу) соответственно

При экспериментальных исследованиях на профиле ЗДВ использовались два 40-тонных вибратора, различающихся весом на несколько тонн. По результатам экспериментов было установлено, что время наступления резонанса зависит как от характеристик грунта и условий вибратор/грунт, так и от конструкции вибраторов. От более тяжелого вибратора (более высокий на рис. 2, 3) отмечается менее сильный временной сдвиг при повторных сеансах, чем от легкого высокочастотного вибратора. Кроме того, при излучении двух близстоящих вибраторов на одних и тех же грунтах более тяжелый вибратор (вибратор 3 на рис. 3) имеет пониженный резонанс по сравнению с резонансом от более легкого вибратора (вибратор 2 на рис. 3). При совместном излучении в начальный период вибраторы работают не синхронно, что хорошо видно на поляризационных диаграммах датчиков с платформ вибраторов (рис. 3В). При достижении участка резонанса обоими вибраторами излучающие платформы вибраторов начинают работать синхронно (участок от 38 до 50 минут на рис. 3В); это же ка-

сается и колебаний грунта в районе вибраторов. При этом увеличивается в 1.2–2 раза амплитуда излучения по сравнению с работой единичных вибраторов. Это позволило в большинстве точек регистрации получать коррелограммы с более высоким соотношением сигнал/шум, чем от единичных вибраторов [1, 2].

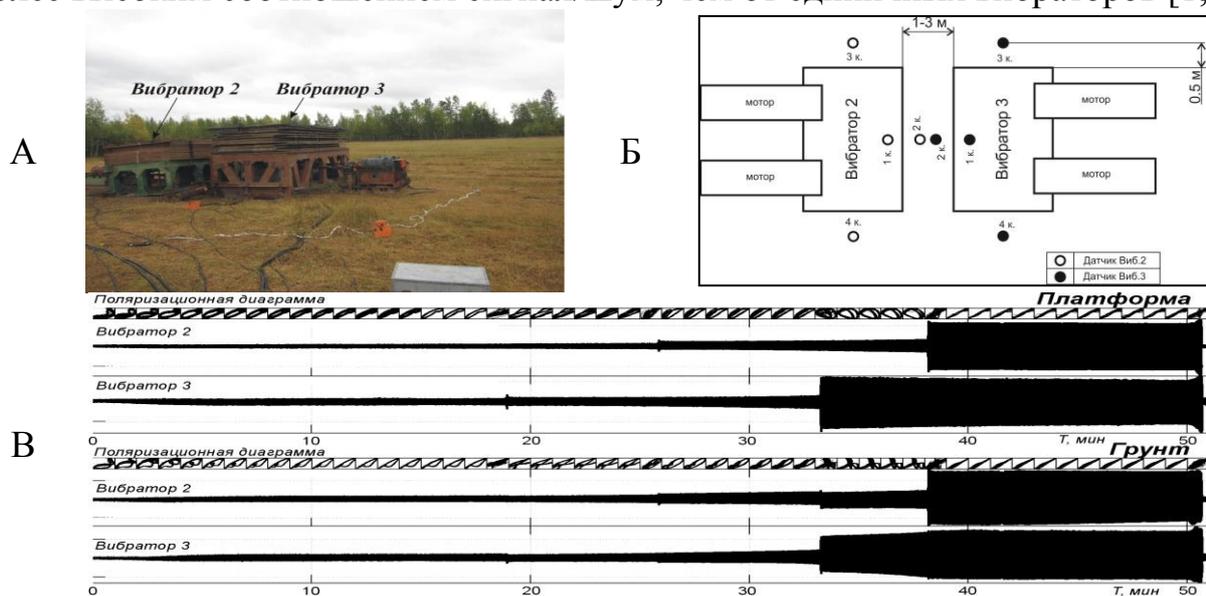


Рис. 3. Схема размещения группы вибраторов и регистрирующих датчиков в ближней зоне (1 – на платформе, 2–4 – у разных сторон вибраторов на глубинах около 1.5 м) (А, Б) и виброграммы, и поляризационные диаграммы колебаний платформы и грунта при работе двух вибраторов (В)

На ряде площадок профиля 3ДВ в высокогорных регионах с высокоскоростной верхней частью разреза не удавалось достичь согласованных на двух вибраторах резонансов при реализуемых диапазонах излучения 6–12 Гц, соответственно, было сложно получить качественный материал даже на небольших удалениях. В этих условиях применялся методический прием при группировании вибраторов, заключающийся в сближении резонансных частот двух вибраторов, где происходит максимальная отдача в грунт. Предполагалось, что при работе легкого вибратора на тяжелых дебалансах (56.8кг*м) произойдет смещение резонанса в область низких частот, а при работе более тяжелого вибратора на легких дебалансах (36.9кг*м) максимум резонанса наиболее сильно сдвинется в область высоких частот. Результаты экспериментов показали повышение интенсивности излучения и существенное улучшение качества коррелограмм от сеансов, когда устанавливались разные дебалансы на вибраторах.

Экспериментальными исследованиями на большом количестве площадок с группами вибрационных источников в пределах разнородных геологических зон установлено также, что повторные сеансы (без перерыва) в большинстве случаев приводят к смещению времени скачкообразного увеличения мощности излучения в сторону начала сеанса (низких частот), что можно трактовать как

изменение характеристик грунтов. Чем резонанс сеанса наступает раньше, тем коррелограммы в дальней зоне разрешеннее и с более высоким отношением сигнал/шум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

5. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Серезников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Востоке России // Проблемы информатики. - 2013. - № 3. - С. 30–41.

6. Соловьёв В.М., Романенко И.Е., Елагин С.А., Кашун В.Н. О некоторых приемах повышения качества вибрационных записей при работах ГСЗ на опорных профилях России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2012. - № 1. - С. 86–95.

7. Юшин В. И., Аюнов Д. Е., Дучков А. Д. Мониторинг изменения температуры под плитой действующего сейсмического вибратора. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 2. – С. 32–36.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников, В. Н. Кашун,
И. Е. Романенко, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, 2015

СИГНАЛЫ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Карина Владимировна Сухорукова

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

Виталий Сергеевич Аржанцев

Halliburton Worldwide Limited (Ирак), инженер по повышению нефтеотдачи, e-mail: Vitaly.Arzhantsev@halliburton.com

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Представлены результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования в наклонной скважине. Рассматривается геоэлектрическая модель, состоящая из горизонтальных пластов разной мощности, в том числе осложненных зонами проникновения. Расчет сигналов проводится с применением алгоритма, реализующего метод конечных разностей.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, БКЗ, кажущееся удельное электрическое сопротивление, численное моделирование, наклонная скважина

LATERAL LOGGING SOUNDING SIGNALS CALCULATED IN INCLINED WELLS

Carina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Vitaliy S. Arzhantsev

Halliburton Worldwide Limited (Basra, IRAQ), Stimulation Engineer (Frac/Acid/Coil Tubing), e-mail: Vitaly.Arzhantsev@halliburton.com

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentjeva Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We present the lateral logging sounding signals calculated for inclined wells. The model of horizontal layers is used. The layers have various thicknesses and invaded zones. The finite difference technique is used for signals simulating.

Key words: lateral logging sounding, RLL, apparent electrical resistivity, numerical simulation, inclined well.

Традиционно при численной интерпретации данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) базовой принимается цилиндрически слоистая модель с одной зоной проникновения, при этом учет влияния вмещающих пласт пород представляет довольно сложную задачу. В вертикальных скважинах задача интерпретации решается в последнее время с помощью численного моделирования сигналов в двумерной геоэлектрической модели, в том числе и с учетом электрической анизотропии отложений [1, 2]. Для наклонных скважин разработка алгоритмов расчета сигналов БКЗ потребовалась в связи с началом эксплуатации новой скважинной аппаратуры СКЛ [3], которая включает модуль БКЗ на жестком корпусе и используется для измерений в наклонных и горизонтальных стволах нефтегазовых скважин. Первые расчеты сигналов градиент-зондов в наклонной скважине проведены с помощью алгоритма численного моделирования методом конечных разностей [4], ранее проведено исследование влияния диаметра корпуса прибора [5].

Наклон скважины, особенно в разрезах с небольшой мощностью пластов, контрастных по значению удельного электрического сопротивления (УЭС), существенно влияет на форму сигналов зондов БКЗ [6]. Изменяется геометрия областей околоскважинного пространства, влияющих на сигналы. Появляется тонкая понижающая зона проникновения в условиях использования при бурении биополимерных растворов высокой минерализации. Поэтому необходим подробный анализ влияния наклона скважины на сигналы комплекса БКЗ в широком диапазоне параметров геоэлектрической модели. Полученные синтетические сигналы будут также полезны при визуальной интерпретации практических данных.

Результаты численного моделирования. Для анализа влияния зенитного угла наклона скважины сравним сигналы градиент-зондов, рассчитанные в вертикальной и наклонной скважинах (зенитный угол равен 0° и 85°), пересекающих нефтенасыщенный коллектор переменной мощности, расположенный в глинистых вмещающих пластах.

Геоэлектрическая модель. Мощность коллектора менялась от 1 до 8 м, его УЭС 10 Ом·м, УЭС вмещающих пород – 4 Ом·м. В случае минерализованного бурового раствора ($\rho_{\text{скв}} = 0.05\text{--}0.1$ Ом·м) формируется понижающая зона проникновения, в случае глинистого раствора ($\rho_{\text{скв}} = 2$ Ом·м) наблюдается проникновение повышающее и более глубокое проникновение. Поэтому для расчетов были взяты средние параметры зоны проникновения: если раствор проводящий, УЭС зоны проникновения $\rho_{\text{зп}} = 0.5$ Ом·м, толщина $h_{\text{зп}} = 0.15$ м, если раствор глинистый, $\rho_{\text{зп}} = 20$ Ом·м, $h_{\text{зп}} = 0.4$ м. Рассчитаны сигналы для моделей, состоящих из 2, 3 и 9 пластов с проникновением и без него, для зенитных углов наклона скважины $0, 45, 60, 80$ и 85° . Диаметр скважины равен 0.062 м при минерализованном буровом растворе и 0.216 м – при глинистом.

Приведем пример синтетических данных для одной из трехслойных моделей. Для удобства сравнения на рисунках сигналы в наклонной скважине спроектированы на вертикальную ось.

Сравним сигналы БКЗ в модели с вертикальной скважиной при $\rho_{\text{СКВ}}=0.05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 1). Для наглядности на рисунке черной линией нанесены значения УЭС неизменной проникновением части пласта. На диаграммах кажущихся сопротивлений зондов (кроме А0.2М0.1N) в области кровли и подошвы коллектора метровой мощности наблюдаются небольшие максимумы над кровлей и под подошвой. На интервале коллектора значения для всех зондов много меньше его сопротивления. Даже длинные зонды (А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, в том числе и обращенный N2.0М0.5A) показывают значения не выше 4.5 Ом·м при УЭС неизменной части пласта, равном 10 Ом·м. Такой эффект на сигнал оказывают проводящие раствор и зона проникновения.

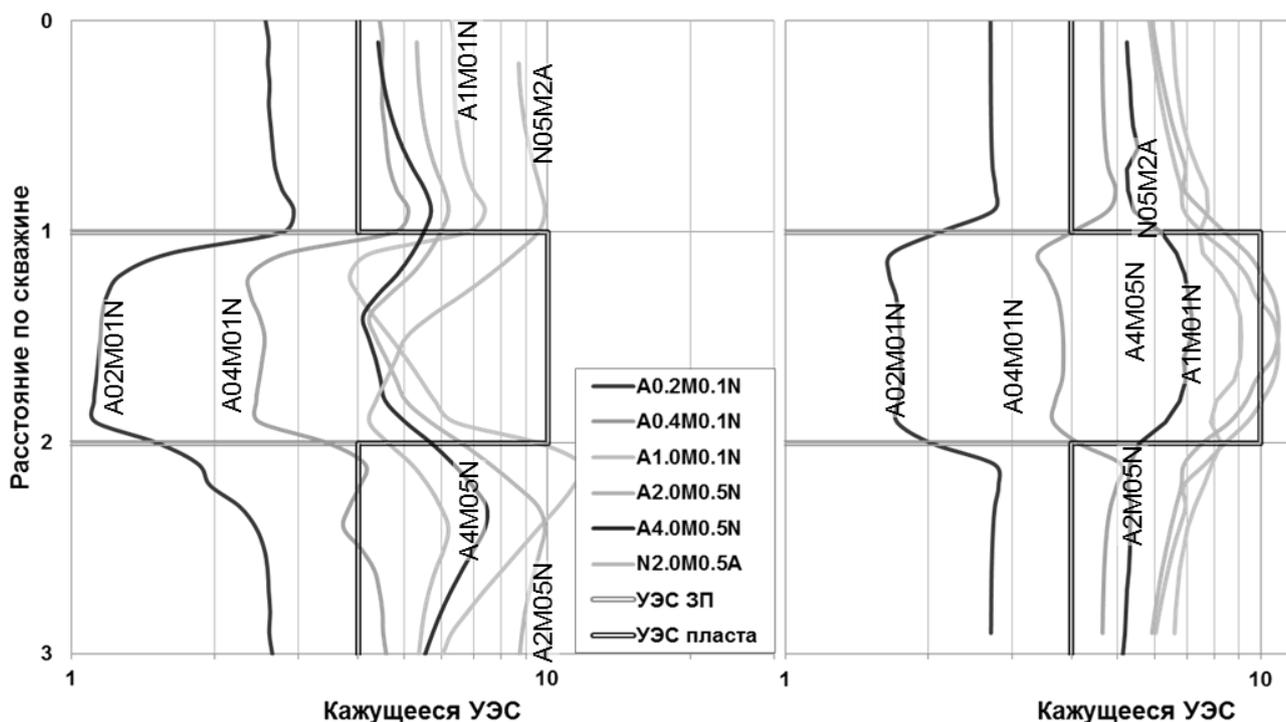


Рис. 1. Диаграммы синтетических сигналов БКЗ в вертикальной (слева) и наклонной (справа) скважинах при низком УЭС раствора и понижающей зоне проникновения на интервале коллектора ($\rho_{3\Pi}=0.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_{3\Pi}=0.15 \text{ м}$)

В наклонной скважине подобный эффект отсутствует ввиду большей длины интервала скважины между границами коллектора (около 11 м). По форме сигналов коротких зондов (А0.2М0.1N и А0.4М0.1N) на интервале пласта определяется наличие узкой понижающей зоны проникновения. Значения сигналов остальных зондов близки к УЭС неизменной части коллектора за исключением сигнала самого длинного зонда А4.0М0.5N, значения которого занижаются в результате влияния низкоомных вмещающих.

Интересной особенностью сигналов в сильнонаклонных скважинах является отсутствие экстремумов на границах, характерных для диаграмм в вертикальных скважинах, и отсутствие влияния на форму диаграмм несимметрии

зондов, приводящего к затруднениям визуального анализа при небольших зенитных углах.

С помощью алгоритма численного моделирования данных бокового каротажного зондирования на базе 3D-модели, реализующего метод конечных элементов, рассчитаны сигналы в геоэлектрических моделях разной сложности для разных зенитных углов их пересечения скважиной. К основным особенностям сигналов в сильнонаклонных скважинах можно отнести симметризацию диаграмм и сглаживание экстремумов на границах, характерных для их вертикального пересечения. За счет наклона скважины и удлинения интервала нахождения в коллекторе появляется возможность оценки УЭС маломощного коллектора при низком значении УЭС раствора в скважине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухорукова К. В., Нечаев О. В. Сигналы бокового каротажного зондирования в анизотропных отложениях по результатам численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 102–107.

2. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Глущенко М.Н. Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в анизотропных средах по результатам численного моделирования // VI Всероссийская Школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013: материалы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://emf.ru/ems2013/section4/Сухорукова_Нечаев_Глущенко.pdf

3. Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Сухорукова К.В., Петров А.Н., Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. - 2010. - № 2. - С. 16–19.

4. Labutin, I.B., Surodina, I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in the Conjugate Gradient Method // Reliable Computing. - 2013. - V. 19. - P. 120–126. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/volume-19/reliable-computing-19-pp-120-126.pdf>

5. Сухорукова К.В., Аржанцев В.С., Суродина И.В., Нечаев О.В.. Результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования автономной аппаратуры СКЛ // Каротажник. - 2015. - № 11 (245). - С. 51–58.

6. Eпов M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A. and 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, Paper 162034-MS. - 18 p. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.onepetro.org>

© К. В. Сухорукова, В. С. Аржанцев, И. В. Суродина, 2015

ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ СИГНАЛОВ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ МОДЕЛИ

Карина Владимировна Сухорукова

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

Олег Валентинович Нечаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

Алексей Михайлович Петров

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент геолого-геофизического факультета, e-mail: alex_1993_08@mail.ru

Представлен алгоритм численной инверсии сигналов бокового каротажного зондирования на базе 2D анизотропной модели. Расчет сигналов проводится методом конечных элементов, для инверсии используется метод покоординатного спуска. Приводятся результаты применения алгоритма к измеренным на высокоомном интервале баженовской свиты сигналам.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, БКЗ, макроанизотропия удельного электрического сопротивления, численная инверсия.

NUMERICAL INVERSION OF LATERAL LOGGING SOUNDING SIGNALS FOR 2D ANISOTROPIC MODEL

Carina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Oleg V. Nechaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

Aleksey M. Petrov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., student of Geology and Geophysics Department, e-mail: alex_1993_08@mail.ru

We present the inversion algorithm of signals of lateral logging sounding (in gradient-sonde modification). It is developed for 2D anisotropic models. The finite elements technique is used for signals modelling. The alternating-variable descent method is realized for inversion. Results of application of algorithm are given to the signals measured in high-resistivity Bazhenov shales.

Key words: lateral logging sounding, RLL, electrical macroanisotropy, numerical inversion.

Как известно, макроанизотропия физических свойств характерна для геологических пород осадочного происхождения. Макроанизотропия терригенных отложений Западной Сибири проявляется в разнице значений удельного электрического сопротивления (УЭС) в практически горизонтальной плоскости напластований (ρ_h) и в вертикальном направлении (ρ_v). При исследовании таких отложений методами электротометрии в вертикальных скважинах чувствительностью к анизотропии обладают градиент-зонды, используемые в методе бокового каротажного зондирования (БКЗ), что было показано на результатах моделирования и интерпретации сигналов в одномерной цилиндрически-слоистой модели [1, 2]. Однако в разрезах с небольшой мощностью пластов применение одномерной модели ограничивается невозможностью использования набора зондов необходимых длин. Повышение достоверности определения УЭС и анизотропии в этом случае возможно на основе применения двумерных геоэлектрических моделей.

Численное моделирование и решение обратной задачи

При численном моделировании сигналов зондов БКЗ для определения кажущегося сопротивления необходимо рассчитать разность потенциалов на двух измерительных электродах. Распределение электрического потенциала φ в области моделирования описывается следующей краевой задачей:

$$-\operatorname{div} \sigma \operatorname{grad} \varphi = 0,$$

$$\varphi|_{\Gamma_0} = 0,$$

$$\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0,$$

$$\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1^A} = j_0^A,$$

где φ – потенциал напряженности электрического поля, σ – удельная электрическая проводимость, j_0^A – плотность тока, стекающего через токовый электрод A , Γ_0 – внешняя граница области, на которой электрический потенциал считается близким к нулю, Γ_1 – поверхность непроводящего корпуса зонда, Γ_1^A – поверхность токового электрода. В дальнейшем полагается, что околоскважинное пространство обладает анизотропией и его удельная электрическая проводимость является тензором, зависящим от пространственных координат.

Для дискретизации введенной краевой задачи используется метод конечных элементов [3]. Решение результирующей системы линейных алгебраических уравнений осуществляется при помощи разложения Холецкого.

Обратная задача идентификации параметров модели околоскважинного пространства по данным БКЗ формулируется как задача минимизации следующей функции:

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\rho_i - \rho_i^a(\vec{x})|}{\rho_i},$$

где \vec{x} – вектор параметров, задающих физические и геометрические свойства модели околоскважинной среды, n – количество измерений, используемых при каротаже (количество зондов, умноженное на количество точек измерения), ρ_i – измеренное кажущееся сопротивление, $\rho_i^a(\vec{x})$ – кажущееся сопротивление, рассчитанное для модели, заданной вектором \vec{x} размерностью m .

То есть в качестве такой функции используется расстояние между двумя векторами. Первый вектор ρ состоит из значений кажущихся сопротивлений, полученных в процессе каротажа. Второй вектор ρ^a состоит из значений кажущихся сопротивлений, являющихся результатом математического моделирования в среде, параметры которой будут аргументами обратной задачи.

Для минимизации функции используется метод координатного спуска, дополненного следующим шагом – минимизацией функции вдоль направления, соединяющего начальную и конечную точки, одного цикла координатного спуска. Каждая итерация алгоритма состоит из двух частей: минимизации вдоль осей координат и минимизации вдоль направления $(\vec{x}^* - \vec{z}^*)$, определяемого при помощи начальной и конечной точек покоординатного спуска. Последнее применяется с целью избежать зигзагообразной траектории, присущей методу покоординатного спуска, и, следовательно, повысить скорость сходимости всего алгоритма. Такой подход был применен к методу градиентного спуска в алгоритме PARTAN [4].

Методика и пример численной интерпретации

Успешное применение программной реализации алгоритма инверсии (программный пакет AlondraWL) к практическим данным БКЗ осуществляется с помощью некоторых методических приёмов.

