

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

XII Международные научный конгресс и выставка

## ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

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

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск  
СГУГиТ  
2016

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; научный руководитель Института  
нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск  
*А. Э. Конторович*

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

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

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному  
округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск  
*А. И. Неволько*

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

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля  
2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное  
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки  
месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т.  
Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 284 с.

ISBN 978-5-87693-904-3 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-902-9

ISBN 978-5-87693-901-2

В сборнике опубликованы материалы XII Международного научного конгресса  
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016», 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 978-5-87693-904-3 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-902-9

ISBN 978-5-87693-901-2

© СГУГиТ, 2016

*Научное издание*

XII Международные научный конгресс и выставка

# ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

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 *Л. Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 04.04.2016. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 16,51. 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.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА ДАННЫЕ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ**

### ***Олег Борисович Бочаров***

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, заместитель директора, тел. (383)332-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

### ***Александр Игоревич Макаров***

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: AlexanderI.Makarov@bakerhughes.com

### ***Антон Павлович Мосин***

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

### ***Александр Викторович Серяков***

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

В работе показано влияние технологических особенностей бурения интервала коллектора, таких как скорость проходки скважины, остановки при замене буровых свеч на изменение удельного электрического сопротивления в прискважинной области и измерения индукционного каротажа в процессе бурения. Для этого используется численное моделирование процесса проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, на основе которого рассчитывается распределение удельного электрического сопротивления в окрестности скважины, и сигналов индукционного каротажа в процессе бурения.

**Ключевые слова:** двухфазная фильтрация, зона проникновения, каротаж в процессе бурения, индукционный каротаж, режим бурения, геолого-технологические параметры.

## **THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS ON THE RESISTIVITY LOGGING WHILE DRILLING**

### ***Oleg B. Bocharov***

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Deputy Director, tel. (383)332-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

### ***Alexander I. Makarov***

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: AlexanderI.Makarov@bakerhughes.com

### ***Anton P. Mosin***

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

### ***Alexander V. Seryakov***

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, Russia, 630128, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

The present article demonstrates the effect that drilling technological parameters such as rate of penetration and stoppages duration while drill pipe change, may have on resistivity in a wellbore zone and induction LWD (logging while drilling) measurements. To reveal effect the numerical modeling of mud invasion is used to obtain the necessary data for resistivity calculation distribution in near-wellbore areas that are the input data for the induction-logging-signals computation.

**Key words:** two-phase filtration, invasion zone, while-drilling measurements, induction logging, drilling regime, geological-technological parameters.

В настоящее время для бурения скважин все чаще используются компоновки буровой колонны с приборами геофизических исследований скважины. Такие измерения, как традиционно считают, несут информацию об истинных свойствах пласта, наименее подверженных искажениям за счет внедрения фильтра бурового раствора в прискважинную зону, из-за небольшого, по сравнению с каротажем на кабеле, времени с момента вскрытия. Процесс проникновения бурового раствора в пласт приводит к вытеснению углеводородов в поровом пространстве и изменению удельного электрического сопротивления (УЭС) в окрестности скважины [1, 2]. Это сказывается на измерениях индукционного каротажа в процессе бурения [3]. Результаты электромагнитных измерений оказываются зависящими от расположения прибора относительно долота, технологических пауз, чувствительными к изменению скорости проходки, что может привести к неверному определению истинного удельного электрического сопротивления пласта.

Для моделирования процесса формирования зоны проникновения используется двумерная осесимметричная модель Баклея–Леверетта с учетом роста глинистой корки, скорости бурения интервала пласта, режима бурения скважины и эффекта гравитационных сил, связанного с различием плотности фильтра бурового раствора и пластовой нефти [4]. Для моделирования измерений индукционного и электрического каротажа применяется двумерная осесимметричная геоэлектрическая модель с произвольным количеством зон, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Рассмотрен однородный нефтенасыщенный горизонтальный пласт высокой проницаемости, залегающий между непроницаемыми глинистыми сланцевыми слоями, в котором пробуривается вертикальная скважина. Входные параметры для моделирования приведены в таблице.

На рис. 1 приведены примеры фильтрационного моделирования и расчета электросопротивления прискважинной зоны при непрерывном бурении с постоянной скоростью 10 м/ч и с технологической паузой длительностью 1 час. Момент расчета распределений электросопротивления – 3 часа с момента вскрытия кровли коллектора. На рисунке явно видно влияние остановки бурения на структуру зоны проникновения. В верхней части коллектора зона проникновения после возобновления бурения увеличилась на 5 см. Для рис. 1, а прибор индукционного каротажа располагается на глубине  $xx20$ м, а для случая на рис. 1, б положение прибора соответствует глубине  $xx10$ м.

Таблица

## Входные параметры для моделирования формирования зоны проникновения

Группа	Параметр	Значение
Свойства пласта	Абсолютная проницаемость	6000 мД
	Мощность пласта	20 м
	Константы фазовых проницаемостей воды и нефти	2.0, 3.0
	Пористость	25 %
	Начальная водонасыщенность	10 %
	Остаточная нефтенасыщенность	10 %
	Давление	200 атм
Свойства флюидов	Вязкость водной фазы	0.3 сП
	Вязкость пластовой нефти	3.0 сП
	Сопротивление бурового раствора	0.1 Ом·м
	Сопротивление пластовой воды	0.05 Ом·м
	Проницаемость глинистой корки	5 мД
	Превышение давления в скважине над пластовым в процессе бурения	40 атм
Параметры бурения	Гидростатическое превышение давления в скважине над пластовым	30 атм
	Продолжительность бурения перед технологической паузой	1 час
	Технологическая пауза	1 час
	Продолжительность бурения после технологической паузы	3 часа
	Расположение прибора индукционного каротажа от долота	10 м
	Скорость бурения скважины	10 м/ч
	Радиус скважины	0.108 м

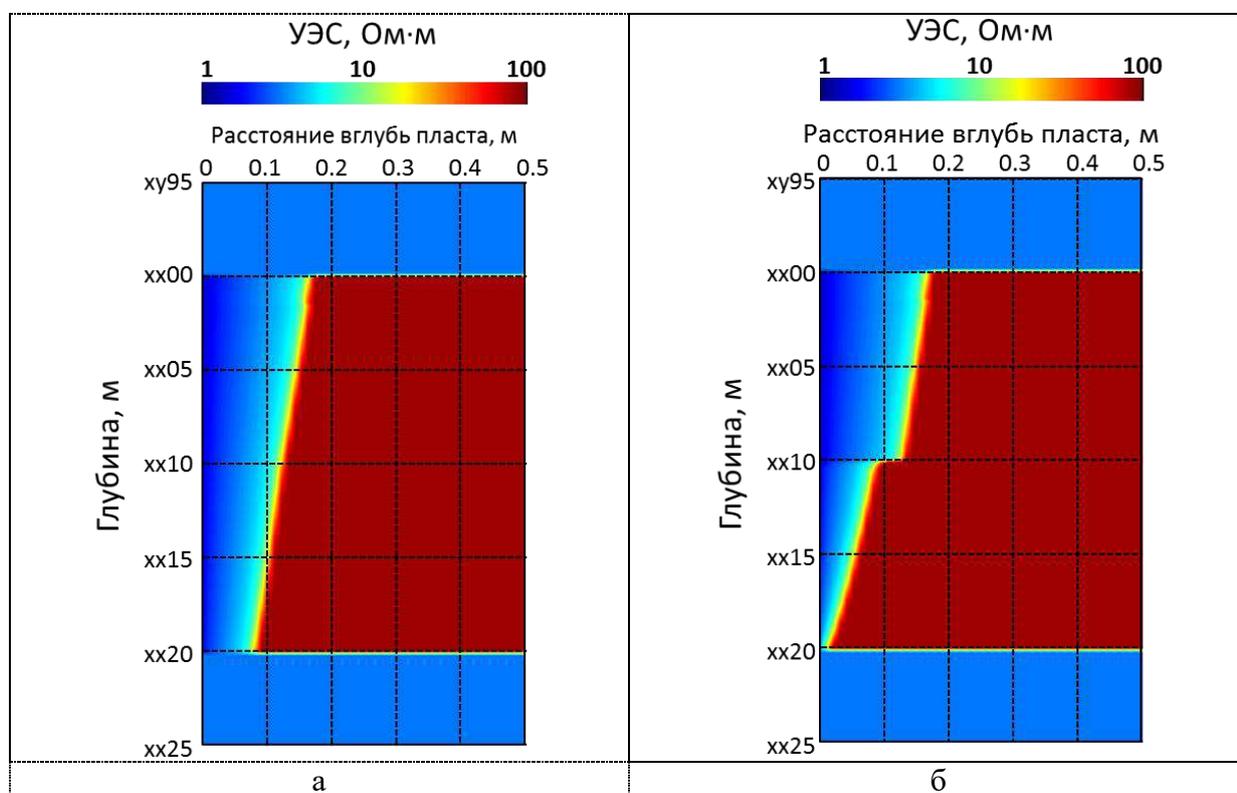


Рис. 1. Распределения УЭС, полученные в результате численного

моделирования процесса формирования зоны проникновения, в случае с непрерывным бурением (а) и в случае с остановкой бурения (б)

При анализе влияния зоны проникновения на измерения индукционного каротажа для каждого положения прибора производился расчет распределения УЭС зоны проникновения, соответствующий своему времени с момента начала бурения. На рис. 2 приведены примеры синтетических сигналов короткого зонда индукционного каротажа прибора MPR (Multy Propagation Resistivity), которые приведены в кажущихся удельных электрических сопротивлениях (кУЭС). На рис. 2, а приведены сигналы для случая непрерывного бурения, рис. 2, б – для случая с остановкой бурения. В обоих случаях наблюдается влияние зоны проникновения с пониженным УЭС. Для случая с остановкой бурения наблюдаются различия значений сигналов на интервале верхней и нижней частей коллектора, связанные с неоднородной структурой зоны проникновения.

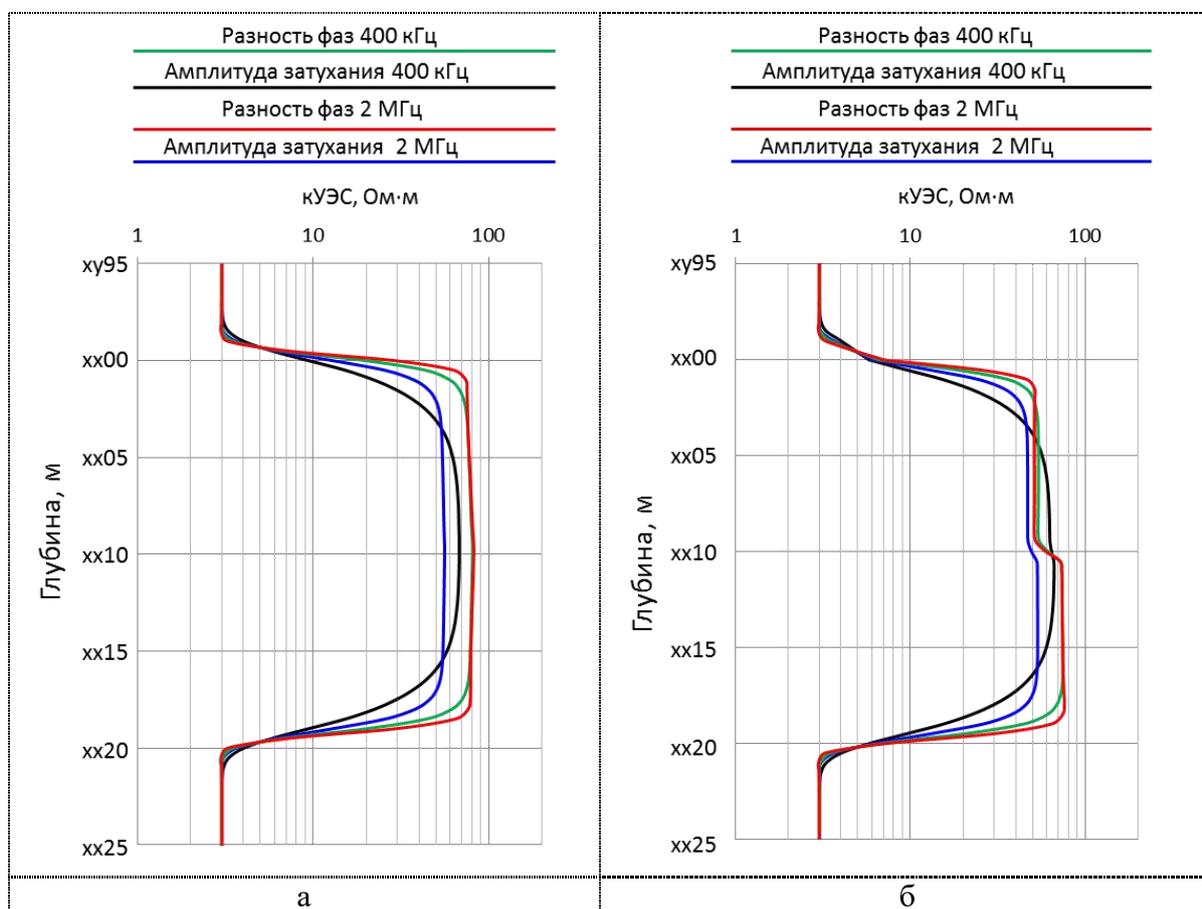


Рис. 2. Синтетические сигналы короткого зонда индукционного каротажа, рассчитанные на основе распределений УЭС, приведенных на рис. 1, а и 1, б соответственно