Стартовая модель. В автоматизированной системе EMF Pro проводится первичная (грубая) разбивка на слои (по комплексу методов ГИС) интересующего интервала и одномерная инверсия на базе цилиндрически-слоистой изотропной модели измеренных сигналов БКЗ с учетом данных резистивиметрии. Полученная модель используется как первое приближение для радиальной и нормальной компонент УЭС. Несколько раз проводится численное моделирование сигналов БКЗ, по расхождению рассчитанных и измеренных сигналов визуально оценивается необходимое изменение значений УЭС и положения границ и проводится корректировка стартовой модели. При необходимости добавляются или удаляются пласты.

Инверсия. Запускается алгоритм инверсии пакета AlondraWL с коэффициентом точности расчета 1.

Анализ результата инверсии, модификация модели. Производится визуальное сравнение расчетных и теоретических диаграмм. В случае сильного расхождения формы диаграмм полученная в результате инверсии модель импортируется в пакет EMF Pro, и производится более подробная разбивка интервала на глубинах, где диаграммы измеренных данных более изрезаны по сравнению с расчетными сигналами. При разбиении пласта на большее количество всем пластам присваиваются значения УЭС исходного пласта. Полученная модель с измененными и добавленными границами используется как стартовая для нового запуска алгоритма инверсии.

После достижения алгоритмом критерия выхода, коэффициент точности расчета меняется на 2 и делается еще 100–300 итераций для уточнения результата. В случае получения хорошего совпадения диаграмм измеренных и рассчитанных сигналов процесс численной интерпретации считается завершенным.

Набор и последовательность указанных действий, составляющих численную интерпретацию, являются приблизительными и определяются интерпретатором. В зависимости от сложности исследуемого геологического разреза некоторые пункты могут оказаться не востребуемыми. На каждом этапе интерпретации строится черновая графика для визуальной оценки сходимости, в случае большого значения функции невязки меняется стартовая модель вплоть до полностью ручного подбора "грубой" модели со значением минимизируемой функции 0.15–0.2.

На рисунке приведен результат численной интерпретации данных БКЗ, измеренных на интервале высокоомной баженовской свиты, полученный с помощью автоматизированного алгоритма инверсии. Практические данные измерены аппаратурным комплексом СКЛ, что гарантирует их высокую точность. Буровой раствор глинистый (УЭС 1.5 Ом·м), диаметр скважины – 0.216 м. Поскольку породы баженовской свиты являются непроницаемыми и гидрофобными, их геоэлектрическая модель не включает зон проникновения.

В нижней части рисунка приведены диаграммы измеренных сигналов и сигналов, рассчитанных в подобранной геоэлектрической модели. Измерения показаны более тонкими линиями. Разработанный алгоритм и методика его применения обеспечивают подбор сигналов с высокой точностью при большом количестве пластов в модели свиты.

Разработан алгоритм численной инверсии сигналов бокового каротажного зондирования на базе 2D анизотропной модели, реализующий моделирование методом конечных элементов и инверсию методом покоординатного спуска. Методика интерпретации с применением алгоритма инверсии заключается в построении стартовой модели и многократном запуске алгоритма инверсии с ручной коррекцией количества пластов в случае необходимости. Получены результаты применения алгоритма к измеренным на высокоомном интервале баженовской свиты сигналам.

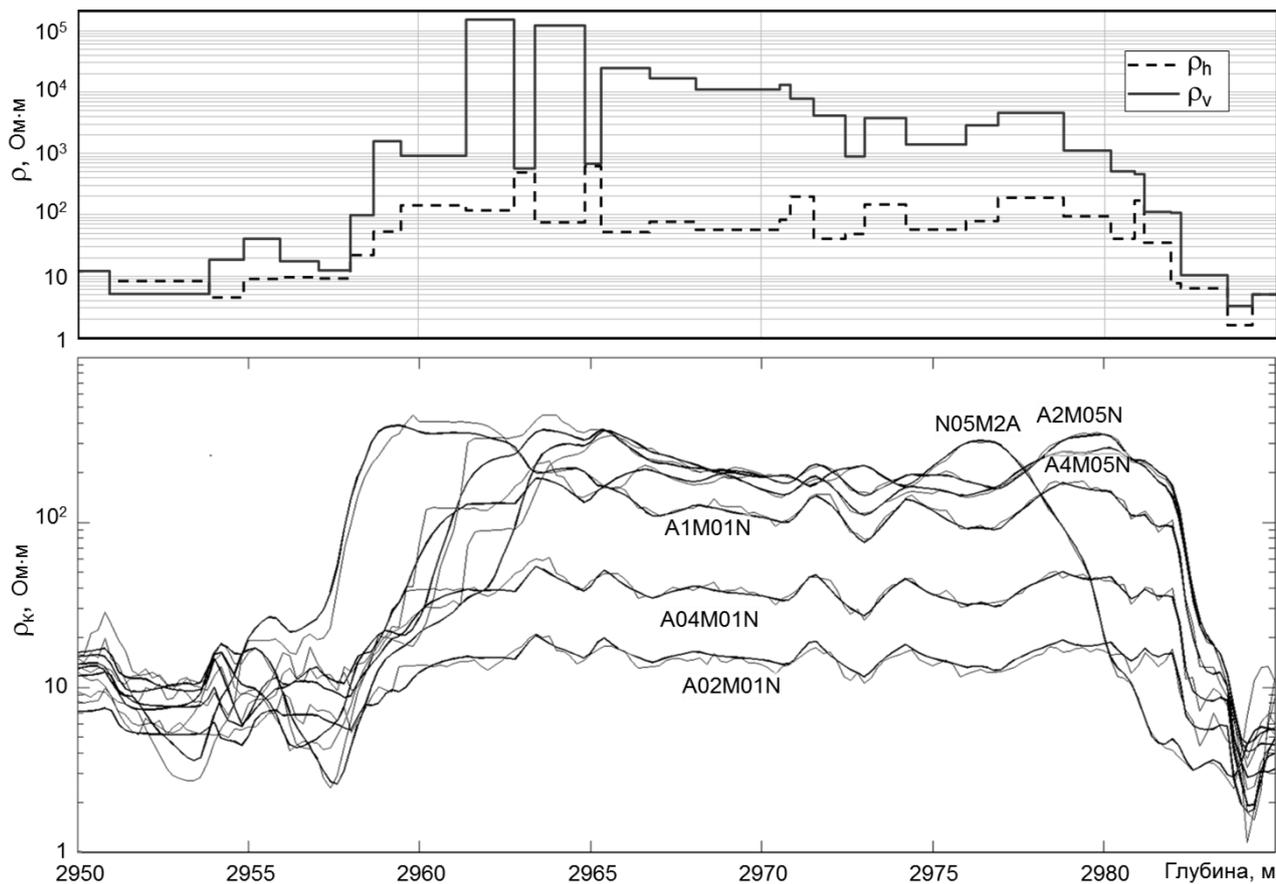


Рис. 1. Результат численной интерпретации: подобранные значения горизонтального и вертикального сопротивлений и измеренные и рассчитанные сигналы БКЗ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухорукова К. В., Нечаев О. В. Сигналы бокового каротажного зондирования в анизотропных отложениях по результатам численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 102–107.
2. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Глущенко М.Н. Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в анизотропных средах по результатам численного моделирования // VI Всероссийская Школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013: материалы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://emf.ru/ems2013/section4/Сухорукова_Нечаев_Глущенко.pdf
3. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 288 с.
4. Shah B.V, Buehler R.J, and Kempthorne O. Some algorithms for minimizing a function of several variables // Journal of SIAM. - 1964. - V. 12. - P. 74–92.

© К. В. Сухорукова, О. В. Нечаев, А. М. Петров, 2015

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЕ (КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ И ГРАВИМЕТРИЯ)*

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Евгений Николаевич Калиш

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-96, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Максим Георгиевич Валитов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией

Юрий Фёдорович Стусь

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Руслан Григорьевич Кулинич

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Павел Юрьевич Горнов

Институт тектоники и геофизики им. Косыгина ДВО РАН, Россия, г. Хабаровск, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, timofeevav@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

* Работа была выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 76, проекта Президиума РАН № 4.1 и Программы РАН ОНЗ 6–2.

Исследования методами космической геодезии (GPS) и гравиметрии на Дальнем Востоке России (в Приморье, Хабаровском крае и на Сахалине) активно развиваются в последнее десятилетие. Наши GPS-измерения проводились по профилям, расположенным на севере Приморья и в Хабаровском крае в период с 2003 г. по 2014 г. Эти данные были дополнены результатами, полученными в институтах ДВО РАН. Комплексные гравиметрические исследований проводились в 2010–2014 гг. на полигоне «мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН. В измерениях использованы относительные и абсолютные гравиметры. Модели приливной деформации для региона анализируются по данным измерений. Измерения методом GPS и абсолютной гравиметрии позволили определить и проанализировать величину косейсмических смещений в дальней зоне Японского землетрясения 11.03.2011 ($M = 9$).

Ключевые слова: относительные и абсолютные гравиметры, приливные модели Земли, методы космической геодезии, косейсмические эффекты в дальней зоне.

COSEISMIC EFFECT AT CONTINENTAL BORDERLANDS (SPACE GEODESY AND GRAVITY MEASUREMENT)

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Chief of the Laboratory, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Eugenii N. Kalish

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)333-25-96, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Maxsim G. Valitov

V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Russia, Vladivostok, Ph. D., Chief of the Laboratory

Yurii F. Stus

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker

Ruslan G. Kulinich

V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Russia, Vladivostok, Doctor of Science, Senior Scientific Worker

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Pavel Yu. Gornov

ITG FEB RAS, Ph. D., Senior Scientific Worker, Russia, Khabarovsk

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Scientific Worker, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Igor S. Sizikov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

We used GPS method for navigation measurement at Far East of Russia from 2003 to 2014. Gravity observation was developed at the points at Shults cape. Observation started in 2010 year. We used absolute gravimeter and relative gravimeter for measurements. Different tidal models were examined by measurements. Space geodesy and gravity methods were used for the study of coseismic effect at the far zone of Japan earthquake 11.03.2011 ($M = 9$).

Key words: absolute and relative gravimeters, Earth tidal model, space geodesy method, coseismic effect at the far zone.

Методы космической геодезии и гравиметрии активно применяются при исследованиях на Дальнем Востоке России (в Приморье, Хабаровском крае и на Сахалине). В основе комплексирования методов лежит появившаяся возможность равноточности измерений. Микрогальная гравиметрия соответствует миллиметровой точности GPS-измерений. Основная цель исследований направлена на изучение деформаций Земли, вызванных приливными и тектоническими силами, порождающими временные вариации смещений и нерегулярные изменения силы тяжести в условиях окраины континента. Мощная сейсмическая активность региона позволяет получить значимые косейсмические эффекты даже на расстояниях в сотни километров от эпицентра.

В нашей работе представлены результаты измерений в дальней зоне Японского землетрясения (Tohoku-Oki) 11 марта 2011 года ($M_w = 9.0$). Наши GPS измерения проводились по профилям, расположенным на севере Приморья и в Хабаровском крае. Комплексные гравиметрические исследований проводились в 2010–2014 гг. на ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». В измерениях использованы относительные и абсолютные гравиметры микрогального уровня. Приливные вариации, зарегистрированные относительным гравиметром, были проанализированы по суточным и полусуточным волнам (O_1 и M_2). В измерениях использованы два типа приливных цифровых гравиметров. Анализировались девять приливных моделей океана: GSR3, GSR4, FES95, FES02, FES04, GOT00, NAO99, ORI96 и TPX06. Теоретическая модель TPX06 для океана и модель DDW99 для Земли были выбраны в результате анализа экспериментальных данных. Эти модели использованы в дальнейшем для определения поправок в результаты абсолютных гравиметрических измерений на мысе Шульца. Пример анализа результатов приведен в табл. 1. Результаты приливного анализа (табл. 2), в виде приливных поправок, как и другие обязательные поправки, использованы при обработке данных абсолютного баллистического лазерного гравиметра ГАБЛ (рис. 1).

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных с помощью гравиметра SCINTREX CG5 с моделью (статическая + динамическая части)

Волна	Модель DDW99 (не гидрост.) + 6 океан. моделей		SCINTREX CG-5 40301 (2010/04-2010/07) 87 дней		Сравнение	
	δ_0	$\alpha_0(^{\circ})$	δ_1	$\alpha_1(^{\circ})$	δ_1/δ_0	$\alpha_1(^{\circ})-\alpha_0(^{\circ})$
O1	1.17615	+0.416	1.1823	+0.157	1.0052	0.259
			± 0.0052	± 0.029		
M2	1.17494	+0.496	1.1687	+0.474	0.9947	0.022
			± 0.0041	± 0.023		
M2/O1	0.9990		0.9885			

Таблица 2

Результаты по гравиметру g-Phone 111 и модель (654 дня, 06/2012–04/2014)

	Амплитуда	δ -фактор	Модель	Фазовый сдвиг	Модель
O1	349.922	1.1630 ± 0.0006	1.17615	$+0.12^{\circ} \pm 0.03^{\circ}$	$+0.416^{\circ}$
M2	458.047	1.1663 ± 0.0004	1.17494	$+1.01^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$	$+0.496^{\circ}$

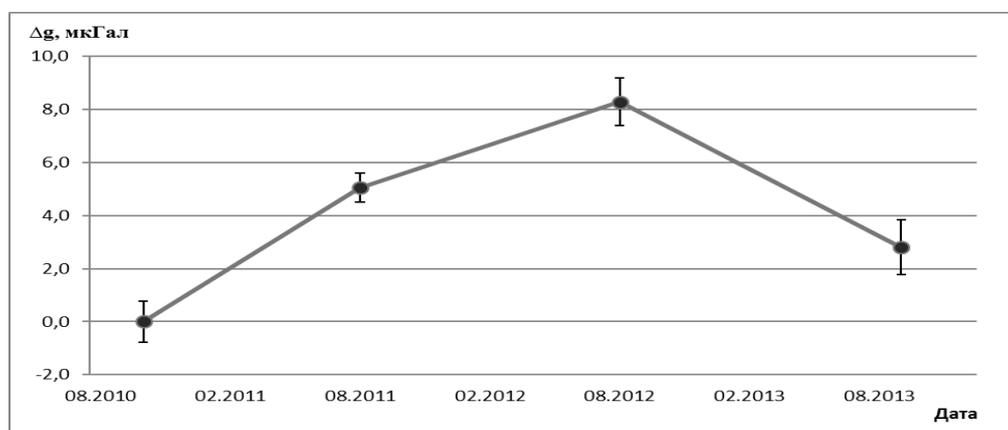


Рис. 1. Данные измерений абсолютным гравиметром ГАБЛ с 2010 года по 2013 год (переменная часть в микрогалах) на мысе Шульца

В результате измерений гравиметром ГАБЛ за период 2010, 2011, 2012 и 2013 годы установлено, что в течение первого года абсолютное значение g на пункте возросло на 5.0 мкГал. При этом среднеквадратическая погрешность определения g не превышала 1–2 мкГал. Измерения методом космической геодезии позволили определить величину косейсмических смещений в дальней

зоне. Пример скачка смещений на базовом пункте Змейка (ZMEY, 60 км на ЮВ от г. Хабаровска) приведен на рис. 2. Скачок горизонтальных смещений в зависимости от расстояния до эпицентра получен на уровне от 40 до 10 мм (рис. 3). Известна связь гравитационных вариаций с вертикальными смещениями:

$$\Delta g(t) = \gamma \cdot \Delta Z(t) + \xi,$$

где γ – вертикальный градиент $-3,08 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$; $\Delta Z(t)$ – изменения высоты, ξ – ошибка измерений.

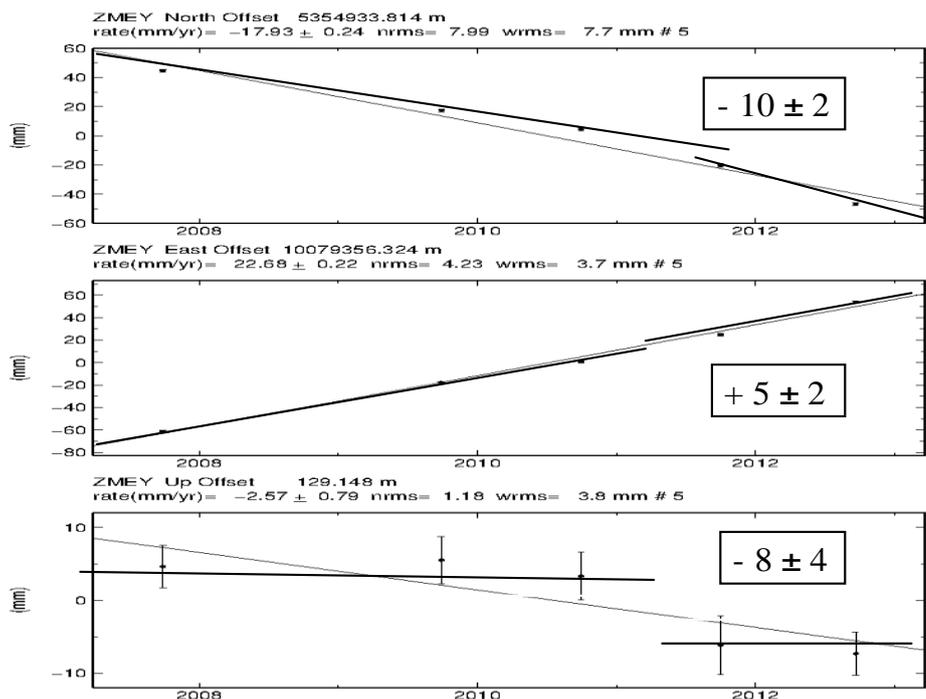


Рис. 2. Косейсмический скачок смещений на пункте ZMEY (сверху вниз: N, E, V)

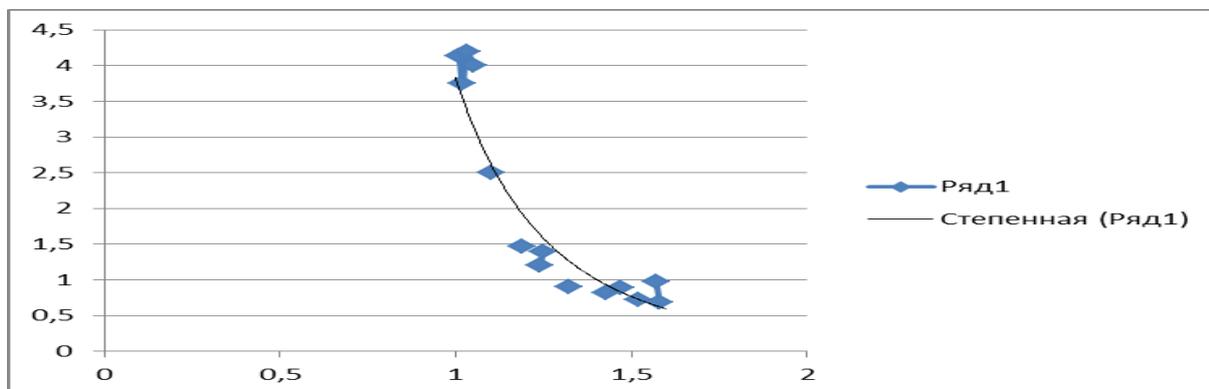


Рис. 3. Зависимость косейсмического горизонтального смещения (вертикальная ось в см) от расстояния до эпицентра в тысячах километрах (горизонтальная ось). Экспериментальные данные и квадратичная кривая

Косейсмический эффект при землетрясении 2011 года в изменениях силы тяжести соответствует опусканию на 15 мм. Севернее, на пункте ZMEY, зарегистрировано опускание 8 мм (рис. 4, вертикальные столбики). Чем вызван эффект, опусканием плиты или её деформированием? Для оценки вариации силы тяжести используем соотношение для бесконечного горизонтального слоя: $\Delta g = +2\pi k \rho \epsilon_{vol} H$, где k – константа, ρ – плотность, ϵ_{vol} – изменение объёмной деформации, H – мощность земной коры.

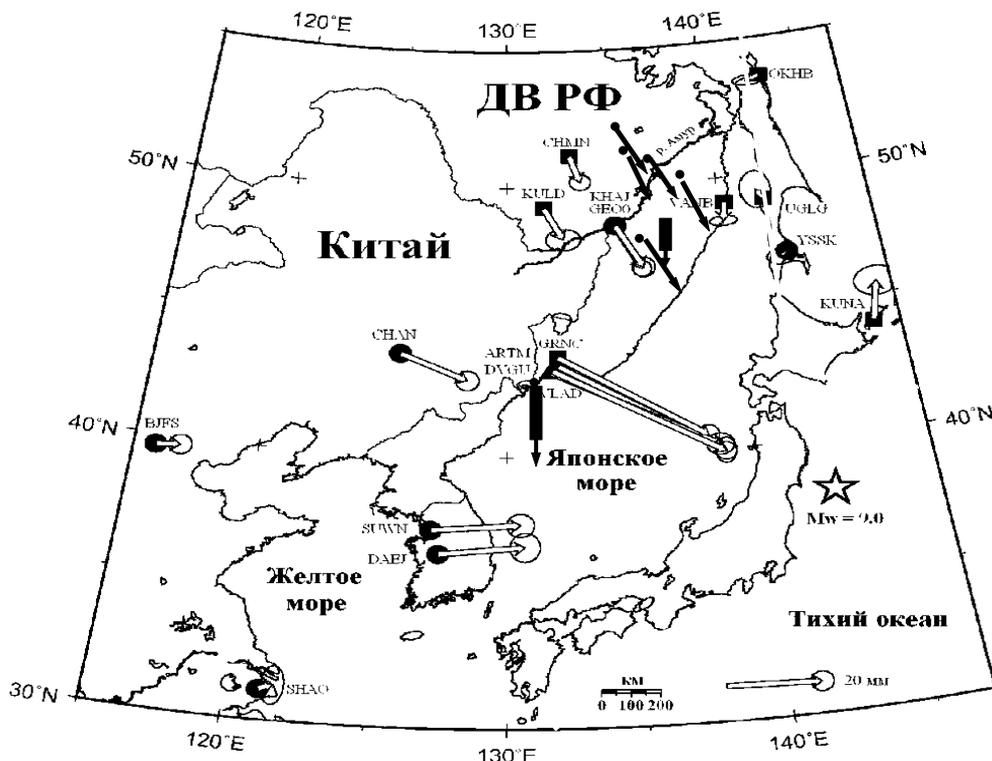


Рис. 4. Косейсмические смещения в дальней зоне в эпоху Японского землетрясения 2011 года. Стрелки – горизонтальные смещения (темные наши определения по северному профилю, пункт DUKI самый северный). Вертикальные стрелки (нижняя – мыс Шульца, верхняя короткая пункт ZMEY – опускания пунктов

Определим региональную косейсмическую деформацию для Приморья. Имеем оценку эффекта: $0.8 \cdot 10^{-8}$ для линии Восток-Запад: KULD-VANB (рис. 4). Для ортогональной линии Север-Юг: DUKI-ARTM: $1.7 \cdot 10^{-8}$ и для объёмной деформации $+1.7 \cdot 10^{-8}$. Гравитационный эффект при толщине литосферы (50 км, 100 км и 150 км) соответственно составит -0.1 микрогал, -0.2 микрогал и -0,3 микрогал (при $\rho = 3.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Таким образом, эффект деформирования незначителен, а увеличение силы тяжести свидетельствует об опускании плиты.

В целом в дальней зоне наряду со значительной горизонтальной компонентой выделяется и вертикальная составляющая, вызванная косейсмическим опусканием земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Охзоно Мако. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. и их влияние на результаты GNSS наблюдений // Геодезия и картография. - 2011. - № 8. - С. 35–43.

2. Timofeev V., Kulinich R., Valitov M., Stus Y., Kalish E., Ducarme B., Gornov P., Ardyukov D., Sizikov I., Timofeev A., G. Gil'manova, T. Kolpashikova and Z. Proshkina. Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods // International Journal of Geosciences. - 2013. - V. 4. - P. 362–370.

© В. Ю. Тимофеев, Е. Н. Калиш, М. Г. Валитов, Ю. Ф. Стусь, Р. Г. Кулинич, Д. Г. Ардюков, П. Ю. Горнов, А. В. Тимофеев, Д. А. Носов, И. С. Сизиков, 2015

ВАРИАЦИИ ПРИЛИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ*

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Екатерина Ивановна Грибанова

Сибирский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13-3, научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, timofeevav@ipgg.sbras.ru

Изучение современных смещений и деформаций земной коры необходимы для решения различных задач геофизики в широком пространственном и временном спектре. Измерения деформаций проводятся различными методами в штольнях и скважинах. В работе представлены результаты измерений на комплексной станции Талая (Байкальский регион). Вариации приливных параметров позволяют оценивать параметры зоны трещиноватости и провести сравнение с уровнем сейсмической активности региона.

Ключевые слова: модель приливной деформации Земли, лазерный деформограф, измерения в штольне и в скважине, землетрясения в Байкальском регионе.

VARIATION OF TIDAL PARAMETERS AND EARTHQUAKES

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Chief of the Laboratory, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Ekaterina I. Gribanova

Siberian Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 13-3 Lavrentieva Prospect, Scientific Worker

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

* Работа была выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 76, проекта Президиума РАН № 4.1 и Программы РАН ОНЗ 6-2.

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Scientific Worker, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Current study of crust displacement and strain are impotent for geophysics tasks in time and in space. Different methods were used for deformation's measurements into underground gallery and into key-hole. Experimental measurement results at Talaya station (Baikal region) were presented. Variation of tidal parameters allowed us estimate of cracking zone and of regional seismic activity.

Key words: Tidal model of the Earth; laser extensometer; measurements into underground gallery and into key-hole; earthquakes at Baikal region.

Приливные деформации Земли охватывают всю планету от её центра до поверхности, имеют амплитуду порядка единиц 10^{-8} , а приливная сила точно рассчитывается [1, 2]. Экспериментальный выбор приливных моделей Земли проведен с использованием данных, полученных с помощью цифровых приливных гравиметров [3, 4]. Результаты измерений приливных деформаций более подвержены локальным поверхностным воздействиям. Задачи нашего исследования включали: приливный анализ данных лазерного деформографа, полученных в 90-метровой штольне; выделение многолетнего тренда и аномальных особенностей, связанных с землетрясениями; сравнение результатов приливного анализа, полученных в штольне и в скважине; выбор моделей приливных эффектов, оценка модели для зоны трещиноватости.

Рассмотрим результаты, полученные на пункте комплексных наблюдений Талая (Байкальская рифтовая система) (рис. 1).

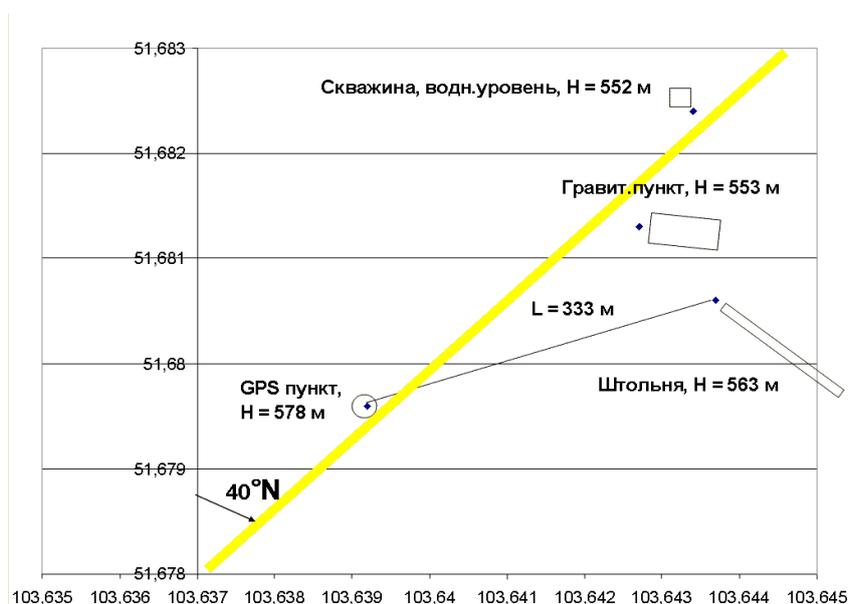


Рис. 1. Комплексная станция Талая, координаты (широта и долгота в градусах). Показано положение пунктов измерений: скважина, штольня, гравиметрический пункт и пункт космической геодезии. Сплошной линией показана приблизительная ориентация горной долины

Он находится на северной границе юго-западной части БРС и Сибирской платформы. Границей является глубинный разлом, пересекающий литосферу (мощность земной коры 45 км). По результатам геологических и сейсмологических исследований регион отличается сдвиговым левосторонним движением по Главному Саянскому разлому, расположенному в 3–5 км к северу от станции. Ориентация долины, на бортах которой расположены пункты измерений с. Талая, показана на рис. 1.

Высокоточные измерения различных видов деформаций и наклонов в БРС начаты на сейсмостанции Талая (51.68°N, 103.65°E) весной 1985 года. Положение станции определяет сложный характер локального деформирования. Для исключения поверхностных эффектов измерения проводятся в штольнях на глубине более 50 м. Штольня станции Талая имеет длину 90 м и шесть поперечных штреков длиной до 25 м. Здесь проводятся измерения в двух азимутах с помощью лазерного деформографа. Наличие современных приливных моделей позволяет проводить исследования приливных деформаций, используя датчики, установленные в скважинах или штольнях. Экспериментально установлено, что отражение эффектов полости и локальных особенностей земной коры (линейных зон трещиноватости, зон глубинных разломов) в приливных деформациях для станций Талая достигают 10 % в амплитуде и 9° в фазовом сдвиге. Измерять вариации во времени позволяет лазерный приливный деформограф (база 25 м), метрологические характеристики которого стабильны во времени, т.к. они привязаны к фазе и длине волны лазера. Ещё одним методом приливных исследований являются измерения в скважинах. Они проясняют природу вариаций. Рассмотрим отражение локальных эффектов в приливных вариациях водного уровня в скважине на станции Талая. Цифровая запись уровня воды проводится на скважине с 2007 года практически круглый год за исключением нескольких зимних месяцев (перемерзание воды в скважине). Здесь используется ультразвуковой датчик чувствительностью до 0.1 мм. Приливные вариации для скважины №1608 на сейсмостанции Талая, пробуренной в монолитных мраморах, достигают 2 мм. Наличие приливных вариаций малой амплитуды свидетельствует о том, что в данном случае можно использовать модель «ограниченная полость» [1]. Изменение уровня для этой модели записывается как:

$$dH = dV / [\pi \cdot r_w^2 + (\rho \cdot g \cdot V / K_w)], \quad (1)$$

если в знаменателе выражение, включающее радиус, много меньше выражения, включающего объём (в нашем случае это объём трещин в породе), получаем:

$$dH = \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g, \quad (2)$$

где $\Delta = dV/V$ – дилатация, r_w – радиус скважины, ρ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, V – объём трещин, dV – его изменение, K_w – модуль объёмного сжатия воды. Из приливного анализа уровня, проведенного в сравнении с объёмной деформацией, получено значительное положительное значение сдвига фазы. Чтобы исключить этот парадокс, далее был проведен анализ и вы-

брана компонента деформации с минимизацией фазового запаздывания – горизонтальная деформация в азимуте 130°N (рис. 2).

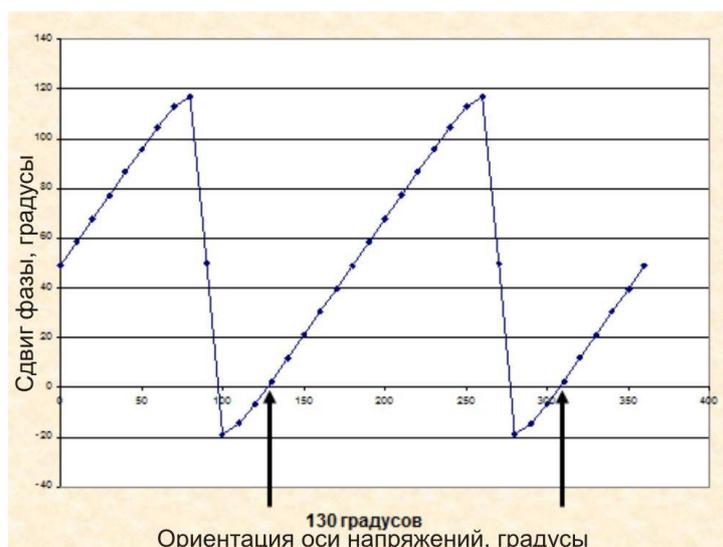


Рис. 2. Определение ориентации линейной деформации по минимуму фазового сдвига (приливный анализ для полусуточной волны M2 уровня воды в скважине станции Талая)

Подобное направление деформации можно объяснить наличием системы трещин вдоль горной долины по ручью Талая, ориентированной в азимуте 40°N, т.е. ортогонально приложенной силе (рис. 1). Физическая модель системы линейных трещин – сильфон показана на рис. 3. Определим параметры системы трещин. Для приливной волны M2 из приливного анализа имеем отношение $dH/d\varepsilon = 0.10$ мм/нанострейн (при теоретической амплитуде деформации 6.6505 нанострейн (10^{-9}), экспериментальной амплитуде уровня 0.675 мм). Сравним выражения в правой и левой частях для соотношения $dH = \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g$. Для dHm (теоретическая) $= \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g = 1.56$ мм. Таким образом, экспериментальное значение в два раза ниже теоретических расчётов. Полагая, что в формуле (1) соотношения в знаменателе приблизительно равны, можно оценить объём. Для скважины на Талой при $r_w = 0.07$ метра в соответствии с выражением $\pi \cdot r_w^2 = 0.015 \text{ м}^2 = (\rho \cdot g \cdot V / K_w)$ получаем для объёма $V = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3$. Пусть объём охватывает систему близповерхностных трещин. Предположим, система включает десяток трещин, шириной 0.01 м и глубиной 100 м, в этом случае их протяженность составит 300 м вдоль долины.

Сравнение результатов приливных анализов штольневых и скважинных измерений показывает сходный характер долговременных вариаций (2005–2009 гг.) в эпоху Култукского землетрясения 27.08.2008 года. Из приливного анализа данных лазерного деформографа получен график изменения во времени амплитудного фактора и фазового запаздывания для приливной полусуточной волны M2 (рис. 4).

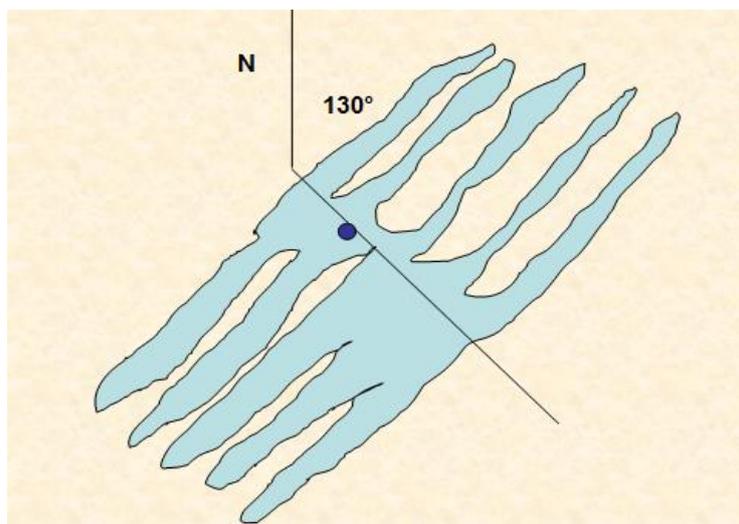


Рис. 3. Физическая модель. Система ориентированных трещин, работающая как сиффон. Ориентация системы трещин $40^{\circ}N$, ориентация оси сиффона (направление приливной силы) $130^{\circ}N$. Точка – возможное положение скважины. Система с одной степенью свободы – сиффон, работает, как пружина, ориентированная вдоль оси сиффона

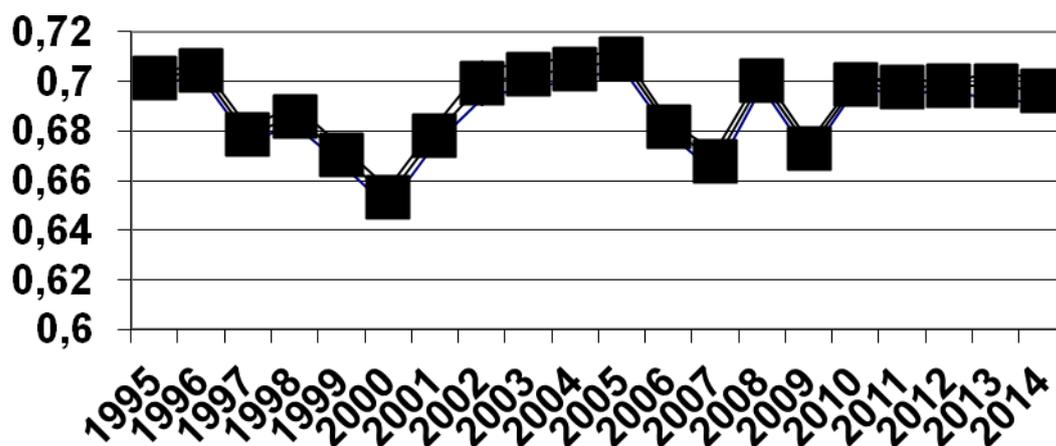


Рис. 4. Вариации значения амплитудного фактора (отношение экспериментального результата к теоретическому значению). Период наблюдений – с 1995 по 2014 гг. Лазерный деформограф, два ортогональных 25-метровых плеча, штольня сейсмостанции Талая

Из анализа следует наличие отклонений от среднего в периоды сильных землетрясений (1999 и 2008 гг.). График вариаций фазового сдвига выявил его переход на новый уровень (изменение на 2 градуса), что свидетельствует об изменении трещиноватости в зоне разлома в результате близкого (25 км) Култукского землетрясения ($M = 6.3$) при растяжении в эпицентральной области. Для станции Талая скачок в момент Култукского землетрясения (27.08.2008,

$M = 6.3$, в 25 км) позволил оценить изменение деформации – косейсмическое растяжение величиной $1 \cdot 10^{-6}$. Определения 3D-смещений проводилось по данным GPS-измерений. Получены косейсмические смещения величиной -2 ± 2 мм (N), $+10 \pm 2$ мм (E), -15 ± 5 мм (V). Используя экспериментальные косейсмические параметры, решая обратную задачу итерационным методом, были выбраны параметры землетрясения, которые оказались сходными с сейсмологическими определениями

В результате многолетних исследований (1995–2014 гг.) сделаны следующие выводы. Вариации амплитуд и фаз приливной деформации по результатам многолетних измерений в Байкальской рифтовой зоне могут достигать $3\% \div 4\%$ в амплитуде и до 3° в сдвиге фаз, что может быть вызвано изменением структуры и гидродинамических условий в зоне трещиноватости вдоль долины Талая и в зоне Главного Саянского разлома. Положение осей деформации изменилось после регионального землетрясения (27.08.2008, $M = 6.3$, 25 км).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Melchior P. Tidal interactions in the Earth Moon system // Chronique U.G.G.I., N210, Mars/Avril, MHN, Luxembourg, - 1992. - P. 76–114.
2. Dehant V, Defraigne P, Wahr J. Tides for a convective Earth. // J. Geoph. Res. - 1999 - 104. - B1. - P. 1035–1058.
3. Timofeev V., M. van Ruymbeke, Woppelmanns G., 2006, Tidal gravity observations in Eastern Siberia and along the Atlantic coast of France. // Journal of Geodynamics. - 2006. - V. 41. - P. 30–38.
4. Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // Journal of Geodynamics. - 2008. - doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001

© В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, 2015

САМОПОДОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ И ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Владимир Викторович Филатов

ФГУП «СНИИГГиМС», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)222-47-22, e-mail: filatov@sniiggims.ru

Рассмотрены некоторые вопросы влияния самоподобных процессов на величину и характер вызванной поляризации пористых флюидонасыщенных сред.

Ключевые слова: вызванная поляризация, релаксация, самоподобные процессы электросейсмический эффект, пористые флюидонасыщенные среды.

THE INHOMOGENEOUS MEDIA'S INDUCED POLARIZATION AS A SELF-SIMILAR RELAXATION PROCESS

Vladimir V. Filatov

Federal State Unitary Enterprise «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» (FGUP SNIIGGiMS), 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Doctor of Science, Main Scientific Associate, tel. (383)222-47-22, e-mail: filatov@sniiggims.ru

In article are discussed some problems of a self-similar relaxation process effects on parameters and induced polarization's process in fluidsaturated porous medium.

Key words: induced polarization, relaxation, self-similar process, electroseismic effect, fluidsaturated porous medium.

Задача дистанционного изучения структуры порового пространства, контролирующей такие важные параметры, как проницаемость, коэффициент фильтрации пластов, емкостные свойства нефтегазовых коллекторов, до настоящего времени сохраняет свою актуальность. В этом направлении существенную роль может играть метод индукционной вызванной поляризации (ВП), поскольку явление ВП тесно связано с особенностями процессов диффузии в поровом пространстве породы.

Известно, что именно структура порового пространства определяет параметры релаксации поля ВП. Однако многие явления, происходящие в пористых флюидонасыщенных средах под воздействием электромагнитного поля, или не имеют строгого описания, или требуют для такого описания большего количества параметров, фактически не определяемых с точки зрения практики. Традиционная система уравнений Максвелла не отражает многообразие свойств флюидонасыщенной среды, не учитывает проницаемость формации, ее пористость, потенциал двойного электрического слоя, т.е. всего того, что представляет реальную среду с электрическим током.

Поэтому в практических задачах для описания таких явлений очень часто используется феноменологический подход, при котором теория явления созда-

ется независимо от реальной физической кинетики процесса. Это позволяет использовать для конденсированных сред относительно небольшое количество параметров.

Один из известных подходов связан с введением «фактора последствия» – нелокального во времени соотношения между параметрами, входящими в уравнения материальных связей. Такая связь может быть представлена в виде интеграла типа свертки, конкретный вид которого определяется видом ядра интегрального оператора, которое в свою очередь определяется моделью функции «памяти».

Одним из основоположников такого феноменологического подхода является В.В. Кормильцев [3], который впервые ввёл дисперсию в уравнения электродинамики, записав выражение для тока в виде:

$$j(t) = \sigma(0)[E(t) - \int_0^t m(\tau)E(t - \tau)d\tau] \quad (1)$$

Фактически подход сводится к использованию в диспергирующих средах обычной системы уравнений Максвелла, в которой уравнения материальных связей представляются в виде интегралов свертки.

Линейность такой модели позволяет использовать для диспергирующих сред решения уравнений Максвелла в частотном варианте и рассматривать явление вызванной поляризации в практических задачах [2], ограничиваясь набором параметров, входящих в формулы Коула-Коула, записывая, например, дисперсию сопротивления в виде

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_0)^c} \right) \right), \quad (2)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление на постоянном токе; η_0 – безразмерная поляризуемость; τ_0 – время релаксации, c – параметр, трактующийся как характеристика разброса времен релаксации, распределенных около наиболее вероятного значения.

Отметим, что модель Коула-Коула не всегда адекватно описывает экспериментальные данные, что может приводить к искажениям петрофизической интерпретации данных ВП.