Результаты моделирования показывают, что технологическая пауза, сделанная в момент положения забоя в середине проницаемого пласта, приводит

к более глубокому проникновению бурового раствора в верхней части коллектора, чем в его нижней части. Это отражается на синтетических сигналах индукционного каротажа, что может привести к неверной оценке истинного удельного электрического сопротивления пласта.

Таким образом, в работе продемонстрировано, что на этапе обработки данных индукционного каротажа в процессе бурения необходимо использовать дополнительную геолого-технологическую информацию, содержащую данные обо всех технологических буровых операциях на скважине.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alpak F.O., C. Torres-Verdin, and T.M. Habashy. Petrophysical inversion of borehole array-induction logs: Part I – Numerical examples // Geophysics. - 2006. - Vol. 71. - N 4. - P. F101-F119.
2. Alpak F.O., C. Torres-Verdin, and T.M. Habashy. Petrophysical inversion of borehole array-induction logs: Part II – Field data examples // Geophysics. - 2006. - Vol. 71. - N 5. - P. G261-G268.
3. H. Maurer, Y. Antonov, B. Corley, R. Khokhar, M. Rabinovich, and Z. Zhou. Advanced Processing for a New Array Laterolog Tool // SPWLA 50th Annual Logging Symposium, June 21-24. - 2009. - 14 p.
4. Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // ПМТФ. - 2003. - Т. 44. - № 6. - С. 148-157.

© О. Б. Бочаров, А. И. Макаров, А. П. Мосин, А. В. Серяков, 2016

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

### *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; Институт горного дела СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

### *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, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

### *Александр Викторович Яблоков*

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

### *Глеб Станиславович Чернышов*

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: gleb\_chern@mail.ru

### *Петр Александрович Дергач*

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

На реальных данных апробирована методика определения строения и физико-механических свойств толщи приповерхностных связных грунтов на основе сейсмических наблюдений. Суть подхода заключается в использовании распределений продольных и поперечных скоростей, получаемых на основе комбинирования метода МПВ и многоканального анализа поверхностных волн. Для восстановления физико-механических свойств используются корреляционные зависимости. Приведен пример обработки полевых данных. Удалось определить уровень грунтовых вод (верховодка), выявить зоны, подверженные размыванию и деформациям. Результаты были сравнены с разрезом, полученным методом электроразведки.

**Ключевые слова:** малоглубинная сейсморазведка, МПВ, многоканальный анализ поверхностных волн, связные грунты, грунтовые воды, электроразведка.

## **SEISMIC EXPLORATION OF NEAR SURFACE SOIL STRUCTURE AND PROPERTIES**

### *Aleksander S. Serdyukov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher; Institute of Mining SB RAS, 630090, Russia, Krasny Prospect 54, Junior Researcher, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

### *Vladimir V. Olenchenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk,

Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

**Aleksander V. Yablokov**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Engineer, e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru

**Gleb S. Chernyshov**

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Student, e-mail: gleb\_chern@mail.ru

**Petr A. Dergach**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Engineer, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

We propose method of near surface soils structure and properties reconstruction using seismic data. The key idea is to utilize  $V_p$  and  $V_s$  profiles, constructed by combination of plus-minus and MASW methods. To obtain the physical and mechanical properties of soils the correlation formulas are used. The field data processing example is considered. The ground water level was found, zones subjected to deformations and erosion were detected. These results were compared with electrical resistivity cross-section.

**Key words:** near surface seismic exploration, MASW, soil properties, ground water level, geoelectrical methods.

## ВВЕДЕНИЕ

При проведении инженерно-геологических изысканий актуальны исследования физико-механических свойств горных пород и грунтов *in situ*. Результаты камеральной обработки кернов могут не соответствовать состоянию грунтов в месте их залегания. Особенно эта проблема актуальна для дисперсных грунтов. В работе решается задача определения физико-механических свойств связных дисперсных грунтов по данным сейсмозвездки. Важнейшие свойства, такие как влажность  $W$ , предел текучести  $W_m$ , плотность  $\rho$ , плотность скелета  $\rho_{ск}$ , модуль общей деформации  $E_o$ , могут быть с хорошей степенью точности найдены из скоростных разрезов продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. Корреляционные формулы приведены в методических рекомендациях [1]. Стандартный подход обработки однокомпонентных данных при проведении инженерно-геологических изысканий заключается в восстановлении распределения скоростей продольных волн методом МПВ, а скорости поперечных волн – по палеткам Кнопва [1]. Преимущество предлагаемой в работе методики заключается в использовании фазовых скоростей псевдорелеевских поверхностных волн для восстановления скоростей поперечных волн.

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СКОРОСТНЫХ РАЗРЕЗОВ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

Рассматриваются линейные системы наблюдений, оснащенные однокомпонентными вертикальными датчиками. Для построения скоростного разреза  $V_p$  используются времена первых вступлений волн. Для зоны малых скоростей характерны резкие перепады скоростей, наличие контрастных преломляющих границ. Наиболее эффективным подходом является метод преломленных волн МПВ. Для восстановления распределения скоростей поперечных волн нами используется метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [2]. Суть данного подхода сводится к построению слоистой модели на основе дисперсионных кривых фазовой скорости Релеевских волн. Данные кривые могут быть выделены при помощи спектрального анализа сейсмограмм за счет более высокого уровня энергии. Для задания начального распределения поперечных волн, границ слоев и значений продольных волн в слоях нами используется скоростной разрез, полученный при помощи МПВ.

### МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СКОРОСТНЫХ РАЗРЕЗОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Интерпретировать границы раздела среды можно путем сравнения  $V_p$  и  $V_s$ . В случае уровня грунтовых вод (УГВ) скорости поперечных волн, в отличие от продольных, не претерпевают резких изменений [1]. В случае литологических границ, расположенных выше УГВ, наблюдаются изменения  $V_p$  и  $V_s$ . Для литологических границ ниже УГВ могут наблюдаться резкие изменения  $V_s$  при незначительных изменениях  $V_p$  [1]. Важно использовать априорную геологическую информацию. Полезны также данные электроразведки. Определение физических и механических свойств связных дисперсных грунтов основано на корреляционных зависимостях, взятых нами из методических рекомендаций [1]. Данные формулы справедливы для неводонасыщенных грунтов выше УГВ при влажности менее 30 %. При сильном водонасыщении продольная волна фактически распространяется по жидкости и ее скорость слабо зависит от свойств породного скелета.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

Сейсморазведочные малоглубинные исследования были проведены в пригороде г. Новосибирска 08-10 октября 2015 года вдоль дороги Академгородок – Ключи в районе реки Каменушка. Расстояние между приемниками линейной системы наблюдений составляло 1 м. Использовались однокомпонентные вертикальные 10-герцовые сейсмоприемники. Пункты возбуждения (ПВ) располагались вдоль профиля наблюдений на расстоянии 5 м друг от друга. Во всех ПВ для возбуждения колебаний использовалась кувалда весом 5 кг, удары которой наносились по металлической подложке. На исследуемом участке дороги наблюдаются деформации дорожного полотна (просадки), плавуны. На рис. 1. показаны скоростные разрезы продольных

(вверху) и поперечных (внизу) волн. Граница в районе 4 м была интерпретирована как уровень грунтовых вод.

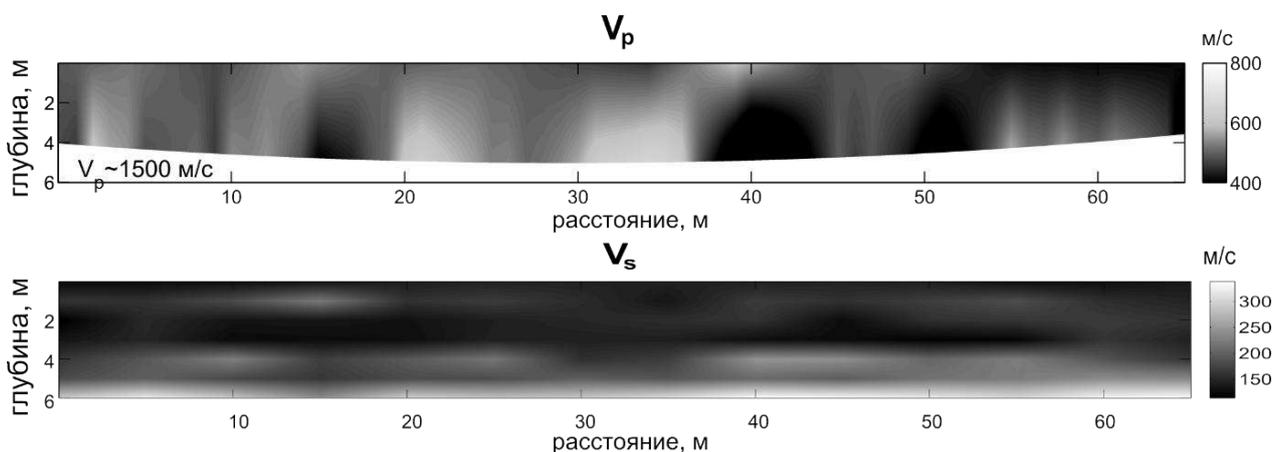


Рис. 1. Скоростные разрезы продольных (вверху) и поперечных (внизу) волн

На рис. 2 приведены результаты восстановления распределения свойств грунтов до глубины 3 м. На верхней части рис. 2. показано полученное отношение предела текучести к влажности. Значения, близкие к единице, являются индикатором перехода в текучее состояние при небольшом повышении влажности. В нижней части рис. 2 приведен модуль общей деформации, характеризующий сжимаемость грунта. Области с низкими значениями этого показателя наиболее подвержены деформациям. На рис. 3 приведен геоэлектрический разрез. Судя по всему, грунты представляют собой супеси. Наблюдаемые проблемные участки: просадки на участке профиля 12-24 м, плавуны (43-56 м) – соответствуют изменениям свойств. Прослеживается корреляция и с геоэлектрическим разрезом (зоны низкого УЭС в верхней части разреза на рис. 3). Некоторые несовпадения результатов сейсмических и геоэлектрических исследований могут быть связаны с тем, что исследования этими методами проведены с разницей в два месяца.

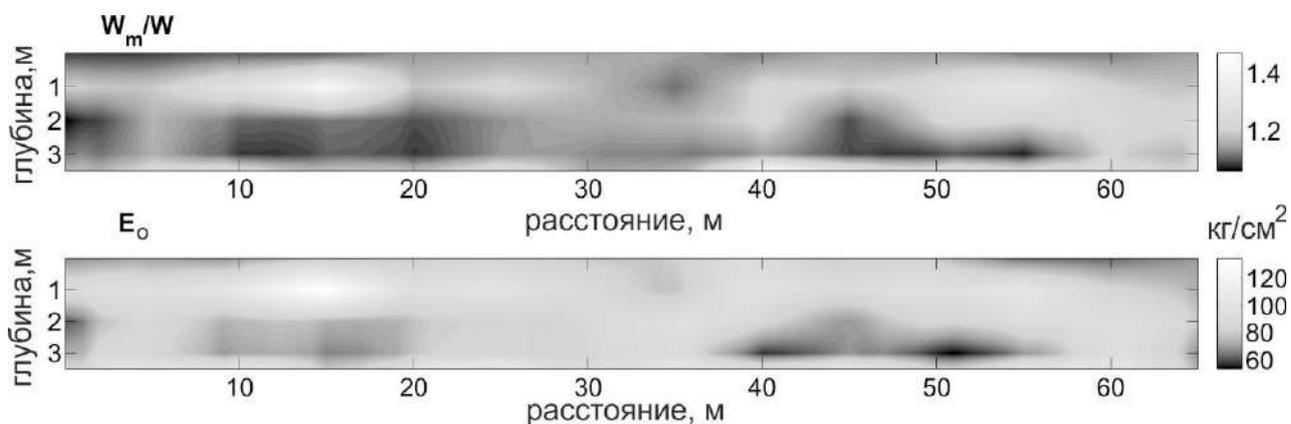


Рис. 2. Распределения свойств грунтов

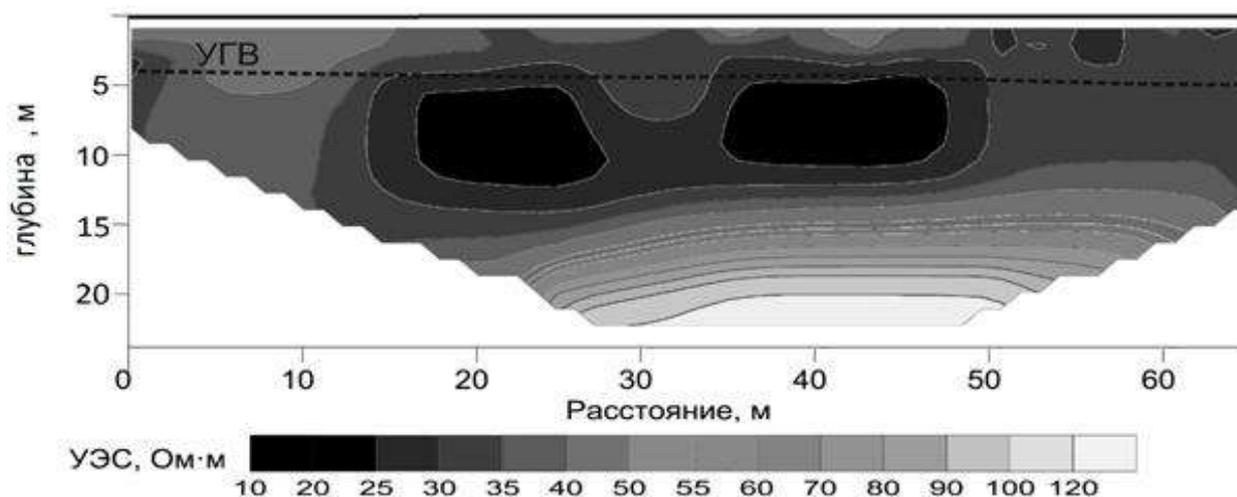


Рис. 3. Геоэлектрический разрез

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача исследования свойств связных грунтов на основе сейсмических наблюдений. Предложена методика построения разрезов сейсмических скоростей на основе преломленных и поверхностных волн. Физико-механические свойства определяются по корреляционным формулам. Приведен пример обработки полевых данных.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант РФФИ № 16-35-60062.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов. – М.: Изд-во Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства, 1976. - 71 с.
2. Park С.В., Miller R.D., Xia J., Ivanov J. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods // The Leading Edge. - 2007. - Vol. 26. - N 1. - P. 60-64.

© А. С. Сердюков, В. В. Оленченко, А. В. Яблоков,  
Г. С. Чернышов, П. А. Дергач, 2016

## **АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СЕРИИ «ИМПУЛЬС-ВП»**

### ***Андрей Сергеевич Сверкунов***

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

### ***Николай Иогансович Паули***

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, зав. лабораторией, тел. (383)222-42-03, e-mail: pauli@sniiggims.ru

### ***Андрей Иванович Попов***

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», 630099, Россия, г. Новосибирск, Октябрьская магистраль, 4, ведущий инженер, тел. (383)344-92-45, e-mail: andy@isp.nsc.ru

В статье приводятся основные характеристики и область применения аппаратного комплекса «Импульс-ВП», а также программное обеспечение для проведения геологоразведочных и инженерных работ методом вызванной поляризации, обработки и интерпретации данных.

**Ключевые слова:** «Импульс-ВП», электроразведка, телеметрическая аппаратура ВП, метод вызванной поляризации.

## **HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF «IMPULSE-IP» SERIES**

### ***Andrey S. Sverkunov***

Joint Stock Company «Siberian research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

### ***Nikolay I. Pauli***

Joint Stock Company «Siberian research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Chief of the Laboratory, tel. (383)222-42-03, e-mail: pauli@sniiggims.ru

### ***Andrey I. Popov***

Closed Joint Stock Company «AeroGeophysical Surveys», 630099, Russia, Novosibirsk, Oktyabrskaya Magistral 4, leading engineer, tel. (383)344-92-45, e-mail: andy@isp.nsc.ru

The paper discusses the main characteristics of the «Impulse-IP» equipment and the software for preprocessing and interpretation of data received in geological and engineering tasks using IP method.

**Key words:** «Impulse-IP», transient electromagnetics, telemetric IP equipment, induced polarization method.

Современная электроразведочная аппаратура серии "Импульс", предназначенная для проведения электроразведочных работ методом

зондирования становлением (ЗС) поля, применяется на рынке геофизического сервиса уже более 10 лет и позволила успешно решить множество поисково-оценочных задач на углеводороды, твердые полезные ископаемые, а также инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Особенностью аппаратуры серии "Импульс" является комплектация современным программным обеспечением для проведения электроразведочных работ, контроля и анализа данных, экспресс-интерпретации данных непосредственно в полевых условиях.

На основе значительного опыта в приборостроении и анализа существующих решений на рынке электроразведочной аппаратуры компанией "Аэрогеофизическая разведка" была разработана телеметрическая аппаратура серии "Импульс-ВП", которая предназначена для проведения работ методом вызванной поляризации, электропрофилеирования, вертикального электрического зондирования, естественного поля, заряженного тела.

Области применения аппаратуры серии "Импульс-ВП": нефтегазопромысловые работы, геологическое картирование, рудная электроразведка, инженерная геология, гидрогеология и геоэкологические исследования, электромагнитный мониторинг, 3D-исследования.

Аппаратура серии «Импульс-ВП» решает следующие задачи: выявление поляризующихся ореолов над газонефтяными залежами и выявление перспективных участков для бурения разведочных скважин [1]; оконтуривание газонефтяных залежей методом наземно-скважинной электроразведки; поиск глубокозалегающих медно-никелевых, полиметаллических, железорудных (магнетитовых) месторождений и месторождений углей [2]; изучение глубинного строения рудных районов (картирование рудоконтролирующих структур или рудовмещающих полей, изучение геоэлектрического разреза); разведка крутопадающих пластовых залежей, находящихся в синклинальных и антиклинальных складках; прослеживание рудных объектов методом заряда; прослеживание и дистанционный мониторинг подземных захоронений промышленных отходов.

Измерительный комплекс «Импульс-ВП» построен в виде набора автономных одно-, двух-, четырех- и восьмиканальных регистраторов – полевых модулей, которые связаны между собой цифровыми линиями связи. Количество присоединяемых каналов может варьироваться от 1 до 48. Цифровые данные поступают в управляющий компьютер в реальном масштабе времени, благодаря чему оператор может контролировать процесс измерения и при необходимости изменять параметры измерения: коэффициент усиления, ток питающей линии, входное усиление каналов и т. д.

Построение измерительной системы в виде набора самостоятельных «интеллектуальных» единиц (отдельных модулей), связанных между собой посредством телеметрии, позволяет значительно расширить круг решаемых задач,

а также: проводить работы в труднодоступных условиях; решить проблемы утечек, связанные с нарушением изоляции, в многопроводных косах,

приводящих к искажению сигнала; сократить время измерения (особенно это касается наземно-скважинной электроразведки, где время предоставления скважин строго регламентировано); уменьшить количество необходимого персонала

и транспортных средств и тем самым удешевить работы; обеспечить возможность разработок новых технологических подходов.

На рис. 1. изображен 4-х канальный измеритель «Импульс ВП4».



Рис. 1. Четырехканальный измерительный модуль «Импульс ВП4»

Основные технические характеристики аппаратуры «Импульс-ВП».

Измерительный канал:

- максимальное измеряемое напряжение сигнала – не менее 10 В;
- входное сопротивление – 10/1 МОм (задается оператором);
- диапазон времени измерения ВП – от  $50 \cdot 10^{-3}$  до 100 с;
- коэффициенты усиления: 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128;
- относительная погрешность измерения напряжения постоянного тока в диапазоне измеряемых напряжений  $3 \cdot 10^{-6}$ -10 В при числе накоплений 100 – не более 1 %.

– синхронизация: GPS

– интерфейс связи: RS-485

Генератор тока КТ-15:

- амплитуда биполярных импульсов тока – от 0.5 до 15 А;
- максимальная выходная мощность – 6 кВт;
- силовое питание – 3 фазы 380 В;
- длительность фронта выключения тока в эквиваленте генераторной петли 1000х1000м при токе  $(15 \pm 0,1)$  А – не более 1мс.

Генератор тока КТ-1:

- амплитуда биполярных импульсов тока – от 0.002 до 1 А;
- выходное напряжение – до 400 В;
- максимальная выходная мощность – 100 Вт;
- силовое питание – 12 В.

Для работы с оборудованием серии «Импульс-ВП» применяется программное обеспечение IPRecorder, которое предназначено для сбора, визуализации, контроля данных, а также для отображения и настройки параметров работы измерительных модулей. IPRecorder предоставляет оператору возможность предварительной обработки, фильтрации и оценки качества материала, что позволяет при необходимости выполнить повторные измерения, тем самым максимально исключить брак и повысить качество измеряемых сигналов.

Интерпретация данных ВП осуществляется в программном комплексе EM-DataProcessor [4], который позволяет строить планы распределений, разрезы кажущихся характеристик изучаемой геологической среды. Отличительной особенностью программного комплекса EM-DataProcessor является возможность совместной интерпретации данных ЗС и данных ВП, что позволяет значительно повысить достоверность результатов интерпретации.

На рис. 2. приведены результаты совместных работ ЗС и ВП на Агаскырском месторождении молибдена [3]. В методе вызванной поляризации длина питающей линии АВ составляла 250 м, размер приемных линий MN – 25 м. Значения выходного тока на участке работ, в зависимости от условий заземлений, составляли от 50 до 316 мА. В методе ЗС сторона квадратного генераторного контура составляла 125 м, ток в генераторе – 5 А, момент приемного датчика –  $72 \text{ м}^2$ .