В последнее время для интерпретации данных ВП стал использоваться метод, в котором, по аналогии с диэлектрической спектроскопией, в качестве интерпретируемой характеристики рассматривается распределение времени релаксации (РВР) элементарной релаксационной модели Дебая, где РВР – непрерывная функция, отражающая весовой вклад разномасштабных структурных элементов [10].

При этом неявно предполагается, что релаксация общей системы обусловлена релаксацией некоторого множества подсистем, каждая из которых харак-

теризуется своим временем релаксации. Надо отметить, что такое предположение справедливо для многих систем, но подобное разбиение на подсистемы имеет реальный физический смысл только в том случае, когда число подсистем сравнительно невелико. Кроме того, за рамками РВР остаются параметры Коула-Коула

Поэтому целесообразно рассматривать процессы релаксации исходя из некоторой более общей модели, связанной, например, с фрактальностью среды. Процессы релаксации в такой среде приобретают самоподобный характер и описываются уравнениями в дробных производных.

Такие уравнения возникают в разных моделях. Один из вариантов – рассмотрение уравнений с памятью типа (1), в котором функция памяти описывается характеристической функцией некоторого фрактального множества.

Чтобы уточнить смысл параметров Коула-Коула в процессе релаксации, рассмотрим аналог формулы (2) во временной области, задающий изменение поляризуемости, который определяется функцией Миттаг-Леффлера [9]:

$$\eta(t) = \eta_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(t/\tau_0)^{cn}}{\Gamma(cn+1)}, \quad t > 0, 0 < c \leq 1. \quad (3)$$

Функция (3) является решением уравнения в дробных производных (так называемого «уравнения сверхмедленной релаксации») [8]:

$$\frac{d^c u(t)}{dt^c} + \frac{1}{\tau_0^c} u(t) = 0, \quad c < 1, \quad (4)$$

где оператор дробного дифференцирования определяется выражением

$$\frac{d^c u(t)}{dt^c} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{\Gamma(1-c)} \int_0^t \frac{u(\tau)}{(t-\tau)^c} d\tau \right]$$

Иначе говоря, мы рассматриваем модель, при которой процесс релаксации обусловлен взаимодействием с внешним полем, носящим прерывистый самоподобный характер. При этом обычное уравнение релаксации заменяется уравнением (4), где τ_0 характеризует скорость релаксации, а c – фрактальный характер процесса, тесно связанный с фрактальной размерностью среды.

Такое обобщение уравнений Максвелла носит достаточно ограниченный характер и не описывает всего многообразие свойств флюдонасыщенной среды. Феноменологический подход, основанный на двухскоростной теории порупругости в пористых насыщенных флюидами средах [1, 7], позволяет лучше учесть такие параметры, как проницаемость и пористость формации, наличие двойного электрического слоя и т. д.

В частности, проявление двойного электрического слоя сказывается на появлении электрокинетического члена в плотности тока, которая в отсутствии дисперсии свойств среды записывается в виде.

$$\mathbf{j} = \alpha \rho_l (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (5)$$

где α – электроакустический параметр; ρ_l – парциальная плотность флюида; $\mathbf{u} - \mathbf{v}$ – разность скоростей матрицы и жидкости; σ – электропроводность; \mathbf{E} – электрическое поле; \mathbf{B} – магнитная индукция.

Электрокинетический член в уравнении (1) обуславливает проявление сесмоэлектрического эффекта при упругом воздействии на флюидонасыщенные среды. Одно из возможных проявлений связано с повышением плотности зарядов, возникающих за счет деформации двойного слоя [4]. Это, в частности, меняет уровень ВП, возникающей при пропускании через среду электрического тока. Такой эффект был отмечен в ходе полевых экспериментов по исследованию влияния упругого воздействия на электрические свойства среды. На рис. 1 представлены изменения кажущегося сопротивления до и после воздействия. В данном случае адекватно объяснить разницу удаётся только за счет появления дополнительных процессов ВП.

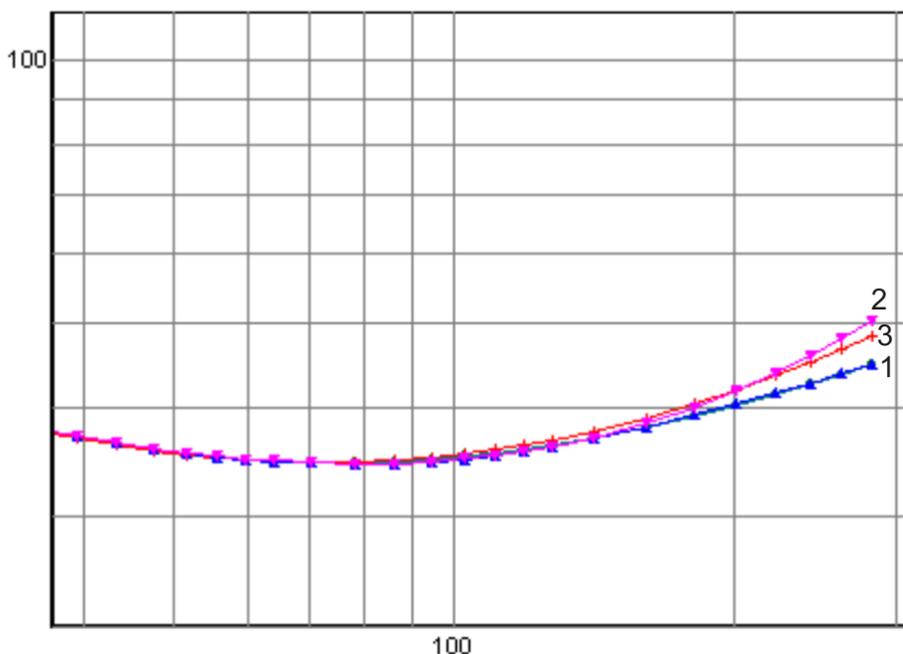


Рис. 1. Изменение кривых кажущегося сопротивления полученных до (1) и в разное время после (2, 3) упругого воздействия

С течением времени эффект меняется за счет релаксации свойств среды, что также нашло отражение в рисунке. При этом процесс релаксации не является

Дебаевским [6] и описывается уравнением в дробных производных, асимптотика решение которого имеет вид экспоненциального закона Уильямса-Уотса:

$$e_{\nu}(t) : \exp\left[-\frac{\lambda t^{\nu}}{\Gamma(1+\nu)}\right]. \quad (6)$$

Однако электрокинетический член в уравнении (1) может возникнуть не только при явном акустическом воздействии, но и при обычных электромагнитных зондированиях [1, 5]. Помимо сейсмoeлектрического эффекта существует обратный по отношению к нему электросейсмический эффект (возникновение упругих колебаний под воздействием электромагнитного поля).

То, что электросейсмический эффект 2-го рода (ЭСЭ2) может быть достаточно существенным, свидетельствует, например, публикация [11].

Лабораторные работы, проведенные на образцах горных пород, также показали, что величина ЭСЭ2 может быть достаточно велика. Кроме того, эффект может существенно (на порядок) возрасти, если измерять компоненту акустического поля, ортогональную приложенному электрическому полю. Отмечены также резонансные явления на некоторых частотах, при которых в сигнале акустического поля появляется вторая гармоника, на порядок и более превышающая первую гармонику.

Резонансные явления отмечены и в теоретических работах [1]. Происходящие при этом деформационные искажения могут приводить к дополнительному влиянию электрокинетической составляющей из уравнения (5) на величину ВП. Экспериментальные и теоретические исследования позволяют надеяться, что такое влияние может быть реально зафиксировано. При этом характер процесса релаксации такой составляющей может иметь специальный вид (6). Кроме того, и глубинность проявления ЭСЭ, и, соответственно, дополнительных процессов ВП может быть существенно выше традиционной глубинности ВП. Это позволяет надеяться, что такое специальное проявление ЭСЭ может изучаться не только с помощью измерения акустического отклика, что традиционно используется, но и с помощью выделения в сигнале ВП "недебаевской" составляющей и последующей её интерпретации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доровский С.В., Доровский В.Н., Блохин А.М. О возможностях электроразведки при исследовании устойчивости водонефтяных слоистых систем // Геология и Геофизика. - 2006. - №11. - С. 892–901.
2. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М. Феноменология вызванной поляризации // Геофизика. - 2013. - №1. - С. 80–83.
3. Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. - Свердловск: УНЦ АН СССР, 1981. - 44 с.
4. Манштейн А.К., Нестерова Г.В., Филатов В.В., Саева О.П. Об оценке величины сейсмoeлектрического эффекта первого рода // Технологии сейсморазведки. - 2013. - № 4. - С. 81–88.

5. Филатов В.В. Электросейсмические эффекты и вызванная поляризация неоднородных сред // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск 8–13 декабря 2014). - Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. - С. 319–324.
6. Филатов В.В., Тригубович Г.М. Релаксация сопротивления в задачах сейсмоэлектро-разведки и задачи прогноза [Электронный ресурс]. - Режим доступа: emf.ru/ems2013/section7/Филатов_Тригубович.pdf.
7. Dorovsky V., Imomnazarov Kh. A mathematical model for the movement of a conducting liquid through a conducting porous medium // Mathematical and Computer Modelling. - 1994. - V. 20. - P. 91–97.
8. Mainardi, F. and Gorenò, R. Time-fractional derivatives in relaxation processes: a tutorial survey // Fract. Calc. Appl. Anal. - 2007. - №10. - P. 269–308.
9. Pelton W.H. et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. - 1978. - V. 43. - P. 588–609.
10. Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements [Text] // Geophys. J. Int. - 2007. - V. 170. - P. 31–43.
11. Thompson H., Hornbostel S., Burns J., "Field tests of electroseismic hydrocarbon detection // Geophysics. - 2007. - V. 72, № 1. - P. N1–N9.

© В. В. Филатов, 2015

ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОСТИ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР ПО ДАННЫМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО АЛТАЯ)

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, тел. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Александр Евгеньевич Шалагинов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-49-54, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

Характеристика активности разломных структур является важной для целого ряда научных дисциплин, например, сейсмологии, геофизического мониторинга, структурных исследований разными методами, особенно в сейсмоактивных регионах, где разломы фактически определяют строение. В терминах геоэлектрики разломную структуру можно характеризовать определенными размерами в трехмерном пространстве с электрофизическими параметрами, отличными от параметров вмещающей среды. Чаще всего для этих зон наблюдается понижение значений удельного электрического сопротивления (УЭС). Кроме того, разломные зоны могут отличаться по своим анизотропным электрическим свойствам, что подтверждается теоретическими расчетами и целым рядом полевых экспериментов. Актуальной является задача определения активности разломных структур, точнее, критериев их активности.

Ключевые слова: нестационарное электромагнитное зондирование, электромагнитный мониторинг, вариации удельного электрического сопротивления, коэффициент электрической анизотропии.

CHARACTERISTICS OF THE ACTIVITY OF FAULT STRUCTURES USING TEM DATA (FOR EXAMPLE GORNII ALTAI)

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Leading Researcher, docent, tel. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Alexander E. Shalaginov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-49-54, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

Characteristics of fault structures are important for a variety of scientific fields, for example, seismology, geophysical monitoring, structural studies using different methods, especially in seismically active regions where the faults actually determine the structure. In terms of the geoelectric fault structure can be characterized by a certain size in three-dimensional space with the electro-physical parameters different from the parameters of the host medium. There is a decrease of values of resistivity in most of these areas. In addition, fault zones may differ in their anisotropic electrical properties, as evidenced by theoretical calculations and a number of field experiments. An urgent task is to determine the activity of faults, more precisely criterions of their activity.

Key words: transient electromagnetic sounding, electromagnetic monitoring, variations of resistivity, coefficient of electrical anisotropy.

В статье приведены данные регулярных электромагнитных измерений с контролируемым источником, выполненных в районе Горного Алтая, на основе которых можно оценить активность разломных структур. Мониторинговые работы методами геоэлектрики выполняются на двух участках эпицентральной области разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7,3$), которое произошло в ближнем горном обрамлении Чуйской впадины Горного Алтая и по сейсмологическим наблюдениям сопровождается продолжительным афтершоковым процессом. При анализе данных мониторинга разных модификаций метода нестационарного электромагнитного зондирования были рассмотрены два электрофизических параметра – удельное электрическое сопротивление и коэффициент электрической анизотропии. Оценки вариаций этих параметров получены на основе решения обратной задачи. Сопоставление интенсивности вариаций с элементами разломной тектоники в пунктах измерений дает возможность оценить степень активности разломных нарушений.

Индуктивные зондирования с соосными петлями больших размеров (400x400 м) выполнены на первом участке в западной части Чуйской депрессии (рис. 1). Эти пункты были размещены в различных тектонических блоках и на разных расстояниях от зоны магистрального разрыва Чуйского землетрясения.

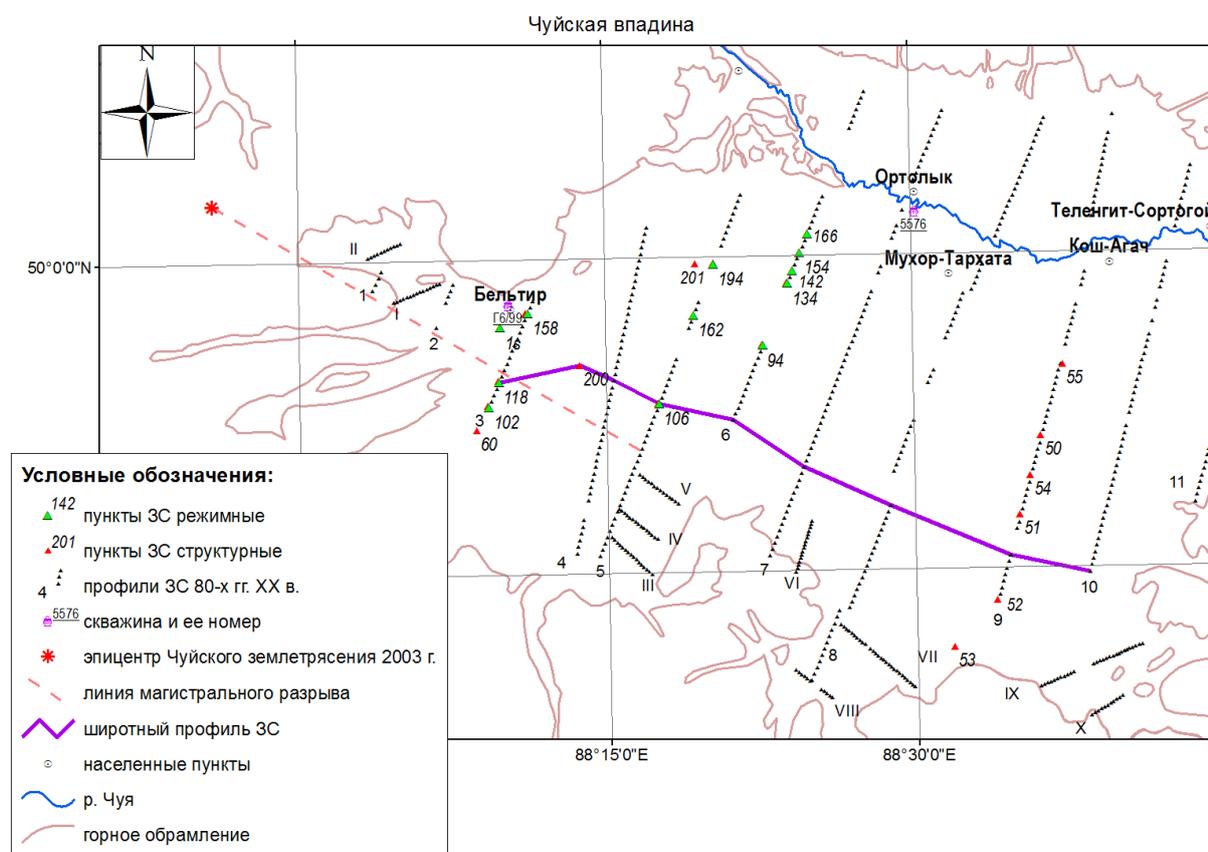


Рис. 1. Пункты индуктивных зондирований становлением электромагнитного поля с соосными петлями в западной части Чуйской впадины

В результате анализа вариаций электропроводности за 2004–2013 гг. было выяснено, что их интенсивность в каждом конкретном пункте зависит от геологических и тектонических характеристик участка, на котором они расположены. Учитывая все данные, были выявлены наиболее чувствительные пункты (ЗС 106, 102, 118) и сформулированы закономерности эволюции геоэлектрических параметров массива горных пород, подвергнутого сильному сейсмическому воздействию. В качестве примера для ЗС 106 сопоставлены кривые ρ_t , полученные в афтершоковый период, с кривой за 1980 г. (рис. 2). Измерения ЗС во второй половине прошлого столетия характеризует геоэлектрические параметры среды в спокойный сейсмический период [1].

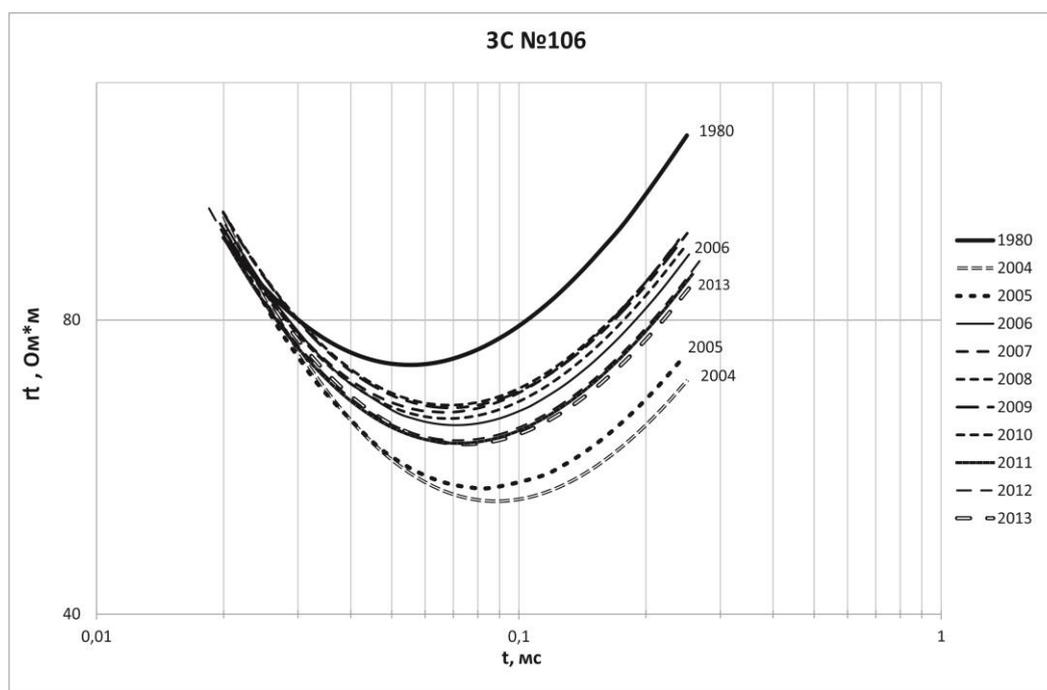


Рис. 2. Сопоставление кривых ρ_t за разные годы наблюдений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г.

Из сопоставления кривых ρ_t ЗС 106 следует, что наиболее интенсивный процесс восстановления геоэлектрических параметров геологического массива пород после разрушительного события наблюдался в течение первых трех лет. С 2007 по 2013 г. изменения геоэлектрических параметров связаны с текущей сейсмичностью, так как интенсивность вариаций отражает особенности продолжающегося афтершокового процесса.

Амплитуды вариаций УЭС существенно изменяются в зависимости от места расположения пункта ЗС на участке исследования и временного интервала измерений. В 2004 г., сразу после Чуйского землетрясения, по данным ЗС 106 и 102, 118 получены максимальные вариации, превышающие 200 %, а по данным ЗС 158, 134 отмечаются сравнительно небольшие вариации, достигающие 30 %.

Причин такого различия несколько. Например, для ЗС 106, 102, 118 с максимальной реакцией на сейсмическое воздействие пункты измерений расположены либо непосредственно в зоне магистрального разрыва (ЗС 102, 118), либо в области влияния активных второстепенных разломных нарушений, связанных с основным разрывом (ЗС 106). В частности, по геолого-геофизическим данным пункт ЗС 106 расположен в зоне межблокового разлома.

На участке Мухор-Тархата регулярные наблюдения начаты в 2007 г. и продолжаются в настоящее время методом становления электромагнитного поля (ЗС) с использованием индукционных (Q-q), гальванических (AB-MN) и комбинированных (AB-q) установок (рис. 3). По результатам интерпретации данных модификации метода ЗС с гальваническими установками за 2007–2013 гг. на этом участке получены значения удельного сопротивления и коэффициента электрической анизотропии (λ) для каждого слоя разреза. В 2014 г. для определения детального расположения разломной зоны и ее параметров были выполнены измерения методом электротомографии по профилю.