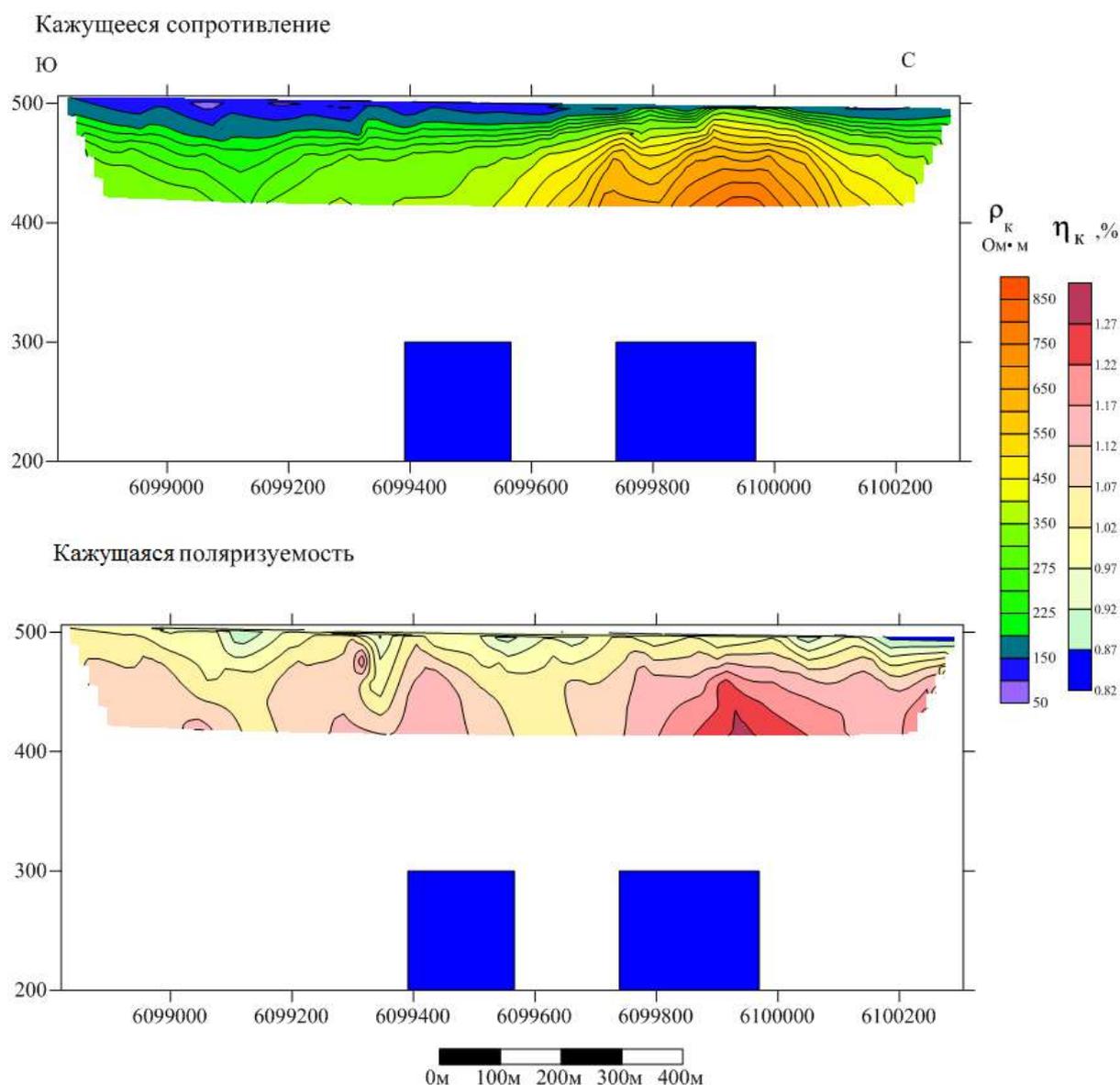


Рис. 2. Результаты совместной интерпретации данных ВП и М-ЗСБ

Уровень аномальной поляризуемости был незначителен относительно фонового значения, однако прослеживалась тенденция ее возрастания с глубиной. Очевидно, что рудный объект находится на глубине. В результате совместной интерпретации метода вызванной поляризации и М-ЗСБ на глубине около 200 м метров были локализованы объекты повышенной проводимости под выявленными аномалиями ВП.

Таким образом, разработана аппаратура "Импульс-ВП" и программный модуль, интегрированный в программный комплекс EM-DataProcessor оперативной 3D-инверсия данных импульсной индуктивной электроразведки. Совместное проведение работ ЗС и ВП значительно расширяет область решаемых геологических задач и повышает эффективность геофизических исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. - Новосибирск: Наука, 2002. - 150 с.
2. Моисеев В.С., Паули Н.И., Токарева М.Г. Объемное изучение поляризационных объектов повышенного и пониженного сопротивления // Материалы научного конгресса "ГЕО-Сибирь-2005". - Новосибирск: СГГА, 2005. - С. 127-130
3. Способ прогноза скрытого оруденения, связанного с гранитоидами: пат. на изобретение 2539838 РФ / В.Л. Хомичев, О.Г. Садур, Н.И. Паули. - Приоритет 16.06.2013. - Зарегистрирован в государственном реестре изобретений РФ 09.12.2014.
4. 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. 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. 95–101.

© А. С. Сверкунов, Н. И. Паули, А. И. Попов, 2016

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОДНОМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММ ВОРОНОГО**

*Алёна Александровна Сафиуллина*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, программист, тел. (913)921-94-57, e-mail: SafiulinaAA@ipgg.sbras.ru

*Александр Александрович Власов*

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. (923)221-31-13, e-mail: VlasovAA@ipgg.sbras.ru

В статье рассмотрено решение задачи автоматизации построения единой трехмерной геоэлектрической модели по результатам одномерной инверсии. Предложенный алгоритм основан на применении диаграмм Вороного. Параметры трехмерной модели адаптированы для программных средств «Modem3D», «EMF\_DC3Dmod», вычисляющих синтетические сигналы зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, диаграмма Вороного.

## **3D GEOELECTRIC MODELS BUILDING BASED ON 1D INTERPRETATION RESULTS USING VORONOI DIAGRAMS**

*Aliona A. Safiullina*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Programmer, tel. (913)921-94-57, e-mail: SafiulinaAA@ipgg.sbras.ru

*Aleksandr A. Vlasov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Research Scientist, tel. (923)221-31-13, e-mail VlasovAA@ipgg.sbras.ru

The article considers the solution automation for constructing a unified 3D geoelectrical models based on the results of 1D interpretation. The proposed algorithm is based on the Voronoi diagram application. The 3D model parameters are adapted for software tools, such as «Modem3D», «EMF\_DC3Dmod». This software simulates near-field time-domain electromagnetic sounding and vertical electrical sounding signals.

**Key words:** 3D modeling, the Voronoi diagram.

Рассмотрен способ автоматического построения трехмерных моделей из совокупности одномерных. Одномерная модель – распределение электрических свойств среды от глубины, привязанное к точке измерения. Таким образом, мы имеем набор точек на поверхности, каждой из которых соответствует одномерная модель. Для построения трехмерной модели необходимо «распространить» одномерную модель каждого пикета на некоторый объем. В

большинстве случаев сеть наблюдений неравномерная на поверхности земли, поэтому было принято решение использовать диаграмму Вороного для «распространения» модели в окрестности точки измерения. Для этого был создан отдельный программный комплекс.

На рис. 1 представлена общая схема взаимодействия программного комплекса. На вход программы построения трехмерных моделей подаются одномерные модели в файле определенного формата, который может быть составлен вручную или сгенерирован в программе EMS. Эта программа на основе координат пикетов строит диаграмму Вороного. Диаграмма Вороного позволяет разбить исследуемое пространство на многоугольники, образующие сетку пространственного распределения пикетов. Внутри каждого многоугольника находится ровно один пикет.

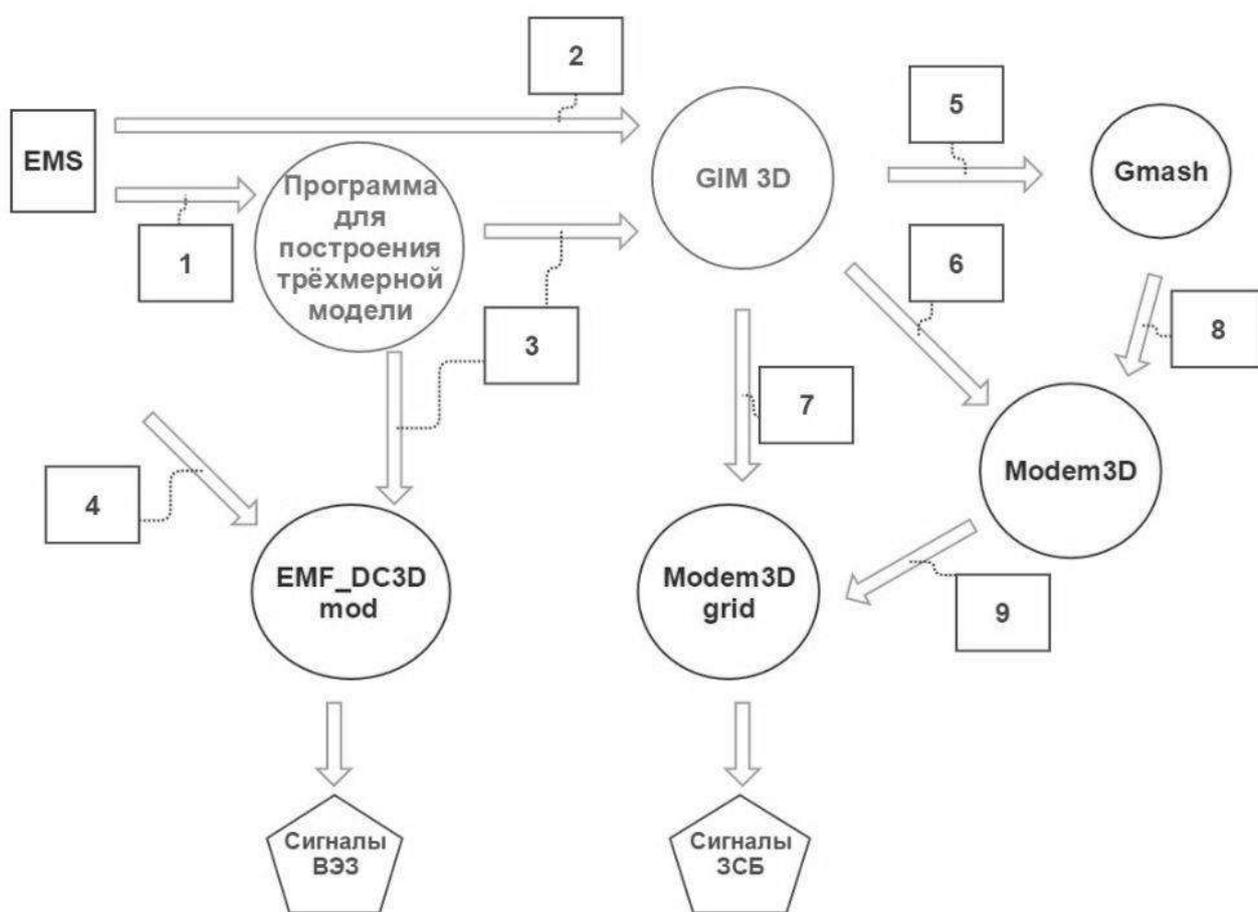


Рис. 1. Общая схема взаимодействия программного комплекса:

1 – одномерная модель; 2 – данные об измерительных установках ЗСБ; 3 – трехмерная модель; 4 – данные об измерительных установках ВЭЗ; 5 – файл с геометрией среды «\*.GEO»; 6 – файл с соотношениями «сопротивление–объем»; 7 – данные об измерительных установках ЗСБ; 8 – файл, содержащий трехмерную сетку «\*.MSH»; 9 – файл, содержащий трехмерную модель «\*.M3D»

Используя параметры одномерных моделей, соответствующих полигонам, строится трехмерная модель для каждого полигона отдельно. Для этого

задается координата  $Z$ , соответствующая мощности слоя. Попарно объединяя каждый многоугольник с многоугольником, следующим за ним по мощности (в рамках одного пикета), мы получаем многогранник, которому сопоставляется сопротивление слоя. Данные о мощности и сопротивлении берутся из входного файла. На этом этапе трехмерная модель не имеет графического представления и записывается в выходной текстовый файл определенного формата в виде набора координат.

В случае построения трехмерной модели по методу ЗСБ (рис. 2) координаты полученных трехмерных моделей передаются в программу Gmsh [1], которая является автоматическим генератором трехмерной расчетной сети. Для этого при помощи программы GIM 3D генерируется входной файл формата «\*.geo», содержащий необходимые параметры трехмерной модели. Данное программное средство позволяет построить трехмерную сеть, необходимую для построения верифицированной трехмерной модели в программе Modem3D, и записать параметры этой сетки в файл формата «\*.msh». Для каждого пикета необходимо создавать свой файл.

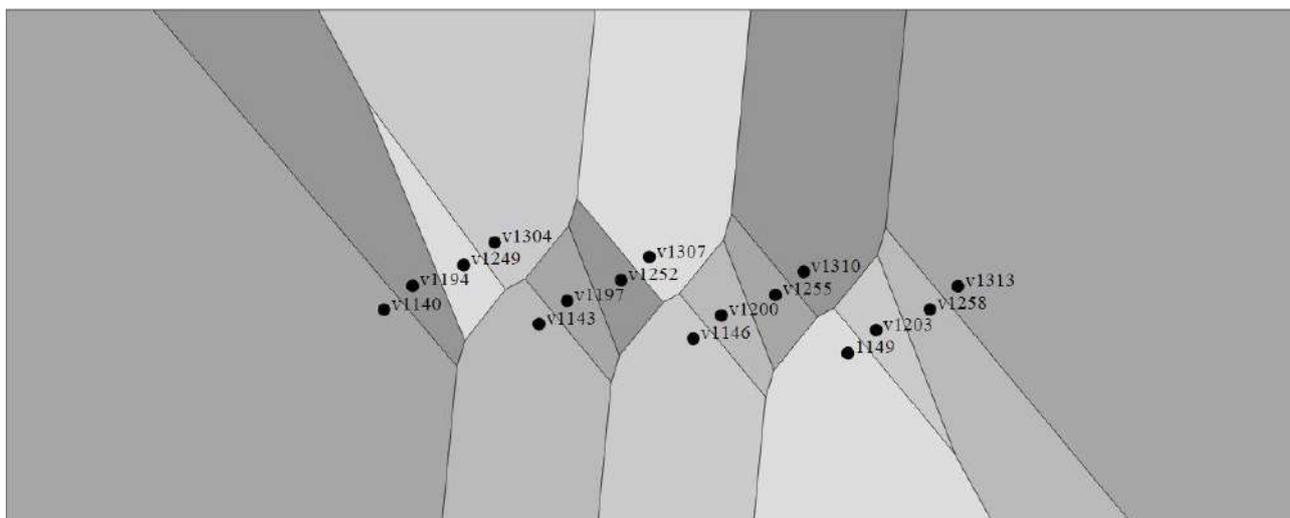


Рис. 2. Диаграмма Вороного для ЗСБ

Сложность создания трехмерной сети для каждой модели заключается в необходимости ее уплотнения в местах расположения генераторной и приемных петель. Трехмерная сеть может быть единой для моделирования сигналов

в каждом пикете или для каждого создаваться отдельно. В первом случае сеть получается большой и расчеты занимают значительное вычислительное время и оперативную память. Во втором случае сеть содержит меньшее количество узлов за счет того, что не делается уплотнение сети под каждой точкой, а только под той, которая обсчитывается. Следовательно, вычисления занимают меньшее время и требуют меньшее количество памяти. Но результаты

моделирования, выполненные на разных расчетных сетях, могут существенно отличаться.

В программу Modem3D [2], предназначенную для прямого моделирования процессов становления электромагнитных полей, передается набор файлов формата «\*.msh» и файл, содержащий в себе соотношения «сопротивление слоя – объем слоя», генерируемый программой GIM3D. Modem3D генерирует единую трехмерную модель из совокупности моделей, содержащихся в файлах формата «\*.msh», и записывает ее в файл формата «\*.M3D». После чего файл «\*.M3D», содержащий трехмерную модель, и файл, содержащий параметры измерительной установки, передаются в программу Modem3D для вычислений синтетических сигналов ЗСБ в ГРИД-среде Condor, развернутой в ИНГГ СО РАН [3].

Так как при построении трехмерной модели по методу ВЭЗ необходимо использовать усеченные треугольные призмы, каждый полигон разбивается на треугольники при помощи алгоритма триангуляции Делоне (рис. 3). Затем формируется файл, содержащий в себе триангулированные трехмерные модели, который, в свою очередь, передается в программу трехмерного моделирования на постоянном токе EMF\_DC3Dmod [4]. Данные об измерительных установках ВЭЗ передаются отдельно. Результатом работы программы являются смоделированные сигналы ВЭЗ.

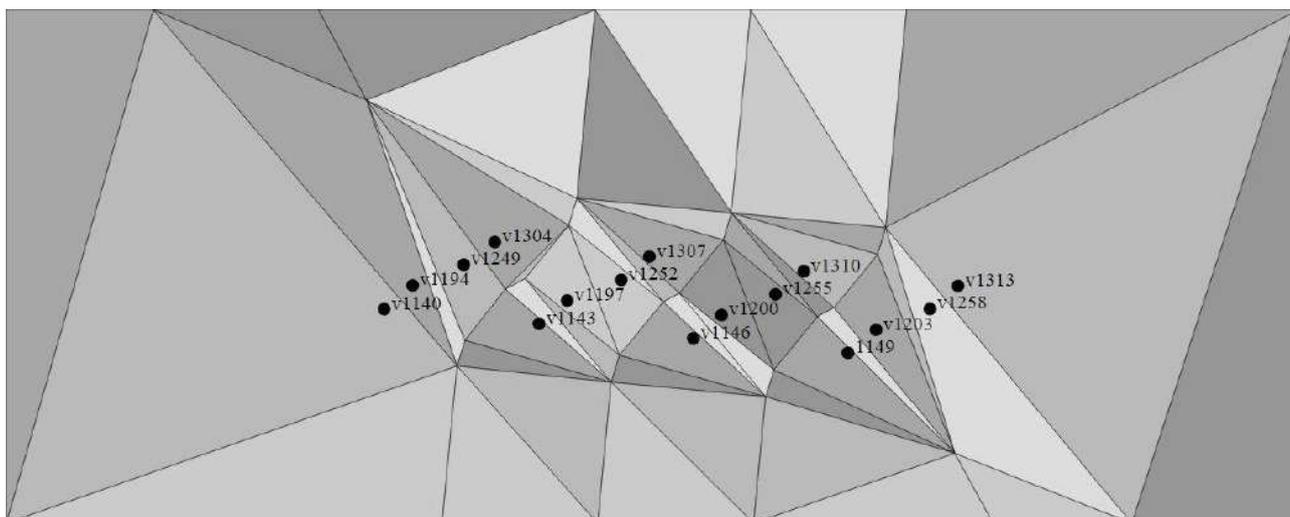


Рис. 3. Диаграмма Вороного для ВЭЗ (триангуляция полигонов)

Первые практические результаты автоматизации построения единой трехмерной геоэлектрической модели из набора одномерных [5] (на основе диаграмм Вороного) показывают хорошее применение данного подхода для простых моделей, где взаимное влияние соседних измерений невелико. Однако для более сложных моделей это только стартовое приближение, которое требует дальнейшего ручного улучшения. Соответственно, в случаях где неприменимы одномерные модели для толкования сложного разреза,

неприменим и предложенный в данной работе алгоритм. В дальнейшем планируется реализовать более гладкое распределение параметров модели между узлами сети наблюдений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мануал программы GMSH [Электронный ресурс]: Reference manual. URL: <http://gmsh.info> (дата обращения: 17.02.2016).
2. Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Журнал Записки Горного института. - 2009. - Т. 183. - С. 242-245.
3. 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 // НТВ "Каротажник". - 2011. - Вып. 11 (209). - С. 57-64.
4. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Суродина И.В. Трехмерное моделирование сложных геологических структур (на примере Тункинской впадины Байкальской рифтовой зоны) // Геофизика. - 2007. - № 1. - С. 36-41.
5. Санчаа А.М., Суродина И.В., Власов А.А., Неведрова Н.Н., Сафиуллина А.А. Подходы к составлению трехмерной геоэлектрической модели для численных расчетов // Междунар. конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015, посвященная 90-летию со дня рождения академика Г.И. Марчука», г. Новосибирск, 19-23 октября 2015г. - Новосибирск, 2015. - С. 52-53.

© А. А. Сафиуллина, А. А. Власов, 2016

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОГО УЧАСТКА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)**

*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. На основе геоинформационных систем результаты интерпретации полевых данных были проанализированы и сопоставлены с геологическими данными. В результате геолого-геофизического анализа обоснованы зоны, перспективные на углеводороды.

**Ключевые слова:** нефтегазоносный участок, метод зондирования становлением электромагнитного поля, детальная съемка, геоинформационные технологии, результаты интерпретации, 2-3D-визуализация, критерии нефтегазоносности.

## **GIS APPLICATION FOR THE INTERPRETATION AND ANALYSIS TEM-SOUNDINGS DATA (ON THE EXAMPLE OF EASTERN SIBERIA PETROLEUM-BEARING LAND)**

*Marina G. Rohina*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, 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, Koptuyug Prospect 3, 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 results of the field-data's interpretation are analyzed and compared with the geological data based on geoinformational systems. The perspective hydrocarbons' zones are substantiated as a result of the geological and geophysical analysis.

**Key words:** petroleum-bearing site, method of TEM soundings, detailed survey, GIS-technologies, results of the interpretation, two-dimensional and three-dimensional visualization, petroleum potential criteria.

Для поиска залежей углеводородов в районах Сибири успешно

применяется метод зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС), позволяющий получить электрофизические параметры разреза в широком диапазоне глубин [1]. Но в ходе интерпретации полевых данных ЗС необходимы не только полевые измерения, важны скважинные материалы с описанием основных литолого-стратиграфических комплексов и глубин их залегания, а также и точная координатная привязка пунктов ЗС и скважин, геологические, топографические карты изучаемого района, спутниковые снимки, достоверные сведения о рельефе земной поверхности. Для систематизации, визуализации всех имеющихся данных, анализа взаимосвязей объектов в пространстве оптимально использовать геоинформационные технологии [2].

В работе рассмотрен нефтегазоносный участок в Иркутской области Восточной Сибири, на котором проведена детальная площадная съемка методом ЗС с генераторными установками размером 600 x 600 м и приемными модульными рамками 18 x 18 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. В ходе всего процесса интерпретации активно использовался ГИС-пакет ESRI ArcGIS.

Сначала была составлена рабочая карта-схема расположения пунктов и скважин, выделены пункты ЗС с однотипными кривыми (рис. 1, а). Используя эту схему, были выбраны ближайшие к скважинам внутриконтурные пункты ЗС, по данным которых начинается построение стартовой геоэлектрической модели. Интерпретация проводилась с помощью программного комплекса EMS [3]. Полученные геоэлектрические модели практически для всех ЗС содержат 9 слоев, достаточно выдержанных по мощности и отличающихся по удельному сопротивлению. Согласно скважинным данным, все продуктивные пласты, выделяемые в венд-кембрийском комплексе (нижняя часть усольской, мотская серия свит), находятся в восьмом геоэлектрическом слое, залегающем на опорном горизонте (фундаменте).

По итогам интерпретации данных ЗС с помощью ESRI ArcGIS были построены детальные геоэлектрические разрезы по ряду функциональных профилей (цветовая гамма подобрана с использованием графического редактора CorelDRAW), карты распределения геоэлектрических параметров по площади для разных слоев разреза, а также трехмерные визуализации. Для построений были привлечены геологические и топографические карты разного масштаба,

с которых были снята необходимая информация о речной сети и геологических разломах, а также цифровые модели рельефа для получения абсолютных высотных отметок.