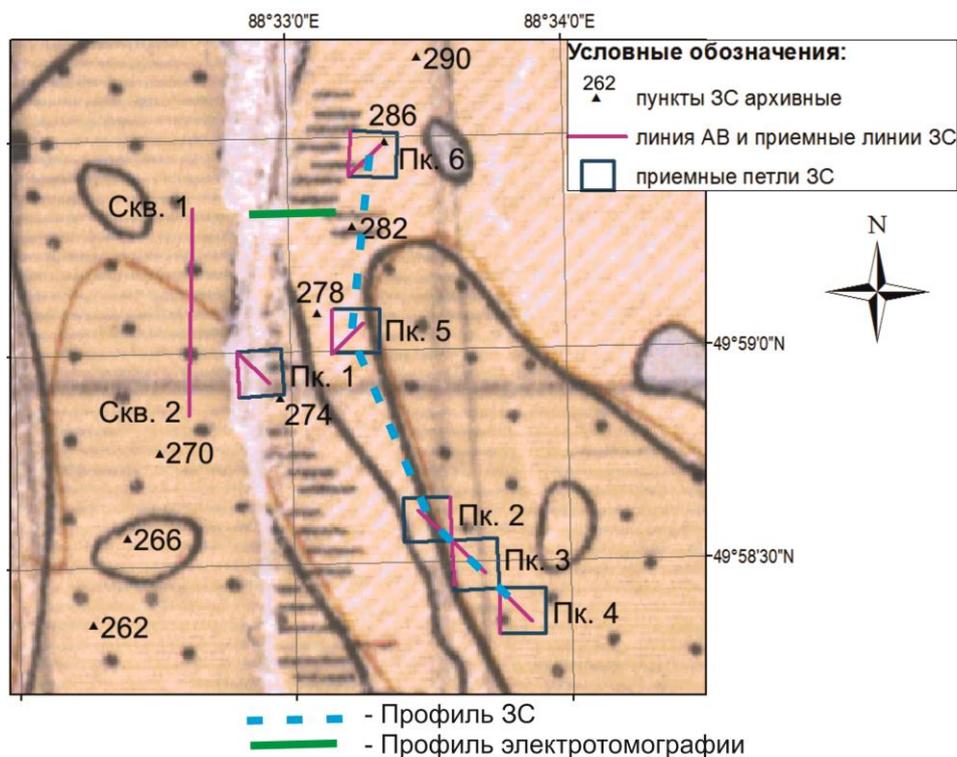


Рис. 3. Размещение пунктов мониторинга ЗС с гальваническими установками в районе пос. Мухор-Тархата

Анализ вариаций УЭС за разные годы показал, что для ЗС 1, 5 наблюдаются вариации, достигающие 20–23 %, а для ЗС 2, 3, 4, 6 они не более 10 %. В то время как вариации коэффициента анизотропии в афтершоковый период Чуйского землетрясения существенно превышают величины вариаций УЭС, вариации λ для верхнего и опорного горизонтов разреза по данным ЗС 1, 2, 5 и 6 до-

стигают 100 % и более [2]. Увеличение коэффициента анизотропии в районе этих пикетов наблюдается в периоды повышения сейсмической активности, когда увеличивается число сейсмических событий, повышается количество выделившейся энергии (рис. 4). На графиках вариаций λ увеличение значений отмечается для обоих анизотропных слоев в 2008–2009 гг. и в 2012–2013 гг., что коррелирует с повышением сейсмичности региона в эти периоды. Можно также отметить, что вариации λ для опорного горизонта более значимы, чем λ для первого слоя.

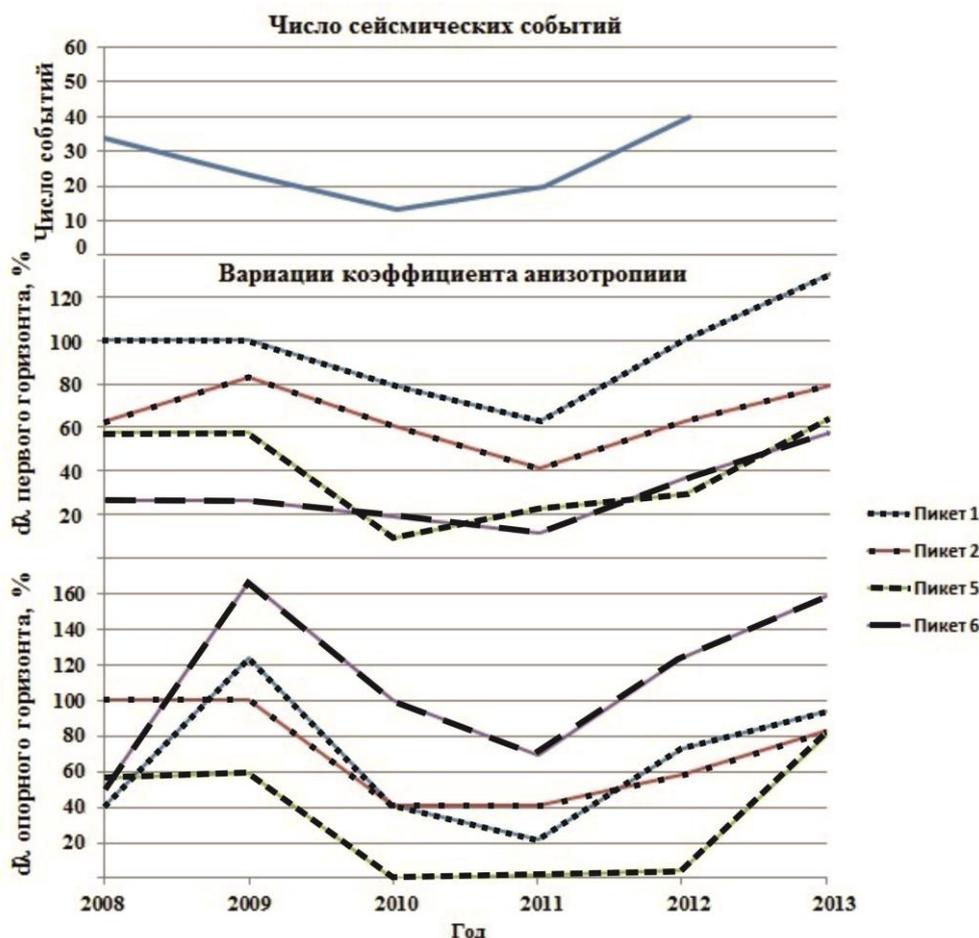


Рис. 4. Сопоставление вариаций коэффициента анизотропии с параметром сейсмической активности

По интенсивности вариаций УЭС и λ были выделены активные интервалы магистрального разрыва Чуйского землетрясения и активные второстепенные разломы. Если рассмотреть результаты регулярных электромагнитных измерений непосредственно в эпицентральной зоне Чуйского события, то можно сделать несколько выводов. Во-первых, по интенсивности вариаций электрофизических параметров можно выделить отдельные наиболее активные зоны магистрального разрыва и время этих активизаций. Во-вторых, по комплексу данных ЗС с гальваническими и индуктивными установками в районе пос. Мухор-

Тархата наблюдается участок активного второстепенного разломного нарушения. Выявлен также активный межблоковый разлом в районе пункта мониторинга № 106. Учитывая геоэлектрическое строение Чуйской впадины и амплитуды вариаций в различных пунктах регулярных наблюдений ЗС, можно ввести критерий активности разломных структур по электромагнитным данным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Землетрясения России в 2009 году/ А.Ф. Еманов [и др.]. - 2011. - С.27–30.
2. Шалагинов, А.Е. Результаты электромагнитного мониторинга геодинамических процессов с учетом электрической анизотропии разреза в Чуйской впадине Горного Алтая / А.Е. Шалагинов, Н.Н. Неведрова // Шестой Международный симпозиум "Проблемы геодинамики геоэкологии внутриконтинентальных орогенов (Бишкек, 23–29 июня 2014 г.) : тез. докл. - Бишкек: Научная станция РАН, 2014. - С. 215–218.

© Н. Н. Неведрова, А. Е. Шалагинов, 2015

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК
ПРИ КАРТИРОВАНИИ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ
ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ**

Александр Николаевич Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В работе обсуждаются результаты 3D-моделирования с помощью программы MODEM3D индукционных переходных характеристик над объектами цилиндрической и конической формы для установок QQ-n и ABMN-n. Моделирование позволяет дать положительное заключение об использовании гальванической установки для конкретной геологической ситуации. Анализ отклонений сигналов по профилю относительно отклика референтной среды позволяет выполнять качественные оценки глубины залегания и геометрических размеров структур.

Ключевые слова: математическое моделирование, зондирование становлением поля.

**INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF GALVANIC AND INDUCTION
TEM-SOUNDING SYSTEMS FOR MAPPING 3D OBJECTS BY TEM**

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist, Doctor of Sciences, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents the results of 3D modelling (program MODEM3D) of transient induction responses to cylindrical and conical objects for QQ-n and ABMN-n measurement system. Numerical modeling allows to give a positive opinion on the use of the electrical arrays for a specific geological situation. Analysis of relative deviations (with respect to the response of the reference medium) allows make qualitative estimates the depth and geometry of structures.

Key words: mathematic modeling, transient electromagnetic sounding.

В последние два десятилетия в России и за рубежом достигнут значительный прогресс в разработке программных средств для трёхмерного моделирования электромагнитных полей. Одной из передовых разработок в данной обла-

сти является программный комплекс для расчета нестационарных электромагнитных полей в трёхмерных проводящих и поляризующихся средах – Modem3D (авторы Кремер И.А., Иванов М.И.) [1]. Задача моделирования установливающегося электромагнитного поля решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной сетке. Для повышения производительности программы Modem3D алгоритмы были распараллелены, что позволило эффективно использовать многоядерность современных процессоров. Также для выполнения массовых расчётов была выполнена адаптация программы Modem3D для работы в системе распределённых вычислений (GRID-система) и облачных средах, организованных в ИНГГ СО РАН [2]. Тестирование программы на простых геометрических объектах и в случае горизонтально слоистых сред показало, что для широкого класса моделей расчеты выполняются с высокой точностью [3]. В работе демонстрируются возможности программы Modem3D при исследовании возможностей многоразностных установок для зондирования становлением поля Q-q-n и АВМN-n. По результатам моделирования делается заключение о перспективности каждой из установок. Также предлагается способ качественной оценки глубины залегания и геометрических размеров структур.

Для достижения поставленной цели в программе Modem3D была построена тетраэдральная сетка для модели гряды из четырёх объектов (рис. 1) с центром декартовой системы координат в середине гряды (между 2 и 3 объектами) и осью X, проходящей через их центры. Верхний перекрывающий слой составлял 800 м и 1200 м, радиусы верхних окружностей объектов варьируются от 2 до 5 км. Конические объекты имеют угол наклона 30° при расширении и 10° при сужении с глубиной, высота объектов – от 3,1 до 3,4 км. Сопротивление всех объектов было 200 Ом·м, а вмещающей была двухслойная среда с параметрами $\rho_1 = 2$ Ом·м, $h_1 = 4000$ м, $\rho_2 = 50$ Ом·м. Расчет проводился для 2-х установок. Первая установка АВМN-n с длиной источника 4 Км, приемников – 250 м. Линия приемников расположена на прямой параллельной к источнику на расстоянии 500 м. Приемники расположены от -1500 м до 1500 м относительно центра источника с шагом 100 м. Вторая установка Q-q-n представляет собой установку петля в петле с размерами генератора 4000x1000 м и приемников 100x100 м. Приемники расположены от -1500 м до 1500 м по центру вдоль длинной оси источника с шагом 100 м. В итоге имеем 31 кривую становления для каждого положения генераторных линии или петли, которые перемещались с шагом 2000 м от -17000 м до 17000 м на оси X. На рис. 1 помимо объектов схематично приведены установки в крайних положениях.

Перед выполнением массовых расчетов были проделаны необходимые тесты. Расчетная область проверялась на достаточность размеров для выполнения условий «большого бака». Построенная сетка исследовалась на совпадение с одномерной средой путем сравнения с одномерными расчетами программами UnvQQ и UnvLL (автор – Антонов Е.Ю.). Сравнение проводилось для референтной среды: $\rho_1 = 2$ Ом·м, $h_1 = 4000$ м, $\rho_2 = 50$ Ом·м. Помимо тестов были

проведены предварительные расчеты. Исследовалось совпадение расчетов для трехмерной модели с одним объектом и для модели гряды над соответствующим объектом. Также был проведен тест на аддитивность поля, который показал, что аномальное поле для 2-х трехмерных объектов можно с хорошим приближением заменить суммой аномальных полей отдельных объектов. Все тесты и предварительные расчеты оказались успешными, а составленная сетка – пригодной для дальнейших трёхмерных расчетов.

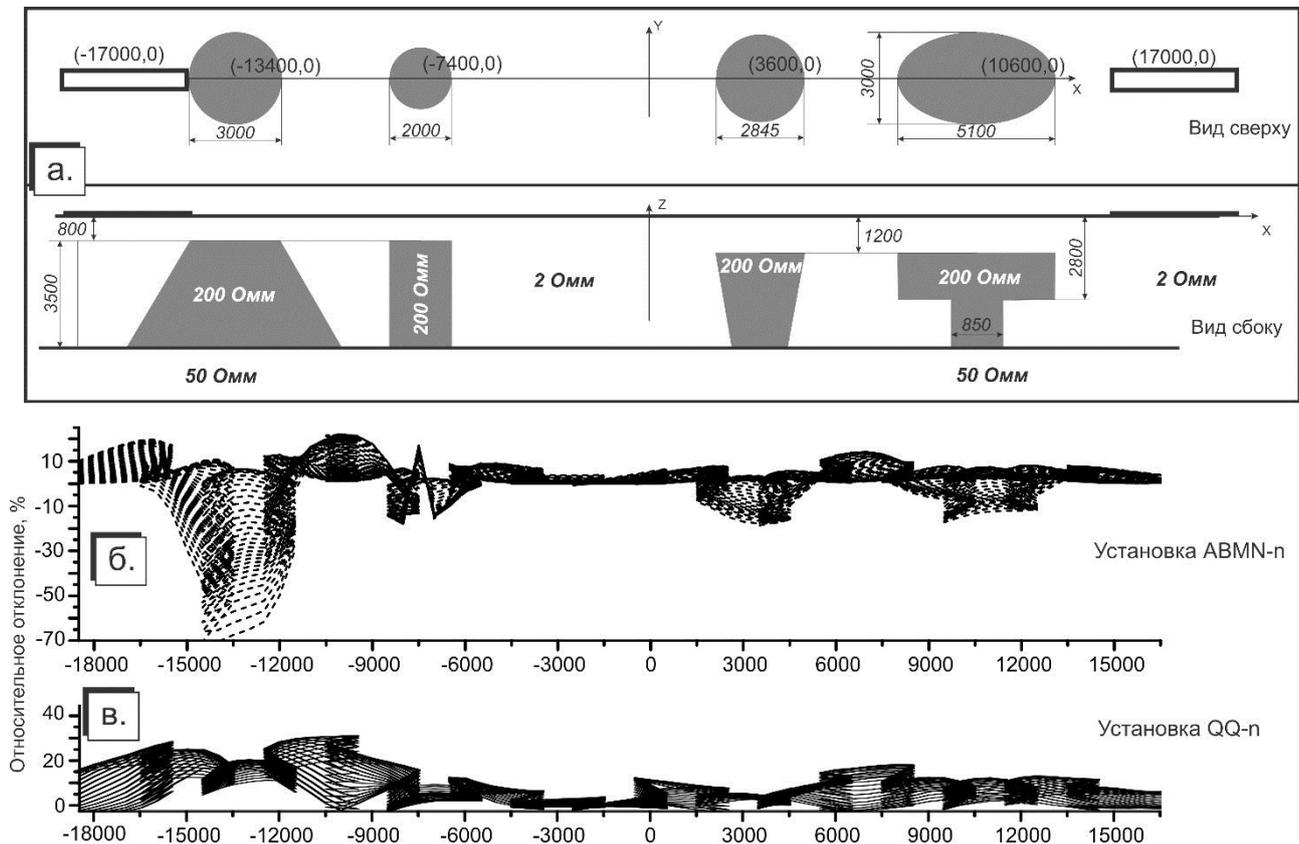


Рис. 1. Вид сверху и вид сбоку модели гряды (а), отклонение рассчитанного сигнала относительно становления над референтной средой для установок АВМN-п (б) и QQ-п (в)

Были произведены расчеты откликов среды для трёхмерной модели по профилю, пересекающему все объекты от -17000 м до 17000 м по оси X. Для визуализации результатов моделирования были вычислены относительные отклонения трехмерного отклика от рассчитанных кривых референтного сигнала (в нашем случае это расчет для крайнего положения установки на профиле с координатами (17000,0), где сигнал близок отклику слоистой модели среды). После того как мы рассчитали относительные отклонения на всем промежутке времени измерений, появилась возможность локализации временного интервала, который позволил оценить глубины целевых объектов. Был выбран отрезок от 0,05 до 5 сек. На рис. 1 представлены соответствующие значения относи-

тельного отклонения сигналов по профилю для установки АВМN-n (рис. 1б) и Q-q-n (рис. 1в). Хорошо видно, что построенные относительные отклонения хорошо коррелируют с геометрией моделируемых объектов и в какой-то мере позволяет оценить её геометрические размеры.

Рассмотрим отдельно каждую установку. Профиль, рассчитанный для установки АВМN-n, хорошо коррелирует с формой и глубиной залегания объектов. Первый, самый большой объект (усеченный конус, расширяющийся с глубиной под углом 30°), выделяется на профиле сильнее всего. Относительные отклонения, возникающие над данным объектом, достигают 70 % (от -15000 до -12000 по профилю, рис. 1б). Склоны конуса также выделяются: меняется знак относительного отклонения с минуса на плюс (отрезки -18000 до -15000 и -12000 до -9000, рис. 1б). Всего же область влияния этого объекта распространяется на 9000 м. Следующий объект, цилиндр с диаметром 2000 м, также выделяется. Область влияния такого объекта значительно меньше, его видно от -9000 до -7000 на профиле. Отклонения также невелики, не превышают 20–25 %. Оставшиеся 2 объекта погружены еще на 400 м ниже, что сказывается на размере аномалии. Относительные отклонения над этими объектами не превышают 25 %. Тем не менее объекты отчетливо выделяются. Размеры объектов и возмущений сигналов на профиле хорошо коррелируют (-1500 до 4500 и от 9000 до 12000, рис. 1б). Таким образом, можно сделать вывод, что с помощью гальванической установки АВМN-n можно выполнить качественные оценки глубины залегания и геометрической формы объекта.

Вторая установка Q-q-n в данном случае является наименее перспективной, потому что более всего ориентирована на выделение проводящих объектов. На профиле выделяется только первый объект – усеченный конус, расширяющийся с глубиной под углом 30° . Относительные отклонения над ним достигают 30 %. Второй объект сливается с первым, а третий и четвертый можно выделить лишь по косвенным признакам. Таким образом, если в первом случае выделяются все объекты с достаточно хорошей точностью, то для индукционной установки Q-q-n можно выделить только большие и неглубокозалегающие объекты.

Таким образом, рассматриваемые объекты лучше всего проявляются в результатах зондирования при использовании установок с заземленными питающей и измерительной линиями. Иными словами, при изучении рассматриваемых структур геологическая информативность установки АВ-MN выше по сравнению с любой другой, т.е. такой, где хотя бы один элемент представлен петлей или рамкой (Q – q, АВ – q, Q – MN).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- программа Modem3D позволяет проводить высокоточные расчеты переходных процессов для разных зондирующих установок (петля-петля (Q-q), линия-линия (АВ-MN), для геоэлектрических моделей со сложными трехмерными объектами;

- анализ отклонений сигналов по профилю относительно отклика референтной среды при наличии определённой априорной информации позволяет выполнять качественные оценки глубины залегания и геометрических размеров структур;

- анализ результатов моделирования позволяет дать положительное заключение об использовании той или иной установки для конкретной геологической ситуации (выбрать наиболее эффективную установку по результатам модельных расчетов) и дать методические рекомендации, позволяющие повысить геолого-геофизическую информативность и качество импульсных электромагнитных зондирований.

Авторы благодарят И.А. Кремера и М.И. Иванова за предоставленную возможность использовать программу Modem3D для научных расчётов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение Modem3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института. - 2009. - Т. 183. - С. 242–245.

2. Мартьянов А.С., Мартьянов А.С., Тейтельбаум Д.В., Сердюк К.С., Власов А.А., Ельцов И.Н. Использование свободных сетевых ресурсов предприятия для решения емких вычислительных геофизических задач // Каротажник. - 2011. - № 11(209). - С. 56–64.

3. Шеин А.Н. Особенности программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2: материалы. - Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». - Старый Оскол, 2013. - С. 99–104.

© А. Н. Шеин, Е. Ю. Антонов, 2015

ОГРАНИЧЕНИЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА 3D-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО (БОРНОВСКОГО) ПРИБЛИЖЕНИЯ

Александр Николаевич Шейн

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Владимир Сергеевич Могилатов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-96-02, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В работе приводится ряд ограничений алгоритма томографической инверсии, основанного на приближенном (борновском) 3D-моделировании нестационарного электромагнитного поля. Для исследования используются синтетические данные, полученные программой для моделирования процесса становления над трехмерными средами Modem3D.

Ключевые слова: математическое моделирование, зондирование становлением поля, томографическая инверсия.

LIMITATIONS TOMOGRAPHIC INVERSION OF TEM-DATA BY APPROXIMATE (BORN) 3D MODELLING

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Vladimir S. Mogilatov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Sciences, Main Research Scientist, tel. (383)330-96-02, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist, Doctor of Sciences, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents limitations of tomographic inversion of transient electromagnetic data. Inversion based on approximate (Born) 3D modelling. Synthetic transient induction responses used for investigations. This data were obtained by program Modem3D for calculating transient electromagnetic field.

Key words: mathematic modeling, transient electromagnetic sounding, tomographic inversion.

В настоящее время в разработке программных средств трёхмерного моделирования для задач электроразведки, в том числе нестационарных, достигнуты большие успехи. Однако практическая интерпретация данных зондирования становлением (ЗС), как правило, производится в рамках модели горизонтально-слоистой геологической среды. Переход к трёхмерной инверсии данных осложняется тем, что даже прямое моделирование электромагнитных полей в сложнопостроенных средах требует больших временных и вычислительных ресурсов. Поэтому потребность в решении обратных трехмерных задач подвигает к использованию приближённых методов, например, с помощью линейной томографической инверсии в рамках борновского приближения.