Рассматривая полученные геоэлектрические разрезы, можно отметить, что геоэлектрические границы хорошо совпадают с границами по скважинным данным. Для всех слоев разреза, включая продуктивный восьмой, благодаря высокоплотной съемке цветовая гамма детально отражает изменения удельного электрического сопротивления по латерали и с глубиной. Восьмой

геоэлектрический горизонт имеет наиболее низкие значения сопротивлений (рис. 2). В целом по участку глубины до фундамента изменяются от 1710 до 1805 м (от поверхности). Рельеф опорного горизонта характеризуется выраженными локальными поднятиями и прогибами. Некоторые прогибы хорошо соотносятся с руслами рек, протекающими в западной части территории, и с региональным разломом (по геологическим данным) в восточной части участка северо-восточного простирания. С учетом рельефа кровли для восьмого геоэлектрического горизонта была построена объемная модель распределения удельного электрического сопротивления (рис. 1, б), где хорошо видны аномальные зоны пониженных значений удельного сопротивления в западной и центральной частях участка, в том числе приуроченные к продуктивным скважинам.

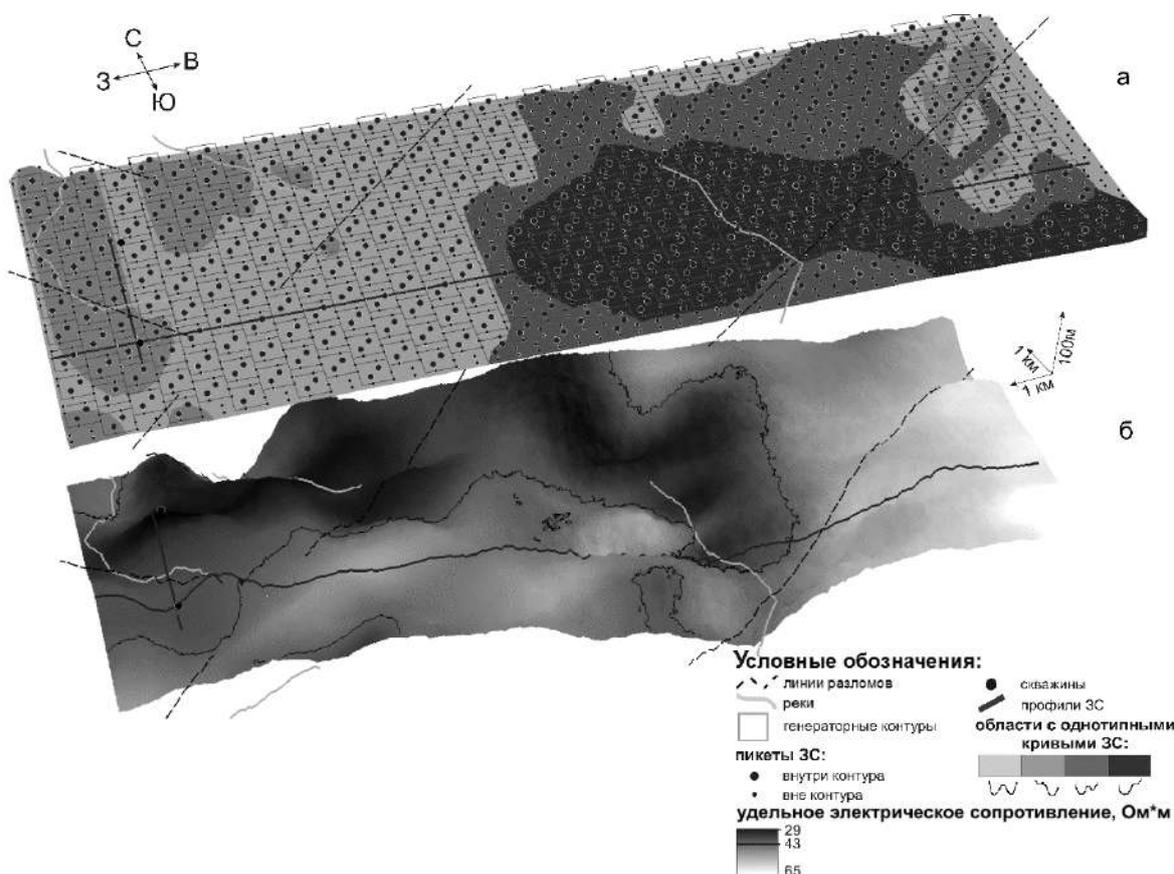


Рис. 1. Расположение пикетов зондирований (а); объемная модель распределения удельного электрического сопротивления восьмого геоэлектрического горизонта по итогам интерпретации данных ЗС (построено по поверхности кровли этого горизонта) (б)

Учитывая результаты предшествующих работ методом ЗС и опираясь на распределение УЭС в зонах скважин с притоком углеводородов, можно определить интервал УЭС в контуре продуктивности в 30-40 Ом·м. В восточной части планшета в области высокоомной аномалии УЭС возрастает до 55-60 Ом·м.

В процессе сопоставления результатов геофизической интерпретации с предоставленными геологическими данными также использовались ГИС-технологии.

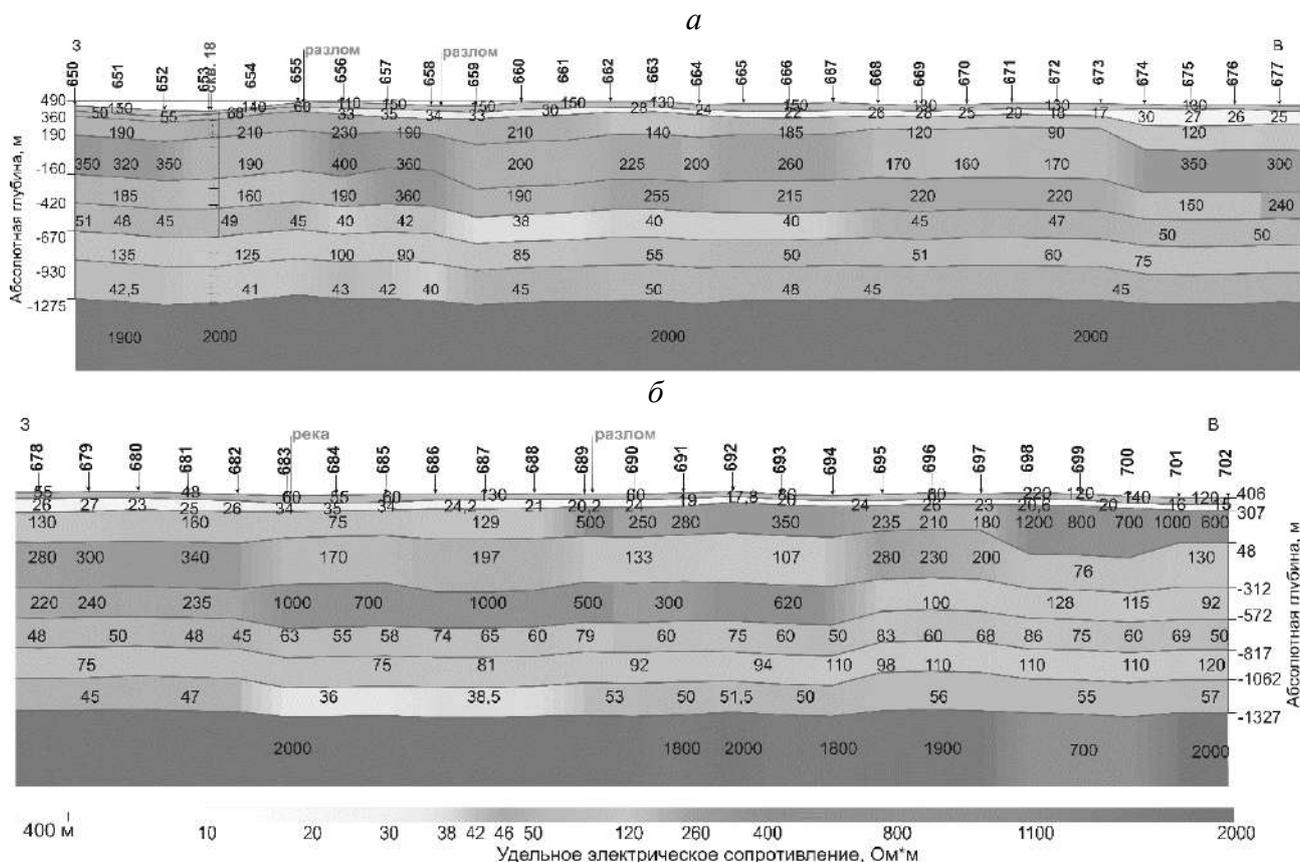


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по субширотному профилю, проходящему через скважину 18 (а – начало профиля, б – конец профиля)

На основании собственной методики ведущим геологом-нефтяником Шеминым Г.Г. [4] для западной части исследуемого участка был выполнен анализ перспектив на УВ для всех шести продуктивных горизонтов, входящих в восьмой геоэлектрический слой: осинскому, усть-кутским I и II, преображенскому, верхнечонским I и II. Геологические данные были сопоставлены с геоэлектрическими характеристиками. Подробные структурные карты кровли каждого продуктивного горизонта (по геологическим данным) позволили рассчитать глубины до кровли этих горизонтов в каждом пункте зондирования и продольную проводимость интервалов разреза, содержащих каждый из перечисленных продуктивных горизонтов, и построить карты распределений продольной проводимости. Сопоставление геолого-геофизических данных показало, что в площадном распределении проводимости слоев, содержащих продуктивные горизонты, зоны высокой проводимости принципиально совпадают с контурами перспективных земель на углеводороды (рис. 3).

Таким образом, на основе геолого-геофизической интерпретации зоны низкоомных аномалий (аномалий высокой проводимости) можно отнести к перспективным на УВ. Следует отметить, что ГИС-технологии используются на каждом этапе интерпретации и анализа.

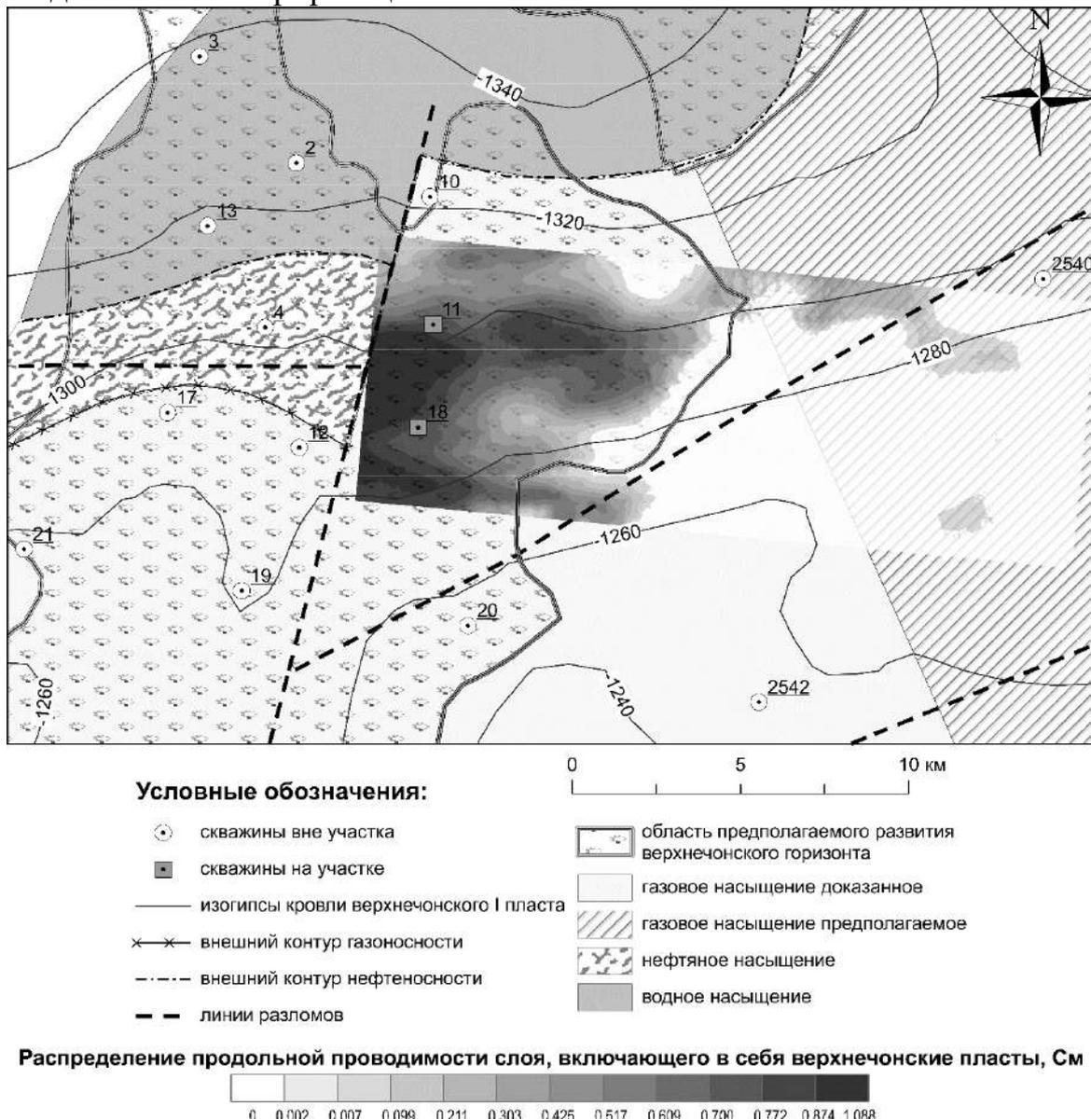


Рис. 3. Сопоставление распределения проводимости слоя, включающего верхнечонские пласты, с картой перспектив их нефтегазоносности

### 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. Хабинов О.Г, Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: сб. науч. ст. - Новосибирск, 2009. - С.108-113.

4. Шемин Г.Г. Модели строения и количественная оценка перспектив нефтегазоносности региональных резервуаров вендского терригенного макрокомплекса Предпатовского регионального прогиба (Сибирская платформа) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2013. - № 1(13). С. 23-29.

© М. Г. Рохина, Н. Н. Неведрова, 2016

УДК 550.837

## **ПРОЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ ПОРОД ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ ПРИ РАБОТАХ МЕТОДОМ ЗСБ НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ**

### ***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

### ***Юрий Александрович Агафонов***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (3952)78-01-84, e-mail: aua@ierp.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, доцент, зав. лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

### ***Игорь Владимирович Буддо***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (3952)78-01-84, e-mail: biv@ierp.ru

На поздних временах магнитная вязкость пород трапповой формации Сибирской платформы оказывает преобладающее влияние на индукционные переходные характеристики. Это затрудняет или делает невозможным их интерпретацию без учета магнитной вязкости. Идентификации эффектов магнитной вязкости способствует применение многоразносных установок.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, траппы, метод ЗСБ, магнитная вязкость.

## **THE EFFECT OF SIBERIAN FLOOD BASALT MAGNETIC VISCOSITY ON THE TEM SURVEY DATA**

### ***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

### ***Yury A. Agafonov***

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Ph. D., Director, tel. (3952)78-01-84, e-mail: aua@ierp.ru

***Evgeniy Yu. Antonov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

***Igor V. Buddo***

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Ph. D., Principal Geophysicist, tel. (3952)78-01-84, e-mail: biv@ierp.ru

Both field survey and forward modeling indicate that magnetic viscosity of the Siberian platform flood basalt has a determining effect on the late time TEM response, which makes difficult or even impossible interpretation of TEM data without regard for magnetic viscosity. The use of multi-offset arrays is favorable for identification of magnetic viscosity effect in the TEM data.

**Key words:** Siberian platform, flood basalt, TEM sounding method, magnetic viscosity.

Магнитная вязкость – одно из фундаментальных свойств ферромагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков по отношению к изменениям напряженности внешнего магнитного поля. В горных породах проявления магнитной вязкости связаны преимущественно с установлением и релаксацией намагниченности ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов – явлением суперпарамагнетизма.

Времена релаксации намагниченности суперпарамагнитных (СПМ) частиц ферромагнитных минералов составляют от  $10^{-9}$  до  $10^2$  и более секунд. В указанный временной интервал попадает диапазон времен регистрации, устанавливаемой ЭДС в геофизических методах зондирования становлением поля

в ближней зоне (ЗСБ) и переходных процессов (МПП), поэтому релаксация намагниченности суперпарамагнитных частиц оказывает влияние на индукционные переходные характеристики [3].

Результирующий сигнал в приемной петле представляет сумму ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , индуцируемых релаксацией намагниченности и вихревых токов соответственно. ЭДС  $e_1$  спадает обратно пропорционально первой степени времени  $t$ :  $e_1(t) \propto t^{-1}$ . ЭДС  $e_2$  убывает намного быстрее. Так, для однородного проводящего полупространства  $e_2(t) \propto t^{-5/2}$ . Поэтому с течением времени относительный вклад  $e_1(t)$  в суммарный сигнал неуклонно возрастает. Начиная с некоторого момента  $t_1$  влияние релаксации намагниченности становится преобладающим. Этот момент зависит от пространственного распределения удельной электропроводности и СПМ частиц, а также от размеров генераторно-приемной установки. При прочих равных условиях он наступает тем позже, чем больше разнос (размер) генераторно-приемной установки.

Влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики чаще всего отмечается при работе с установками небольших размеров. Это связано с тем, что в этом случае уже на сравнительно ранних

временах сигнал индукционного становления спадает до уровня шумов, тогда как ЭДС, индуцируемая релаксацией намагниченности, превышает этот уровень. Что касается установок большого размера, то еще недавно качество измерений переходных характеристик на поздних временах было недостаточным для того, чтобы «нюансы» измеряемого сигнала могли быть с уверенностью идентифицированы как проявления магнитной вязкости.

В последнее время «нюансы» все чаще отмечаются при работе с генераторными петлями большого размера и/или на больших разносах благодаря использованию мощных источников тока, прецизионных средств измерения, новых эффективных алгоритмов и программ для извлечения полезного сигнала из смеси «сигнал + шум».

При изучении геоэлектрического разреза юга Сибирской платформы широко применяется схема измерений, показанная в нижней части рис. 1, а: на каждом пункте зондирования выполняются пятью установками – одной соосной и четырьмя разнесенными, при этом положение генераторной петли остается неизменным. Длина стороны генераторной петли обычно составляет 400-600 м, разносы ( $r$ ) – 0 (соосная установка), 500 и 1000 м.

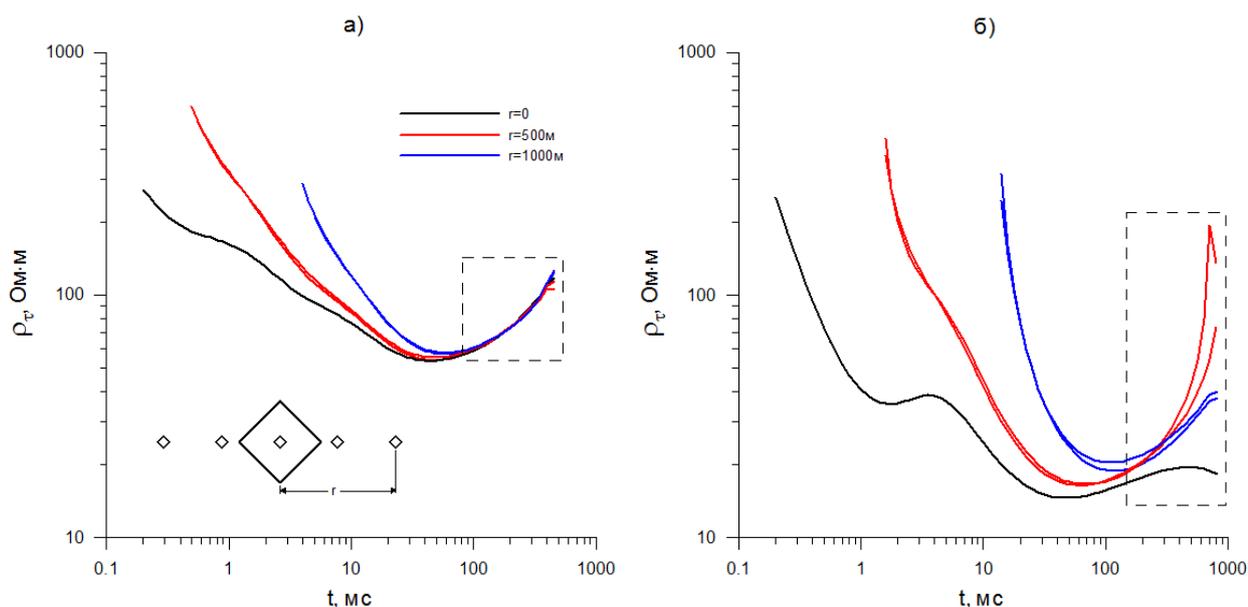


Рис. 1. Кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные на нескольких разносах: а) в пределах Ангаро-Ленской ступени; б) на участке, где верхняя часть разреза сложена породами трапповой формации

В большинстве случаев кривые ЗСБ, измеренные многоразносными установками на юге Сибирской платформы, на поздних временах совпадают. На рис. 1, а показаны кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{\tau}$  для одного из участков в пределах Ангаро-Ленской ступени. Размер генераторной петли составлял 500 м x 500 м, приемной – 18 м x 18 м. На ранних временах переходные характеристики расходятся, однако наблюдается симметрия: при одинаковом разносе зарегистрированы идентичные кривые  $\rho_{\tau}$ .

Рис. 1, б иллюстрирует ситуацию, впервые отмеченную в работе [1] и наблюдающуюся при работах методом ЗСБ на участках, где верхняя часть разреза сложена породами трапповой формации (особенно туфами). В отличие от рассмотренного выше случая, в области поздних времен кривые  $\rho_{\tau}$ , измеренные разнесенными установками, расходятся. При этом правая ветвь кривой  $\rho_{\tau}$  для соосной установки располагается ниже по отношению к правым ветвям кривых для установки с разномом 1000 м, а те, в свою очередь, – ниже правых ветвей кривых  $\rho_{\tau}$  для  $r=500$ м. С течением времени расхождение между значениями  $\rho_{\tau}$  при разных разносах все быстрее увеличивается. Индивидуальная инверсия поздних участков кривых ЗСБ, а тем более их совместная инверсия, в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей среды не представляется возможной.

Вследствие высокого содержания СПМ зерен породы трапповой формации характеризуются интенсивными проявлениями магнитной вязкости [1, 2]. Поэтому можно предположить, что именно магнитная вязкость является причиной отмеченного расхождения. Это предположение согласуется с результатами математического моделирования индукционных переходных характеристик (рис. 2). Расчеты проводились в частотной области, после чего осуществлялась трансформация во временную область. Влияние магнитной вязкости учитывалось путем использования комплексной, частотно-зависимой магнитной восприимчивости

$$\kappa(\omega) = \Delta\kappa \left[ 1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{1 + j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_1} \right],$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $j=(-1)^{1/2}$ ;  $\tau_1, \tau_2$  – нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации;  $\Delta\kappa$  – разница между значениями магнитной восприимчивости на низкой ( $\omega \ll 1/\tau_2$ ) и высокой ( $\omega \gg 1/\tau_1$ ) частотах. Расчеты выполнены для  $\Delta\kappa$  в диапазоне от 0 (отсутствие магнитной вязкости) до  $10^{-2}$  ед. СИ (сильное проявление магнитной вязкости). При выполнении расчетов было принято, что  $\tau_1=10^{-6}$ с,  $\tau_2=10^6$  с.