В предыдущих работах проводилось тестирование алгоритма приближённого расчёта нестационарного электромагнитного поля, основанного на теории возмущений [1]. Тестирование программы для приближённого расчёта переходных характеристик – MAG3D (автор Могилатов В.С.) выполнялось путем сравнения с точными трёхмерными расчётами векторным методом конечных элементов (Modem3D, авторы Кремер И.А, Иванов М.И.). Также проводилось опробование созданной на основе MAG3D программы томографической инверсии [2], которое показало состоятельность и работоспособность предложенного и реализованного алгоритма инверсии данных зондирования становлением поля в рассмотренных случаях сложнопостроенных сред. У любого метода существует ряд ограничений, некоторые из которых мы попытались представить в данной работе.

Для тестирования были выбраны 2 модели (рис. 1). Это двухслойная среда ($\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) с погружённым в неё объектом с удельным сопротивлением $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и размерами $2000 \times 1500 \times 300 \text{ м}$. Центр аномалии-параллелепипеда смещен на 1250 м по оси Y (модель 1) и находится в центре координат (модель 2), а верхняя кромка находится на глубине 300 м . Для получения синтетических кривых становления программой Modem3D использовалась часто применяемая на практике многообразная установка. На рис. 1 показана система измерения: окружность – это источник радиусом 564 м (эквивалент квадратной петли со стороной 1000 м), а точки – приемные рамки. Как показала томографическая инверсия синтетических данных, полученных для 2х описанных моделей, восстановить объект, находящийся в стороне от крестовой установки, практически невозможно. На рис. 2 (слева) представлены результаты томографической инверсии для модели 1 и контур объекта (белый пунктирный прямоугольник). Видно, что восстановление аномалии плохого качества. И наоборот, если объект находится вблизи измерительной системы (модель 2), такая аномалия восстанавливается с достаточной точностью (рис. 2, справа). Дополнительные исследования показывают, что удовлетворительная инверсия становится возможной при сгущении приемников над объектом. Таким образом, благоприятный исход томографической инверсии для крестовой установки возможен, если объект соизмерим с системой наблюдений и аномалия находится в непосредственной близости к источнику.

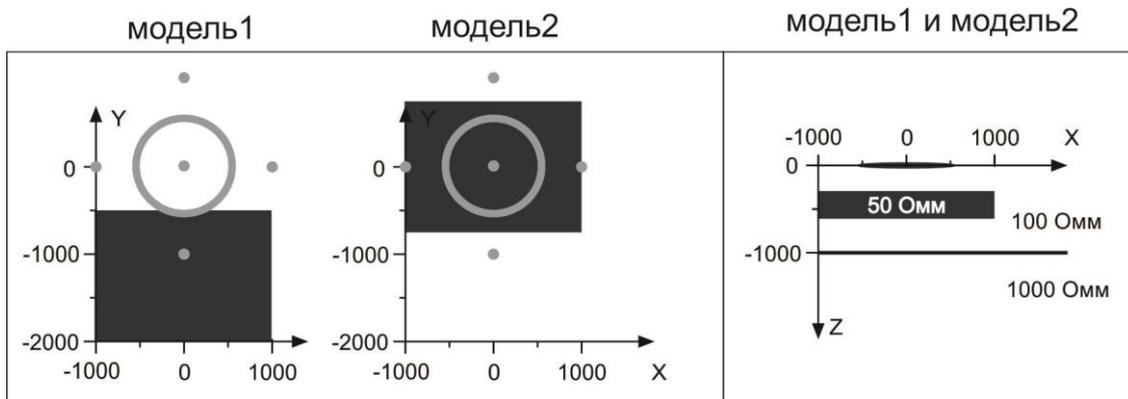


Рис. 1. Модели 1, 2 для тестирования программы томографической инверсии

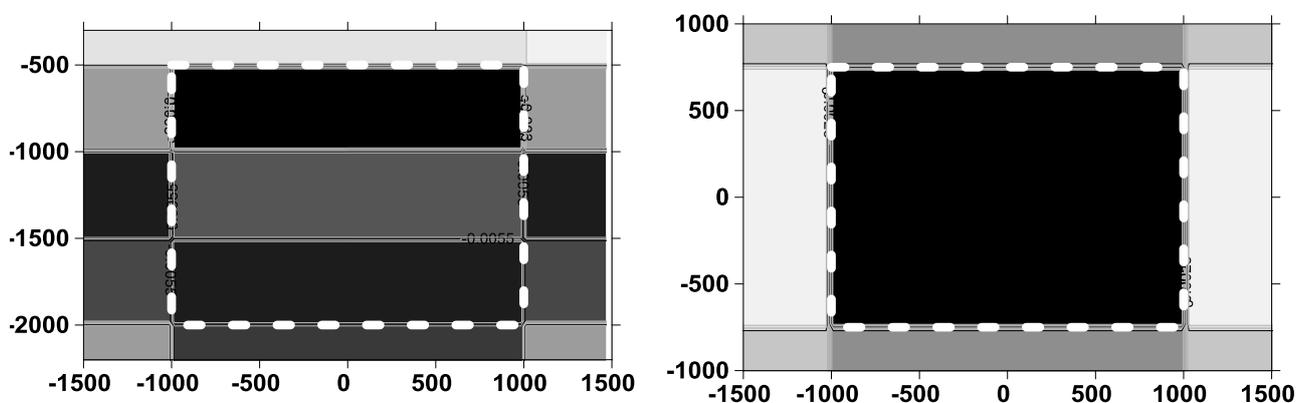


Рис. 2. Графическое представление результатов томографической инверсии для моделей 1 и 2

Следующий этап исследования – это восстановление 2-х объектов (рис. 3). Как и в первом случае, установка использовалась крестовая и референтной была двухслойная среда ($\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). В нее погружены 2 объекта. Размеры первого $2000 \times 1500 \times 300 \text{ м}$, центр аномалии совпадает с центром координат XY, верхняя кромка находится на глубине 300 м, а удельное сопротивление равно 50 Ом. Второй объект имеет размеры $2000 \times 1250 \times 300 \text{ м}$, центр смещен по оси Y на 1375 м, верхняя кромка также находится на глубине 300 м, а сопротивление равно 150 Ом. Сначала мы восстановим каждый объект по отдельности, предварительно рассчитав синтетические данные для соответствующих моделей. На рис. 4 (б, в) графически представлены результаты томографической инверсии отдельных объектов. Видно, что даже при несовпадении томографической сетки с контурами объектов (рис. 4 б, в, сплошной и пунктирный прямоугольники соответственно) восстановление аномалии достаточно хорошее. Теперь, если в модели будет 2 объекта, как показано на рис. 3, то восстанавливаться будет только 1 объект, который

вносит большее аномальное возмущение в сигнал (рис. 4а). На рисунке 4а видно, что хорошо восстанавливается объект, который имеет большие по сравнению со вторым размеры, а также является более проводящим. Второй, менее проводящий объект, никак не проявляется при томографической инверсии данных, полученных программой Modem3D над моделью 3 с 2-мя объектами.

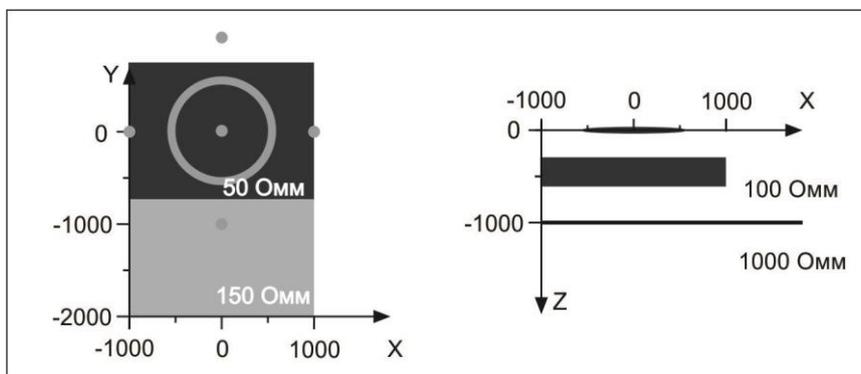


Рис. 3. Модель 3 для тестирования программы томографической инверсии

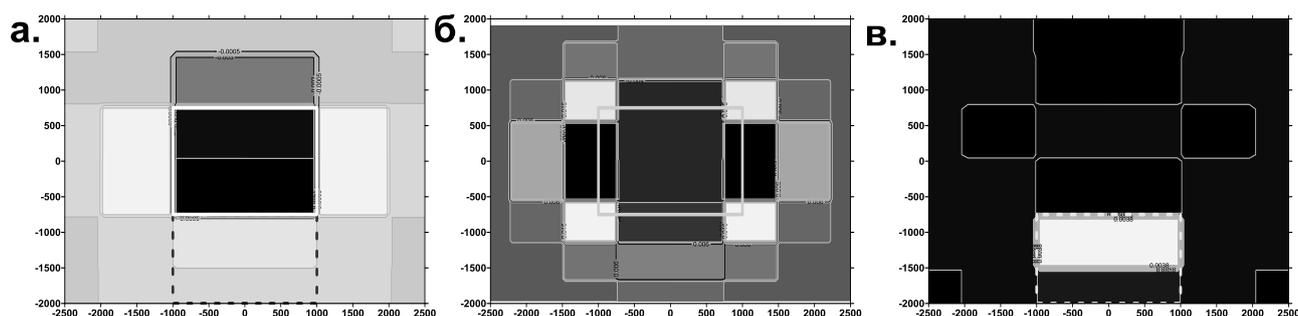


Рис. 4. Графическое представление результатов томографической инверсии модели 3 (а), центрального (б) и смещенного объектов (в) по отдельности

Благоприятный исход томографической инверсии возможен, если объект соизмерим с системой измерения и аномалия находится в непосредственной близости к источнику.

В случае более сложной трехмерной модели с несколькими аномалиями восстанавливается объект, который вносит большее аномальное возмущение в измеряемый сигнал.

Программа для томографической инверсии требует дальнейшей доработки, а ее совместное использование с Modem3D позволит совершенствовать предлагаемый алгоритм, выявлять и устранять особенности, а в случае практического применения выбирать оптимальную систему наблюдений.

Авторы благодарят И.А. Кремера и М.И. Иванова за предоставленную возможность использовать программу Modem3D для научных расчётов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеин А.Н., Могилатов В.С., Антонов Е.Ю. Оценка возможностей приближенного (борновского) 3D моделирования для томографической инверсии данных зондирований становлением [электронный ресурс] // VI Всероссийская школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли: материалы – ЭМЗ-2013. URL: http://emf.ru/ems2013/section1/Шеин_Могилатов_Антонов.pdf (дата обращения 10.10.2013)
2. Шеин А. Н., Могилатов В. С., Антонов Е. Ю. Опробование томографической 3D-инверсии данных зондирований становлением на основе линейного (Борновского) приближения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 159–165.
3. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие. - Новосибирск: НГУ, 2002. - 208 с.
4. Шеин А.Н. Особенности программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2: материалы. - Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». – Старый Оскол, 2013. - С. 99–104.

© А. Н. Шеин, В. С. Могилатов, Е. Ю. Антонов, 2015

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАГНИТОМЕТРА ДЛЯ ЛЁГКИХ БПЛА ПРИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ ТРУБОК ВЗРЫВА

Андрей Петрович Фирсов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, тел. (383)330-07-81, e-mail: FirsovAP@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Злыгостев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-12, e-mail: ZligostevIN@ipgg.sbras.ru

Петр Георгиевич Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Андрей Васильевич Савлук

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)333-30-12, e-mail: SavlukAV@ipgg.sbras.ru

Петр Андреевич Вайсман

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-07-81, e-mail: ipgg@ipgg.sbras.ru

Александр Карлович Вальд

Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, тел. (391)206-22-22, e-mail: akwald@web.de

Александр Сергеевич Шеремет

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-07-81, e-mail: SheremetAS@ipgg.sbras.ru

Николай Денисович Евменов

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (383)333-03-99, e-mail: evmennik@mail.ru

Полевые испытания разработанного высокочастотного магнитометра для БПЛА сверхлегкого класса при исследовании Ербинского некка анкаратритов (Хакасия) показали высокую производительность при проведении магнитометрической съёмки. Применение высокочастотных магнитометров позволило получить более детальную информацию о пространственной структуре аномального магнитного поля. За счет высокой плотности наблюдения сделаны выводы о более сложном строении некка, чем считалось ранее.

Ключевые слова: магнитометр, аэрогеофизика, БПЛА, беспилотник, трубки взрыва.

THE USE OF HIGH-FREQUENCY MAGNETOMETER FOR LIGHT UAV GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF VOLCANIC PIPES

Andrey P. Firsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., tel. (383)330-07-81, e-mail: FirsovAP@ipgg.sbras.ru

Igor N. Zlygostev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Senior Researcher, tel. (383)333-30-12, e-mail: ZligostevIN@ipgg.sbras.ru

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Andrey V. Savluk

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)333-30-12, e-mail: SavlukAV@ipgg.sbras.ru

Petr A. Veisman

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Chief Engineer, tel. (383)330-07-81, e-mail: ipgg@ipgg.sbras.ru

Aleksandr K. Vald

Siberian Federal University, 660041, Russia, Krasnoyarsk, 79/10 Svobodny Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (391)206-22-22, e-mail: akwald@web.de

Aleksandr S. Sheremet

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)330-07-81, e-mail: SheremetAS@ipgg.sbras.ru

Nikolay D. Yevmenov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, tel. (383)333-03-99, e-mail: evmennik@mail.ru

Field tests of a high-frequency magnetometer for ultra-light UAV used to study the Erbinskiy ankaratrite neck (Khakasia) have shown high efficiency of magnetic survey by means of a new complex. The use of high-frequency magnetometers allows one to obtain more full information about structure of anomalous magnetic field. High density of observations permits one to conclude that the neck has a more complex structure than it thought previously.

Key words: magnetometer, aerogeophysics, UAV, unmanned aerial vehicle, volcanic pipes, explosive pipes.

Повышение ресурсной базы полезных ископаемых требует применения не только новых технологий добычи и обогащения, но в первую очередь проведения более детального геологического исследования плохо изученных территорий. Как правило, такие работы необходимо проводить в труднодоступных местностях, в тяжелых климатических условиях. Всё большую роль в мире

приобретают аэрогеофизические исследования, позволяющие локализовать площади для последующего детального геологического изучения. Стоимость выполнения таких работ растёт и становится сдерживающим фактором для поиска месторождений. Возможные открытия могут не окупить проведённые работы. Особенно это актуально в регионах с плохой инфраструктурой, например, редкой сетью аэродромов, что справедливо для большей части территории России. Для мелкомасштабной съёмки альтернативы традиционной аэрогеофизике нет. Использование аэрогеофизических методов становится финансово недоступным, особенно на стадии крупномасштабных поисков. Большое количество уже открытых аномалий требует их заверки: оконтуривания тел, изучения их морфологии. В этом случае заменить наземную съёмку ничем, несмотря на высокую стоимость работ. Совершенно очевидно, что возникла потребность проведения «технической революции» в этой области.

В 2014 году в ИНГГ СО РАН был разработан опытный образец аэрогеофизического комплекса с магнитометрическим каналом (ВМК), размещённым на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) сверхлёгкого класса. Летящая платформа комплекса представляет собой мультиротор (октокоптер) оригинальной конструкции со стандартным автопилотом. Полёты выполняются как в автоматизированном режиме (полёт по точкам), так и режиме ручного управления. Общий взлётный вес комплекса составляет около 7 кг. Измеритель индукции магнитного поля Земли выполнен на базе магнитомодуляционного преобразователя с полосой пропускания 3 кГц. Общий уровень магнитных помех магнитометрического канала при работе в составе комплекса, измеренный в условиях обсерватории Новосибирск, не превышает 1 нТл. Уровень магнитных шумов измерительной части, измеренный в условиях естественного магнитного поля Земли вдали от промышленных объектов и линий электропередач, не превышает 0.2 нТл. Частота измерений созданного магнитометрического канала – 1.5 кГц, при этом число достоверных двоичных разрядов равно 22.

Подобная система, смонтированная на беспилотном вертолёте среднего класса, создана в Германии [1], но она имеет уровень магнитных помех около 10 нТл, что значительно сокращает область её применения в геофизических исследованиях.

В июле 2014 года при помощи разработанного комплекса был исследован Ербинский нект ультраосновных щелочных пород, который, как нам представляется, может служить моделью для постановки работ по поиску алмазносных трубок взрыва.

Ербинский нект (рис. 1) анкаратритов находится в пределах Минусинской котловины в южной части Копьевского поднятия, в 8 км от крупнейшего Сорского медно-молибденового месторождения [2]. Эти породы образованы в ходе раннетриасового суперплюмового импульса за счет частичного плавления метасоматически измененной мантии [3]. Если на севере Сибирской платформы эти процессы привели к широкому развитию ультраосновных щелочных пород и карбонатитов в Маймеча-Котуйской провинции, то в Южной Сибири это отдельные дайки, неки, трубки взрыва. В анкаратритах Ербинского некта

наблюдаются высокие содержания легких лантаноидов, меди, молибдена, платины, урана, тория. По-видимому, пространственная связь анкаратритов Ербинского некка и Сорского месторождения не случайна.

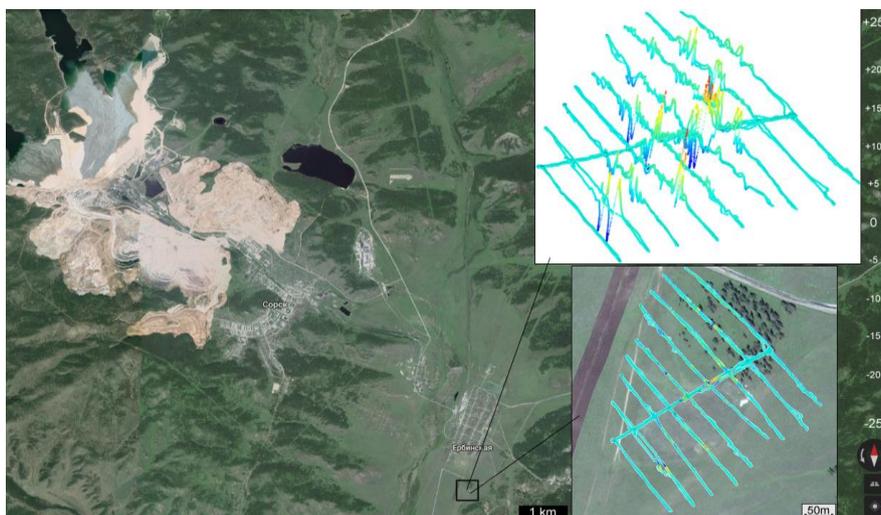


Рис. 1. Схема расположения Ербинского некка: в левой верхней части снимка – Сорский ГМК. Правая нижняя врезка – снимок Ербинского некка со схемой профилей магнитной съемки. Правая верхняя врезка – магнитное поле, измеренное ВМК

Морфологически некк представлен небольшим холмом элювиально-делювиальных обломков без выхода коренных пород размером около 350 м на 150 м. С помощью разработанного ВМК для БПЛА была проведена наземная съёмка некка. На рис. 2а показан профиль магнитного поля по магистрали, полученный по данным ВМК, а на рис. 2б – профиль, построенный по результатам съёмки протонным магнитометром ММРОС-1 с расстоянием между точками измерений 5 м. Измерения проводились при высоте первичного преобразователя около 0.8 м над поверхностью Земли в первом случае и около 1.5 м – во втором. Чувствительность ММРОС-1 – 0.02 нТл в 3-сек цикле и 0.05 нТл в 1-сек цикле, абсолютная погрешность – ± 0.5 нТл.

Сравнение аномального магнитного поля, полученного разными способами, показывает, что магнитное поле, измеренное ВМК, в целом совпадая с данными съёмки с помощью ММРОС 1, имеет более сложную структуру: содержит больше экстремумов с большей амплитудой.

Для более корректного сопоставления полученных данных была проведена пространственная фильтрация данных ВМК. Для этого данные, полученные с помощью ВМК, последовательно усреднялись по длине профиля в 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 раз. При усреднении в 64 раза (рис. 3) экстремумы на данных по совпадающим профилям совпали по количеству, но были в некоторых случаях смещены на несколько метров, а их амплитуда несколько выше, чем у данных, полученных с помощью протонного магнитометра.

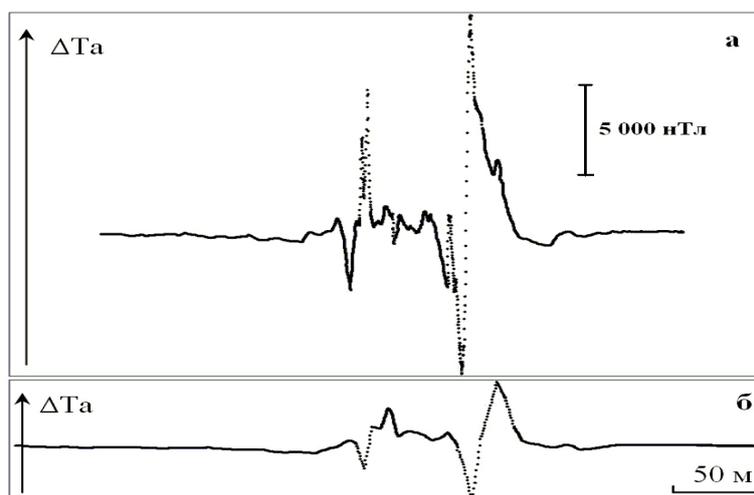


Рис. 2. Аномальное магнитное поле ΔT_a вдоль магистрали, измеренное ВМК (а) и ММРОС-1 (б)

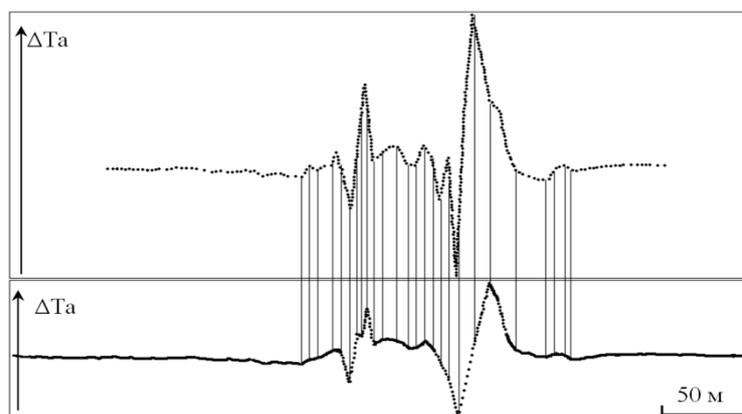


Рис. 3. Сравнение усредненных данных магнитной съёмки, полученных с помощью ВМК (верхний график) и ММРОС-1 (нижний график)

Имеющиеся различия при высоких градиентах аномального магнитного поля на данном объекте могут быть объяснены: - различной высотой первичного преобразователя магнитного поля над поверхностью Земли; - погрешностью определения координат точек измерения; - пропуском экстремальных значений магнитного поля.

Для наглядного объяснения преимуществ измерений с высокой пространственной плотностью предлагается простая модель. Предположим, что есть магнитное поле, которое будет измеряться абсолютно точным магнитометром с шагом 5 м и магнитометром, имеющим некоторую ошибку, но с частотой измерения в 20 раз больше. Такая модель представлена на рис. 4. Очевидно, что, несмотря на абсолютную точность измерений в точках в первом случае, общая кривая магнитного поля имеет существенно меньшее подобие «реальному» магнитному полю, чем поле, измеренное с помощью менее точного, но более

высокочастотного магнитометра. При ширине магнитных аномалий, сравнимых с шагом на профиле, невозможно каждый раз попадать на точку перегиба значения магнитного поля, что сдвигает измеренный экстремум относительно его реального положения и уменьшает его амплитуду. Важно следующее: так как величина аномалий магнитного поля на порядки больше чувствительности приборов, определяющим для точности описания магнитного поля является не точность магнитометра, а его рабочая частота. Увеличение плотности наблюдения с помощью более точного магнитометра ведет либо к существенному увеличению времени работ при сохранении точности измерений, либо, при увеличении частоты измерений падает их точность. В последнем случае точности приборов становятся сравнимы.

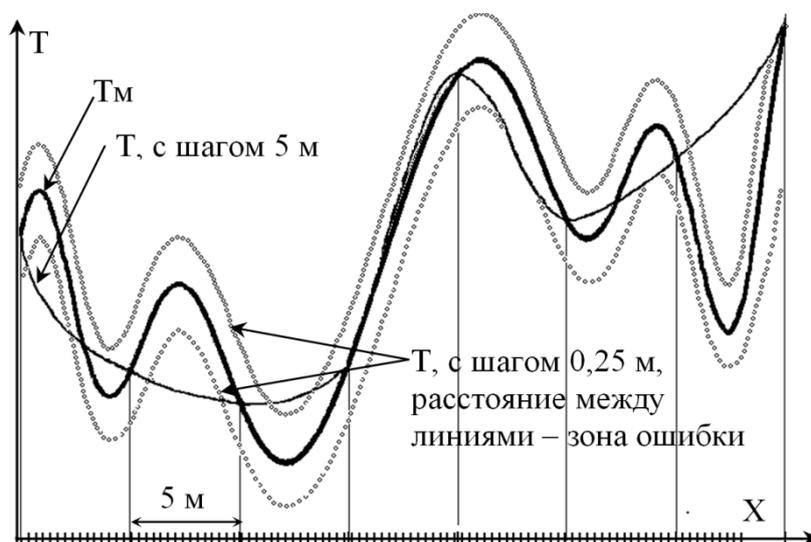


Рис. 4. Поле, измеренное с помощью абсолютно точного магнитометра: будет определяться точками на пересечении кривой «реального» магнитного поля с отсчетами на профиле по его длине, проведенными через определенный интервал

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tezkan B., Stoll J.B., Bergers R., Großbach H. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys // *First Break*. - 2011. - V. 29, N 4. - P. 103–105.
2. Геря В.И., Единцев Е.С. Постдевонский магматизм в северо-западном обрамлении Южно-Минусинской впадины // *Геология и геофизика*. - 1975. - № 4. - С. 39–44.
3. Рихванов Л.П., Ершов В.В., Сарнаев С.И. Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. Новосибирск: Наука, 1991. - С. 97–109.

© А. П. Фирсов, И. Н. Злыгостев, П. Г. Дядьков, А. В. Савчук, П. А. Вайсман, А. К. Вальд, А. С. Шеремет, Н. Д. Евменов, 2015

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКОВ С ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Наталья Викторовна Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-95-36, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Светлана Борисовна Бортникова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, тел. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Ольга Петровна Саева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-95-36, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

Приводятся результаты исследования хвостохранилищ отходов переработки сульфидных руд (Урской и Дюков Лог, Кемеровская область) с применением электротомографии и геохимических методов. Показано, что направления подземного и поверхностного дренажных стоков с хвостохранилищ прогнозируются при помощи комплекса геофизических методов с верификацией геохимическим опробованием контрастных геоэлектрических зон.

Ключевые слова: сульфидные отходы, дренажные стоки, электротомография, мониторинг, прогноз.

DIRECTIONS OF GROUNDWATER AND SURFACE RUNOFF FROM THE MINING TAILINGS ACCORDING GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL RESEARCH

Nataliya V. Yurkevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, PhD, tel. (383)330-95-36, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Svetlana B. Bortnikova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Professor, tel. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Olga P. Saeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, tel. (383)330-95-36, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента РФ (грант № МК-5724.2014.5) и РФФИ (гранты №№ 12-05-33019, 12-05-31137, 14-05-00293).

The investigations of mining tailings containing sulfide-bearing wastes (Urschi and Djukov Log, Kemerovo region) using electrical resistivity tomography and geochemical methods are presented in the article. The direction of groundwater and surface drainage stream from the tailings are predicted by means of geophysical methods with verification by geochemical sampling of the contrast geo-electric zones.

Key words: sulfide bearing wastes, drainage waters, electrical resistivity tomography, monitoring, forecast.

Разработка полиметаллических месторождений в 1930–1970х годах привело к стихийному образованию хранилищ отходов, до сих пор являющихся источниками поступления химических элементов (Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Co, Ni) в окружающую среду. Преобразование сульфидсодержащего вещества в результате окисления кислородом воздуха и воды приводит к интенсивному выносу растворенных форм металлов в подземные воды и речную сеть [1–3]. Урской отвал, расположенный в поселке Барит Кемеровской области (барит-пиритовая сыпучка из зоны окисления колчеданного Ново-Урского месторождения после извлечения золота цианированием), был образован в 30-х годах прошлого века. Дюков Лог – гидроотвал, расположенный в г. Салаир Кемеровской области, принимавший отходы Салаирского горно-обогатительного комбината в 1950-х годах. Урской отвал и Дюков лог объединяет сходство состава перерабатываемых руд и способ технологии – это отходы цианирования барит-колчеданных (Урской отвал) и барит-полиметаллических руд (Дюков лог). Представленные хранилища различаются по морфологическому типу (насыпной отвал и гидроотвал), что дает возможность понять разницу во внутренних структурах этих объектов с тем, чтобы можно было экстраполировать результаты на подобные техногенные тела. Хвостохранилища представляет интерес и с точки зрения повторного извлечения ценных компонентов, и с позиций оценки экологических рисков. Цель данной работы – определение направлений поверхностного и подземных стоков с хвостохранилищ Урской отвал и Дюков Лог с применением электротомографии и классических геохимических методов.

Методы исследования. Для определения направлений миграции дренажных растворов за пределами отвалов в 2013 году на каждом из объектов было сделано по 6 сдвоенных профилей электротомографии на площадке 355×100 м. Электротомография была применена для вертикального электрического зондирования при помощи многоэлектродной станции «Скала-48» (разработана и изготовлена в лаб. электромагнитных полей ИНГГ СО РАН [4]). Были сняты площадки с размерами 235 м * 130 м с использованием электрозведочной станции «Скала48». Использовалась установка Шлюмберже, шаг между электродами – 5 м, между профилями – 10 м. Обработку и интерпретацию полученных данных делали с помощью программы Res2D, визуализация осуществлялась в программе Surfer.

По результатам геофизической съемки выбирались места для выкапывания шурфов с целью геохимического опробования вертикальных разрезов. На месте из части каждой пробы изготавливалась суспензия (паста) (к твердому веще-

ству добавлялась дистиллированная вода в соотношении 2/1), и в ней замерялись значения рН и электропроводность. Другая часть пробы высушивалась и запаковывалась в герметичные полиэтиленовые пакеты для транспортировки. В лабораторных условиях пробы были гомогенизированы тщательным перемешиванием, расквартованы, часть пробы шла на истирание, из другой части делались водные вытяжки в соотношении твердое/вода = 1/10.

В истертых пробах вещества отходов был сделан элементный анализ методом РФА-СИ. Растворы водных вытяжек были отфильтрованы, разделены на несколько частей и проанализированы на значения рН и Eh, электропроводность, анионный и элементный составы (методом ИСП-АЭС).

Результаты. Фильтрация поровых растворов в направлении естественного стока приводит к циклическому выщелачиванию элементов из отходов и выносу их в подземные воды. Длительное время взаимодействия растворов с веществом отходов в поровом пространстве (вследствие медленной скорости подземной фильтрации) ведет к значительному концентрированию растворённых форм металлов в подземных потоках по сравнению с поверхностным стоком. Примером такого варианта развития событий является хвостохранилище Салаирского комбината Дюков Лог.

Геоэлектрическое строение хвостохранилища Дюков Лог демонстрирует четкую вертикальную зональность, указывающую на наличие протяженных низкоомных зон, в некоторых участках распространяющихся на глубину более 8 м. Зоны высокой проводимости (низкого удельного электрического сопротивления, далее УЭС) сменяются слабопроводящими горизонтами, играющими роль водоупоров (рис. 1).

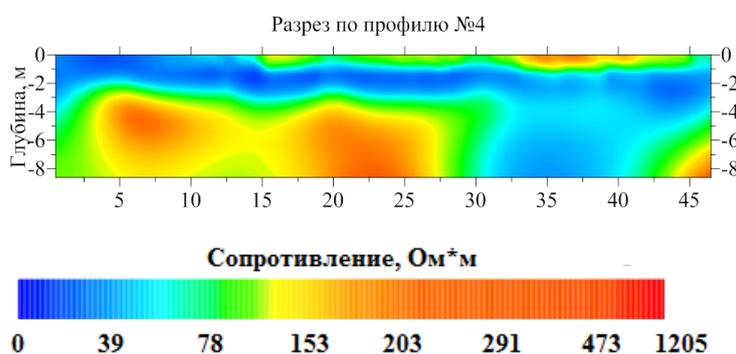


Рис. 1. Профиль электротомографии в южной части хвостохранилища Дюков лог

Результаты геохимического анализа вертикальных разрезов до гл. 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низкого сопротивления на разрезах к обводнённым горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы. В среднем, мощность хвостовых песков Дюкова логга – 5 м. Следовательно, обводнённые горизонты в приповерхностном про-

странстве по нарушенным структурам поставляют растворы во вмещающие хранилище породы, иллюстрацией чему служит, например, профиль № 4 (рис. 1). Далее растворы, достигая водоупора, стекают естественным образом в направлении наклона борта долины, в которой расположено хвостохранилище.

Выщелачивание металлов по ходу фильтрации иллюстрируется гораздо более значительным возрастанием их концентраций в придонном слое воды по сравнению с поверхностным и ещё большим – в поровых растворах (от Северного к Южному водоёму). В поровых водах отстойника, расположенного за пределами хвостохранилища, на природных известняках, Zn и Cd заметно снижают концентрации за счет нейтрализации и осаждения твёрдых фаз (рис. 2).

В данном случае идет фильтрация растворов от северной части хвостохранилища в южную и далее в отстойник, расположенный под дамбой для сбора и отстаивания дренажных растворов (рис. 2).

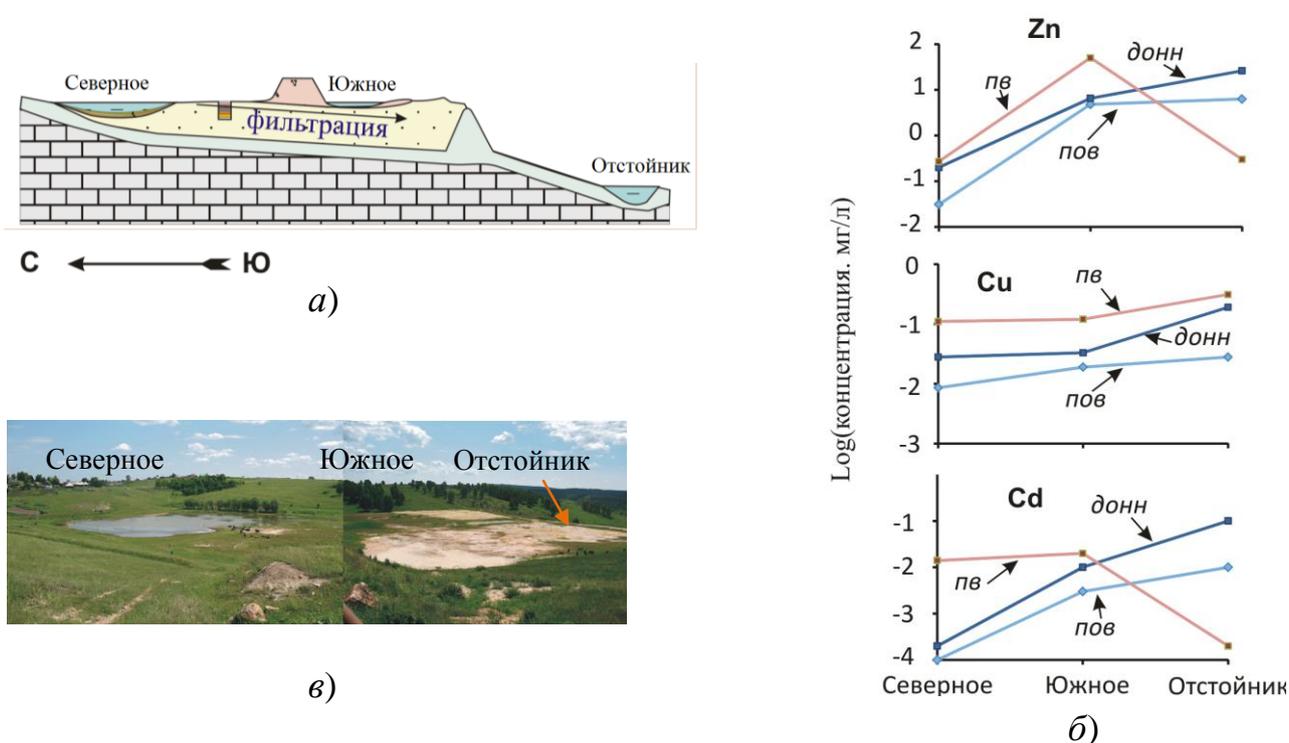


Рис. 2. Схематический разрез хвостохранилища Дюков Лог (а), изменение концентраций цинка, меди и кадмия в поверхностной воде водоёмов Дюкова лога (пов), их придонном слое (донн) и поровых растворах (пв) (б), фотографии северной и южной частей Дюкова Лога (в)

Однако, судя по данным геофизики, в отстойнике нейтрализуется лишь небольшая часть стока из хвостохранилища, попадающая туда, главным образом, из поверхностного ручья. Основной подземный поток, минуя отстойник, несёт суммарную нагрузку в виде выщелоченных из отходов металлов и затем в виде неявного дренажа попадает в р. М. Талмовая.

Наличие естественных геологических разломов в зонах распространения дренажных потоков приводит к миграции высокоминерализованных растворов в глубокие подземные горизонты. Примером служит дренажная система Урско-го отвала. Зональность профилей электротомографии дренажной системы Урско-го отвала даёт основание определить два направления подземной миграции растворов, причём не совпадающих с направлением поверхностного стока. Наиболее отчётливо направления поверхностного и подземного стоков иллюстрируются разноглубинными картами УЭС среды области распространения дренажа (рис. 3 а–д). В близповерхностном пространстве, до гл. 7 м подземный поток ориентирован так же, как и поверхностный ручей, субмеридионально (рис. 3 а, б, в). С гл. 10 м зона пониженного УЭС изменяет направление на юго-восточное, почти вкрест течению дренажного ручья (рис. 3 г, д), что соответствует природной разломной зоне на этом участке. Миграция дренажа в северо-западном направлении от первоначальной точки вертикального просачивания может быть связана с прониканием раствора в подземные воды по разлому.

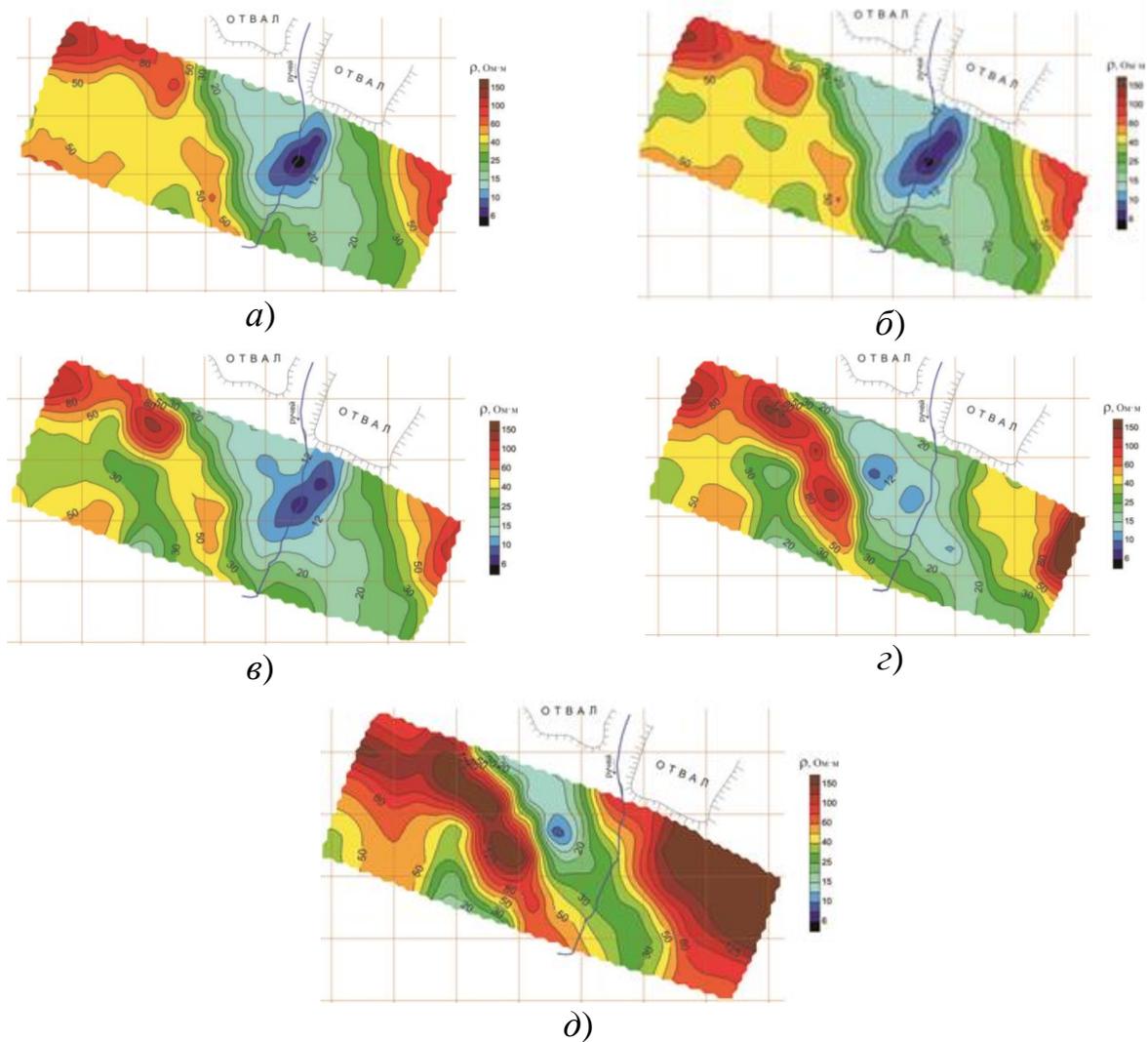


Рис. 3. Карты удельного электрического сопротивления пород на глубинах 1.25 м (а), 4 м (б), 7 м (в), 10 м (г), 15 м (д). Масштаб 1:2500

Подземная и поверхностная миграции дренажных вод с Урского отвала имеет практически противоположные направления. Полученный при помощи геофизических методов вывод имеет большое практическое значение при оценке опасности складированных отходов и, в частности, загрязнения грунтовых вод. Отметим, что отвал расположен в пределах пос. Урск, и в 100–200 м от него находятся дома частного сектора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bortnikova S., Manstein Y., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A. Acid mine drainage migration of Belovo zinc plant (South Siberia, Russia): multidisciplinary study // Water Security in the Mediterranean Region, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer, 2011. - P. 191–208.
2. Yurkevich N.V., Saeva O.P., Pal'chik N.A. As mobility in two mine tailings drainage systems and its removal from solution by natural geochemical barriers // Applied geochemistry. - 2012. - V. 27. - P. 2260–2270. - DOI 10.1016/j.apgeochem.2012.05.012.
3. Юркевич Н.В., Гаськова О.Л., Саева О.П., Корнеева Т.В. Формы миграции химических элементов из сульфидных отходов горнодобывающей промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2014. - Т. 2, № 3. - С. 163–169.
4. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Электромиграция: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. - 2012. - № 6. - С. 58–65

© Н. В. Юркевич, С. В. Бортникова, О. П. Саева, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>И. А. Азбаш, А. Ю. Соболев.</i> Создание геоэлектрических моделей среды для тестирования алгоритмов обработки данных электрокаротажа	3
2. <i>Г. П. Арнаутков, Е. Н. Калиш, Д. А. Носов, И. С. Сизиков, М. Г. Смирнов, Ю. Ф. Стусь.</i> Оценка последствий деформационных процессов в геологической среде юго-западной части Байкальского геодинамического полигона по данным гравиметрических и GPS наблюдений	8
3. <i>Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, Л. С. Соколова.</i> Теплопроводность пород баженовской свиты	14
4. <i>А. А. Брыксин, В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, Ю. И. Колесников, Е. А. Хогоев.</i> Локализация сейсмических возбуждений при гидро-разрыве пласта: классический и экспериментальный томографические подходы	20
5. <i>З. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева, В. А. Маринов.</i> Палеомагнитные исследования верхнемеловых отложений двух скважин на северо-востоке Западной Сибири (Красноярский край)	25
6. <i>А. А. Горбатенко, К. В. Сухорукова.</i> Подготовка данных электромагнитного каротажа в горизонтальных скважинах для численной интерпретации	30
7. <i>Е. С. Горностаева, В. В. Оленченко, Е. В. Павлов, М. В. Кириллов.</i> Оценка возможности электротомографии при изучении разломных зон для решения рудопоисковых задач	35
8. <i>Б. Г. Титов, В. М. Грузнов.</i> Стабилизация отклика полевого гамма-спектрометра	40
9. <i>В. В. Плоткин, Д. И. Губин.</i> Численная модель влияния приповерхностных и глубинных неоднородностей электропроводности при магнитотеллурическом зондировании	45
10. <i>А. Д. Дучков, Н. А. Голиков, А. А. Дучков, А. Ю. Манаков, М. Е. Пермяков, А. Н. Дробчик.</i> Лабораторная установка для изучения акустических свойств гидратосодержащих и мерзлых пород	51
11. <i>П. Г. Дядьков, Л. В. Цибизов, Д. А. Борисенко.</i> Методика учета интенсивных промышленных помех при проведении магнитной съемки	57
12. <i>С. А. Елагин.</i> Метод подавления нестационарных шумов при глубинном сейсмическом зондировании с использованием мощных виброисточников	63
13. <i>А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев, В. В. Ситников, Е. В. Лескова, Д. Г. Корабельщиков, А. В. Дураченко.</i> Основы системы сейсмологического мониторинга Кузбасса	68

14. <i>А. В. Злобинский, В. С. Могилатов.</i> Применение электроразведочных методов, использующих электромагнитные поля ТЕ и ТМ-поляризации, при изучении слабоконтрастных объектов.....	73
15. <i>С. А. Казанцев.</i> Повышение точности цифровых датчиков температуры DS18B20	79
16. <i>С. А. Казанцев, И. И. Фадеева.</i> Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород.....	82
17. <i>Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов.</i> Оценка параметров распределения размеров суперпарамагнитных частиц по импульсным характеристикам намагниченности: численный эксперимент	86
18. <i>И. А. Карпов, С. Б. Горикалёв, Д. М. Вишнеvский.</i> Определение изменения направления трещиноватости коллектора по данным ВСП.....	91
19. <i>Е. В. Карташов, В. А. Маринов, А. Н. Фомин.</i> Опыт применения пассивных концентраторов для геохимической съемки по левому берегу Ангардамской протоки дельты реки Лены.....	97
20. <i>Н. О. Кожевников.</i> Процесс выключения тока в незаземленной петле: от чего он зависит и насколько мы можем его контролировать.....	102
21. <i>Н. О. Кожевников.</i> Региональная структура Приольхонья по данным электромагнитных зондирований и метода ЕП	107
22. <i>П. Г. Дядьков, М. П. Козлова, Л. В. Цибизов, А. В. Михеева, Ю. М. Романенко.</i> Жесткие структурные элементы земной коры юго-запада Байкальского рифта по данным сейсмической активности.....	113
23. <i>Ю. И. Колесников, Е. А. Хогоев, В. С. Селезнев, А. А. Брыксин.</i> Влияние мощных вибраций на сейсмоакустическую эмиссию	118
24. <i>Г. М. Тригубович, Ф. М. Каменеvкий, А. В. Чернышев, А. В. Куклин.</i> Разделение индукционного и поляризационного полей при поиске полиметаллических руд	124
25. <i>О. А. Кучай, М. Е. Козина, З. А. Кальметьева.</i> Поля напряжений по афтершоковым последовательностям на Тянь-Шане	130
26. <i>В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, А. А. Брыксин, П. В. Громыко.</i> О причине аварии на Саяно-Шушенской ГЭС с точки зрения сейсмолога	136
27. <i>А. И. Макаров, А. В. Серяков, О. Б. Бочаров.</i> Влияние гравитационных сил на структуру зоны проникновения и измерения электромагнитного каротажа	141
28. <i>А. О. Малышева.</i> Газохроматографическое определение ацетона в воздухе	147
29. <i>А. С. Ефимов, Г. М. Тригубович, А. А. Белая, Е. Н. Махнач, А. В. Мамаева.</i> Локальный прогноз коллекторов в пределах Троицко-Михайловского вала на основе создания комплексной трехмерной модели резервуаров	151
30. <i>И. В. Михайлов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина.</i> Двумерная инверсия данных электромагнитного каротажа на основе метода конечных разностей и нелинейной минимизации.....	156

31. Ю. А. Копытенко, Н. Ф. Кротевич, М. Н. Никитенко. Размагничивание диа- и парамагнетиков, применяемых в приборах точной магнитометрии.....	161
32. А. А. Никитин, А. С. Сердюков, А. А. Дучков. Алгоритм расчета времен первых вступлений для решения трехмерных томографических задач с использованием вычислительных платформ с раздельной памятью	167
33. С. В. Барсуков, А. Б. Овчаренко, В. В. Павленов, С. Д. Саленко, А. С. Сверкунов, Г. М. Тригубович, Р. Ф. Шайдуллин, К. А. Шатилов. Аэрогеофизические комплексы серии «Импульс-А».....	173
34. М. А. Павлова, К. В. Сухорукова, В. Г. Эдер, В. Н. Глинских, А. Д. Камкина, А. Г. Замирайлова. Литолого-электрофизическая модель баженовской свиты участка Салымского месторождения по данным керна и электрометрии	178
35. М. Е. Пермяков, А. Д. Дучков, А. Ю. Манаков, Н. А. Манченко. Результаты измерения УЭС гидратосодержащих образцов в лаборатории.....	183
36. В. В. Плоткин. Возможности магнитотеллурического зондирования при синхронной регистрации данных в трех пунктах.....	189
37. П. В. Пономарев, Н. Н. Неведрова. Геоэлектрическое строение геодинамического полигона «Бельтир» в Чуйской впадине по данным метода сопротивлений	194
38. Б. И. Прилоус. Моделирование разрыва давлений на пологих геологических структурах	200
39. М. И. Протасов. Построение сейсмических изображений данных 3Д ВСП на основе гауссовых пучков	206
40. И. Е. Романенко. Восстановление вибрационного сигнала при работах ГСЗ на фоне нестационарных шумов путем минимизации и осреднения импульсной характеристики среды, рассчитанной по множеству реализаций.....	211
41. М. Г. Рохина, Н. Н. Неведрова. Результаты интерпретации данных нестационарных электромагнитных зондирований на нефтегазоносном участке Иркутской области с использованием геоинформационных технологий	217
42. Г. М. Тригубович, А. В. Чернышев, А. С. Сверкунов, С. В. Барсуков. Препроцессинг данных электромагнитного канала вертолетной аэрогеофизической системы серии «Импульс-Аэро»	222
43. М. В. Свиридов, А. П. Мосин, Ю. Е. Антонов, С. В. Мартаков. Программный комплекс MCWD для интерпретации сверхглубинных и азимутально-чувствительных измерений электромагнитного каротажа во время бурения	227
44. О. Б. Бочаров, А. В. Серяков. Влияние смачиваемости пород на разрушение песчаника во время бурения	232

45. <i>Г. М. Тригубович, А. А. Белая, А. В. Чернышев, Н. В. Симанкович.</i> Комплексная интерпретация электроразведочных данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе EM-DataProcessor	237
46. <i>В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников, А. В. Лисейкин, А. Е. Шенмайер.</i> К использованию поперечных волн на опорных профилях на востоке России	243
47. <i>В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников, В. Н. Капун, И. Е. Романенко, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер.</i> О некоторых технологических приемах повышения эффективности излучения групп мощных вибраторов при глубинных сейсмических исследованиях	249
48. <i>К. В. Сухорукова, В. С. Аржанцев, И. В. Суродин.</i> Сигналы бокового каротажного зондирования в наклонных скважинах по данным численного моделирования.....	255
49. <i>К. В. Сухорукова, О. В. Нечаев, А. М. Петров.</i> Численная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования на основе двумерной анизотропной модели	259
50. <i>В. Ю. Тимофеев, Е. Н. Калиш, М. Г. Валитов, Ю. Ф. Стусь, Р. Г. Кулинич, Д. Г. Ардюков, П. Ю. Горнов, А. В. Тимофеев, Д. А. Носов, И. С. Сизиков.</i> Косейсмические эффекты на континентальной окраине (космическая геодезия и гравиметрия)	264
51. <i>В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев.</i> Вариации приливных параметров и землетрясения	271
52. <i>В. В. Филатов.</i> Самоподобные процессы релаксации и вызванная поляризация гетерогенных сред	277
53. <i>Н. Н. Неведрова, А. Е. Шалагинов.</i> Характеристика активности разломных структур по данным нестационарных электромагнитных зондирований (на примере Горного Алтая).....	283
54. <i>А. Н. Шейн, Е. Ю. Антонов.</i> Исследование возможностей гальванических и индукционных установок при картировании трёхмерных объектов методом зондирования становлением поля	289
55. <i>А. Н. Шейн, В. С. Могилатов, Е. Ю. Антонов.</i> Ограничения томографического подхода 3D-инверсии данных зондирований становлением на основе линейного (борновского) приближения.....	294
56. <i>А. П. Фирсов, И. Н. Злыгостев, П. Г. Дядьков, А. В. Савлук, П. А. Вайсман, А. К. Вальд, А. С. Шеремет, Н. Д. Евменов.</i> Применение высокочастотного магнитометра для лёгких БПЛА при геолого-геофизическом изучении трубок взрыва	299
57. <i>Н. В. Юркевич, С. Б. Бортникова, О. П. Саева.</i> Направления подземного и поверхностного стоков с хвостохранилищ горнорудного производства по данным геофизических и геохимических исследований.....	305

CONTENTS

1. <i>I. A. Agbash, A. Y. Sobolev.</i> Geoelectric models for testing well-logging data processing algorithms	3
2. <i>G. P. Arnautov, Eu. N. Kalish, D. A. Nosov, I. S. Sizikov, M. G. Smirnov, Yu. F. Stus.</i> Evaluation of the effects deformation processes in geological environment in southwestern Baikal geodynamic polygon according to gravimetric and GPS measurements	8
3. <i>D. E. Ayunov, A. D. Duchkov, L. S. Sokolova.</i> Thermal conductivity of bazhenov formation rocks	14
4. <i>A. A. Bryksin, V. S. Seleznev, A. V. Liseikin, Yu. I. Kolesnikov, E. A. Hogoev.</i> The localization of seismic initiations while hydraulic fracturing process: classic and experimental approaches	20
5. <i>Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva, V. A. Marinov.</i> Paleomagnetic studies of the upper cretaceous sediments 2 wells in the north-east of Western Siberia (Krasnoyarsk region)	25
6. <i>A. A. Gorbatenko, K. V. Suhorukova.</i> Preprocessing of electromagnetic logging data in horizontal wells for numerical interpretation	30
7. <i>E. S. Gornostaeva, V. V. Olenchenko, E. V. Pavlov, M. V. Kirillov.</i> The appreciation capability of electrical resistivity tomography in the study fault to search for ore.....	35
8. <i>B. G. Titov, V. M. Gruznov.</i> Stabilization of the field gamma spectrometer response.....	40
9. <i>V. V. Plotkin, D. I. Gubin.</i> Numerical model of the influence of near-surface and deep conductivity inhomogeneities at magnetotelluric sounding	45
10. <i>A. D. Duchkov, N. A. Golikov, A. A. Duchkov, A. Yu. Manakov, M. E. Permyakov, A. N. Drobchik.</i> Laboratory setting for the study of acoustic properties of gas hydrate-bearing and frozen rocks	51
11. <i>P. G. Dyadkov, L. V. Tsibizov, D. A. Borisenko.</i> Method of the intensive industrial noise reduction during magnetic survey	57
12. <i>S. A. Elagin.</i> Non-stationary noise reduction method in deep sounding using big vibrators	63
13. <i>A. F. Emanov, A. A. Emanov, A. V. Fateev, V. V. Sitnikov, E. V. Leskova, D. G. Korabel'schikov, A. V. Durachenko.</i> Basis of the seismological monitoring system in Kuzbass	68
14. <i>A. V. Zlobinskiy, V. S. Mogilatov.</i> Using electrical prospecting TE&TM – polarization for testing weak contrast objects	73
15. <i>S. A. Kazantsev.</i> Improving the accuracy of digital temperature sensors DS18B20.....	79

16. <i>S. A. Kazantsev, I. I. Fadeeva</i> . Device for fast measurement of thermal diffusivity of loose rock	82
17. <i>Ya. K. Kamnev, N. O. Kozhevnikov, E. U. Antonov</i> . Estimating superparamagnetic particle size distribution from magnetization impulse response: numerical experiment	86
18. <i>I. A. Karpov, S. B. Gorshkalev, D. M. Vishnevskiy</i> . Determination of varying fracturing direction within reservoir on the basis of VSP data	91
19. <i>Eu. V. Kartashov, V. A. Marinov, A. N. Fomin</i> . Experience of using the passive concentrators for geochemical survey on the Angardam flow left bank of the Lena river delta	97
20. <i>N. O. Kozhevnikov</i> . Current turn-off in a horizontal transmitter loop: on what does it depend and to what extent we can control it	102
21. <i>N. O. Kozhevnikov</i> . Regional scale structure of Priolkhonye from electromagnetic sounding and SP surveys	107
22. <i>P. G. Dyadkov, M. P. Kozlova, L. V. Tsibizov, A. V. Mikheeva, Yu. M. Romanenko</i> . Ridgid crustal structural elements on the south-west part of Baikal rift based on seismic activity	113
23. <i>Yu. I. Kolesnikov, E. A. Hogojev, V. S. Seleznev, A. A. Bryksin</i> . The influence of strong vibrations on seismic-acoustic emission	118
24. <i>G. M. Trigubovich, F. M. Kamenetsky, A. V. Chernyshev, A. V. Kuklin</i> . Induction and polarization field separation in polymetallic ores exploration	124
25. <i>O. A. Kuchai, M. E. Kozina, Z. A. Kalmetieva</i> . Stress field after-shock sequence of the Tien Shan	130
26. <i>V. S. Seleznev, A. V. Liseikin, A. A. Bryksin, P. V. Gromiko</i> . About the cause of the accident at Sayano-Shushenskaya HPP: the seismologist's point of view	136
27. <i>A. I. Makarov, A. V. Seryakov, O. B. Bocharov</i> . Gravity effect on the invasion zone structure and resistivity log data	141
28. <i>A. O. Malysheva</i> . Gas chromatographic detection of acetone in air	147
29. <i>A. S. Efimov, G. M. Trigubovich, A. A. Belaya, E. N. Makhnach, A. V. Mamaeva</i> . Local prognosis of reservoirs within the Troicky-Mikhailovsky swell based on the integrated model of reservoirs	151
30. <i>I. V. Mikhaylov, V. N. Glinskikh, M. N. Nikitenko, I. V. Surodina</i> . 2D inversion of electromagnetic logging data based on the finite difference method and nonlinear minimization	156
31. <i>Yu. A. Kopytenko, N. F. Krotevich, M. N. Nikitenko</i> . Demagnetization of diamagnets and paramagnets utilized in the precision magnetometry measuring instruments	161
32. <i>A. A. Nikitin, A. S. Serdyukov, A. A. Duchkov</i> . Parallel implementation of seismic travelttime computation for 3D tomography on MPI platforms	167

33. <i>S. V. Barsukov, A. B. Ovcharenko, V. V. Pavlenov, S. D. Salenko, A. S. Sverkunov, G. M. Trigubovich, R. F. Shaidullin, K. A. Shatilov.</i> Aero-geophysical complexes of series «Impuls-A».....	173
34. <i>M. A. Pavlova, K. V. Suhorukova, V. G. Eder, V. N. Glinskikh, A. D. Kamkina, A. G. Zamirailova.</i> Lithological and geoelectrical models of the bazhenov formation by the data from Salym oilfield area.....	178
35. <i>M. E. Permyakov, A. D. Duchkov, A. Yu. Manakov, N. A. Manchenko.</i> Results of laboratory measurements of electrical resistivity of hydrate-bearing samples.....	183
36. <i>V. V. Plotkin.</i> Possibilities of magnetotelluric sounding at synchronous data recording in three points	189
37. <i>P. V. Ponomarev, N. N. Nevedrova.</i> Structure of «Beltir» geodynamic test ground in Chuya basin by resistivity method	194
38. <i>B. Iv. Prilous.</i> Simulation of rupture pressure in gently sloping geological structures.....	200
39. <i>M. I. Protasov.</i> Gaussian beam imaging of 3D VSP data.....	206
40. <i>I. E. Romanenko.</i> Vibration signal recovery against non-stationary noise in dss exploration, using impulse response minimization and averaging calculated on a set of realizations.....	211
41. <i>M. G. Rohina, N. N. Nevedrova.</i> The interpretation's results of tem-soundings at Irkutsk region petroleum-bearing land with the GIS-technologies.....	217
42. <i>G. M. Trigubovich, A. V. Chernyshev, A. S. Sverkunov, S. V. Barsukov.</i> Preprocessing of data of electromagnetic channel in «Impuls-aero» helicopter airborne system.....	222
43. <i>M. V. Sviridov, A. P. Mosin, Yu. E. Antonov, S. V. Martakov.</i> MCWD software package for interpretation of extra-deep and azimuthal LWD resistivity data.....	227
44. <i>O. B. Bocharov, A. V. Seryakov.</i> The rock wettability influence on the sandstone formation breakouts while drilling	232
45. <i>G. M. Trigubovich, A. A. Belaya, A. V. Chernyshev, N. V. Simankovich.</i> Complex interpretation of TEM and MT data in EM-DataProcessor program	237
46. <i>V. M. Solovyev, V. S. Seleznev, A. S. Salnikov, A. V. Liseikin, A. E. Shenmayer.</i> To usage of transverse waves on base lines in eastern Russia	243
47. <i>V. M. Solovyev, V. S. Seleznev, A. F. Emanov, A. S. Salnikov, V. N. Kashun, I. E. Romanenko, S. A. Elagin, A. E. Shenmayer.</i> About some processing methods for raise of emanation efficiency of high-pover vibrations group at deep seismic researches.....	249
48. <i>C. V. Sukhorukova, V. S. Arzhantsev, I. V. Surodina.</i> Lateral logging sounding signals calculated in inclined wells	255
49. <i>C. V. Sukhorukova, O. V. Nechaev, A. M. Petrov.</i> Numerical inversion of lateral logging sounding signals for 2D anisotropic model	259

50. <i>V. Yu. Timofeev, Eu. N. Kalish, M. G. Valitov, Yu. F. Stus, R. G. Kulinich, D. G. Ardyukov, P. Yu. Gornov, A. V. Timofeev, D. A. Nosov, I. S. Sizikov.</i> Coseismic effect at continental borderlands (space geodesy and gravity measurement).....	264
51. <i>V. Yu. Timofeev, E. I. Griбанова, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev.</i> Variation of tidal parameters and earthquakes.....	271
52. <i>V. V. Filatov.</i> The inhomogeneous media's induced polarization as a self-similar relaxation process.....	277
53. <i>N. N. Nevedrova, A. E. Shalaginov.</i> Characteristics of the activity of fault structures using tem data (for example Gornii Altai).....	283
54. <i>A. N. Shein, E. Yu. Antonov.</i> Investigation of possibilities of galvanic and induction tem-sounding systems for mapping 3D objects by tem	289
55. <i>A. N. Shein, V. S. Mogilatov, E. Yu. Antonov.</i> Limitations tomographic inversion of tem-data by approximate (born) 3D modelling	294
56. <i>A. P. Firsov, I. N. Zlygostev, P. G. Dyadkov, A. V. Savluk, P. A. Veisman, A. K. Vald, A. S. Sheremet, N. D. Yevmenov.</i> The use of high-frequency magnetometer for light UAV geological and geophysical studies of volcanic pipes.....	299
57. <i>N. V. Yurkevich, S. B. Bortnikova, O. P. Saeva.</i> Directions of groundwater and surface runoff from the mining tailings according geophysical and geochemical research	305

Научное издание

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

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

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 07.04.2015. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 18,54. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.