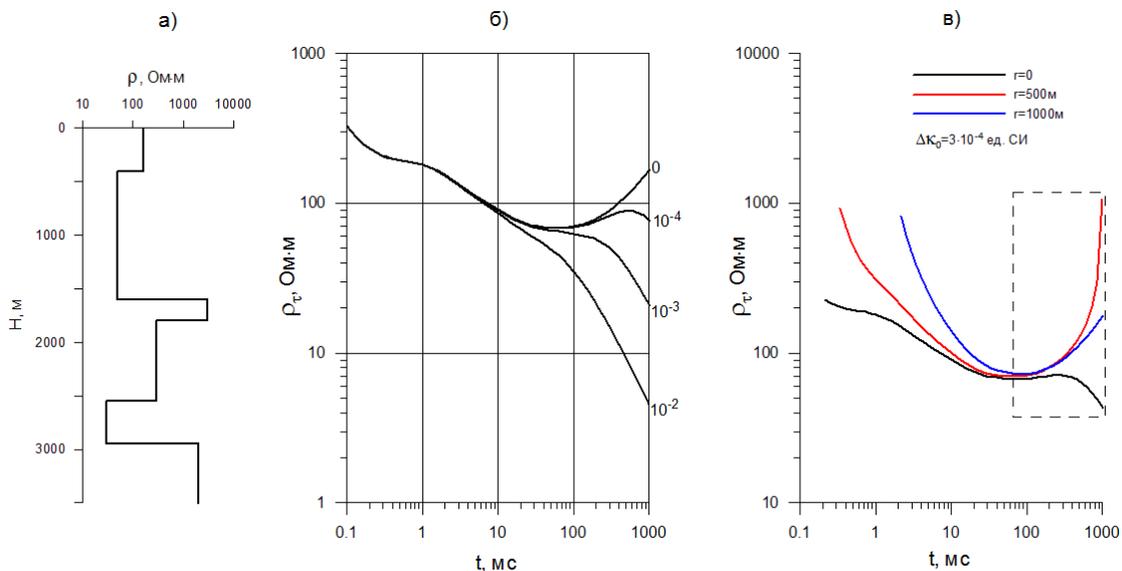


Рис. 2. Геоэлектрическая модель осадочного чехла Сибирской платформы, типичная для участков, где верхняя часть разреза представлена туфами (а); кривые  $\rho_{\tau}$ : для соосной (б) и многоразносной (в) установок. Шифр кривых на рис. 2, б –  $\Delta k$ , ед. СИ

На рис. 2, а показана геоэлектрическая модель осадочного чехла Сибирской платформы, типичная для участков, где верхняя часть разреза представлена туфами. Рис. 2, б иллюстрирует влияние магнитной вязкости верхнего слоя на кривые кажущегося удельного сопротивления для соосной установки. Как можно видеть, при  $\Delta k \geq 10^{-3}$  ед. СИ с течением времени явно наблюдается неуклонное понижение значений  $\rho_{\tau}$ . На поздних временах общий вид и взаимное расположение модельных (рис. 2, в) и полевых (см. рис. 1, б) кривых  $\rho_{\tau}$  для многоразносной установки настолько похожи, что это не оставляет сомнений по поводу обсуждаемых эффектов: они являются не чем иным, как проявлением магнитной вязкости.

## ВЫВОДЫ

Магнитная вязкость пород трапповой формации оказывает сильное влияние на индукционные переходные характеристики. С увеличением временной задержки это влияние неуклонно и все быстрее возрастает. Проявления магнитной вязкости представляют собой геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию правых ветвей переходных характеристик в рамках модели проводящей немагнитной среды. Это препятствует изучению геоэлектрического разреза в интервале больших глубин.

В качестве одного из возможных путей решения этой проблемы можно предложить развитие методов решения прямой и обратной задач импульсной индуктивной электроразведки с учетом магнитной вязкости, т. е. в рамках модели проводящей магнитовязкой среды. Принципиальная возможность такого подхода проиллюстрирована в работе [4]. Непременным условием его реализации даже в простейшем случае горизонтально-слоистой среды является использование многоразносных установок, при этом разносы должны быть соизмеримы с глубиной залегания и мощностью магнитовязкого слоя.

Другой возможный путь – использования установок, минимизирующих взаимную индуктивность между генераторной и приемной петлями [3]. Однако его реализация предполагает проведение большого числа наблюдений, что снижает перспективы использования такого подхода при проведении массовых съемок методом ЗСБ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Тарло Н.Н. Магнитная вязкость горных пород – новый осложняющий фактор метода ЗСБ // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. - Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. - С. 19-26.
2. Кожевников Н.О., Снопков С.В. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) // Геология и геофизика. - 1995. - Т. 36. - № 5. - С. 91-102.

3. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 3. - С. 262-276.

4. Стогний В.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Исследование магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания с помощью импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика. - 2010. - Т. 51. - № 11. - С. 1565-1575.

© Н. О. Кожевников, Ю. А. Агафонов, Е. Ю. Антонов, И. В. Буддо, 2016

УДК 550.834

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТЕЛЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ЗАПИСЯМ МИКРОСЕЙСМ: НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

*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, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

*Константин Владимирович Федин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

В натурном эксперименте исследована возможность обнаружения подземных пустотелых объектов по записям микросейсм. Показано, что накопление амплитудных спектров микросейсмических сигналов позволяет определять частоты и амплитуды стоячих волн сжатия-растяжения, формирующихся между земной поверхностью и подошвой приповерхностного слоя либо над подземными полостями. Наблюдаемое над пустотами резкое повышение частот стоячих волн является критерием их обнаружения.

**Ключевые слова:** подземные пустоты, микросейсм, стоячие волны, натурный эксперимент.

## **DETECTION OF UNDERGROUND HOLLOW OBJECTS USING MICROSEISMS RECORDS: NATURAL EXPERIMENT**

*Yury I. Kolesnikov*

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

*Konstantin V. Fedin*

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

We investigated in the natural experiment the possibility of detecting underground hollow objects using microseisms records. It is shown that accumulation of amplitude spectra of microseismic signals allows estimating the frequencies and amplitudes of compressional standing

waves arising between ground surface and bottom of near-surface layer or above underground cavities. Observed over the cavities a sharp increase of the frequencies of standing waves is the criterion of their detection.

**Key words:** underground hollow objects, microseisms, standing waves, natural experiment.

Необходимость выявления и изучения подземных пустотелых объектов, таких как карстовые пустоты, пещеры, заброшенные горные выработки, подземные ходы и др., может возникать во многих областях человеческой деятельности – при проведении проектных изысканий, археологических исследований, мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации различных объектов городской инфраструктуры и т. д. Применение для решения таких задач прямых методов, основанных на бурении или вскрытии грунта канавами и шурфами в местах предполагаемого нахождения объекта, может оказаться весьма трудоемким и не гарантирует достижения требуемого результата.

Намного менее трудоемки косвенные геофизические методы, основанные на регистрации на поверхности грунта различных физических полей. В частности, имеется определенный опыт применения для выявления пустот в верхней части разреза (ВЧР) сейсмических методов. Несмотря на разнообразие применяемых подходов, возможности активных (с искусственными источниками) сейсмических методов во многих случаях ограничены из-за относительно малых в сравнении с длиной волны размеров неоднородностей [1].

В работе [2] предложен и опробован на данных физического моделирования пассивный сейсмический метод обнаружения подземных пустотелых объектов. Метод основан на выделении из микросейсмического поля стоячих волн, формирующихся между земной поверхностью и либо подошвой низкоскоростного слоя, либо верхней поверхностью пустотелого объекта. Выделить из шумового поля стоячие волны можно, например, накапливая (усредняя) амплитудные спектры шумовых записей. Так как частоты и амплитуды стоячих волн над пустотелым объектом и в его отсутствие должны отличаться, эти параметры могут быть использованы для обнаружения подземных пустотелых объектов, а при определенных условиях – и для оценки их формы и глубины залегания [2].

Подтверждением того, что резкие пики, если они выделяются на осредненных спектрах, соответствуют стоячим волнам, может служить регулярный характер этих пиков, так как интервал между соседними собственными частотами любого слоя равен частоте низшей моды стоячих волн в таком слое со свободными границами. Это следует из того, что в возникающей в слое стоячей волне на земной поверхности образуется пучность, а на нижней поверхности, в зависимости от условий отражения, – либо пучность, либо узел (подобно стоячим волнам в незакрепленном или закрепленном одним концом стержнях [3]). Соответственно, на толщине слоя

должно укладываться в первом случае целое число полудлин, а во втором – нечетное число четвертей длин стоячих волн.

Собственные частоты для колебаний слоя типа вертикального сжатия-растяжения в этих двух случаях определяются, соответственно, формулами

$$f_n = \frac{nV_p}{2h} \quad (1)$$

или

$$f_n = \frac{(2n-1)V_p}{4h}, \quad (2)$$

где  $n$  – номер моды стоячих волн,  $V_p$  – скорость продольных волн в слое,  $h$  – толщина слоя. Легко показать, что и в том, и в другом случае интервал между соседними собственными частотами  $\Delta F = (f_{n+1} - f_n)$  равен  $V_p/2h$ , т. е. частоте низшей моды  $f_1$ , определенной по формуле (1).

Для тестирования *in situ*, предложенного в работе [2] метода обнаружения подземных пустотелых объектов, нами был проведен натурный эксперимент. Эксперимент проводился на территории геофизической обсерватории «Ключи», расположенной в 7 км восточнее Академгородка (Новосибирск, Россия). На территории обсерватории имеются площадки, где закопаны на небольшую глубину несколько десятков «мишеней» для тестирования малоглубинных электроразведочных методов и аппаратуры для них.

В числе «мишеней» есть две пустые двухсотлитровые стальные бочки диаметром 0.56 м и высотой 0.88 м с толщиной стенок 1 мм, закопанные в вертикальном положении на глубину 1.3 и 2.5 м (расстояние от земной поверхности до верхней границы «мишени»). Для тестирования рассматриваемой методики была проведена регистрация микросейсм в четырех точках (над каждой из этих «мишеней») и еще в двух точках с заведомо ненарушенным грунтом.

Регистрация велась одноканальными цифровыми регистраторами Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц. Для записи использовались вертикальные сейсмографы GS-20DX, поэтому целевыми волнами в данном эксперименте были стоячие волны сжатия-растяжения. Нужно заметить, что одним из критериев выбора места для обсерватории в 1960-х годах был низкий уровень микросейсм, так как одна из ее основных функций – получение сейсмологических данных на расположенной на территории обсерватории сейсмической станции «Новосибирск» (международный код – NVS). Поэтому для оценки возможности выделения стоячих волн из микросейсмического поля были получены записи микросейсм большой длительности – от 5 до 12 суток.

На рис. 1, 2 представлены результаты осреднения амплитудных спектров последовательных участков записей длительностью 8192 отсчета каждый. Как можно видеть, на осредненных спектрах уверенно выделяются регулярные пики, соответствующие стоячим волнам сжатия-растяжения. В таблице приведены частоты трех первых пиков для всех четырех точек. Обращает на себя внимание различие между характером распределения пиков для точек над

«мишенями» и в свободных от пустотелых объектов местах. Интервал между соседними пиками над «мишенями» равен частоте первого пика, а в двух других точках – удвоенной частоте первого пика.

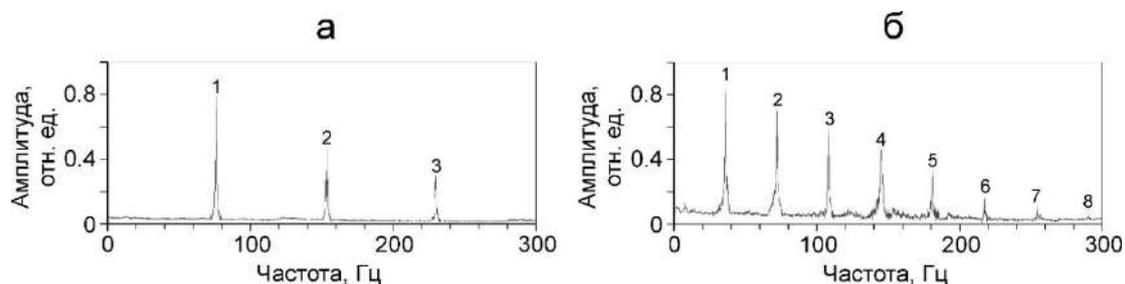


Рис. 1. Результаты накопления амплитудных спектров микросейсм, зарегистрированных над бочками, закопанными на глубину 1.3 м (а) и 2.5 м (б). Цифрами обозначены номера мод стоячих волн

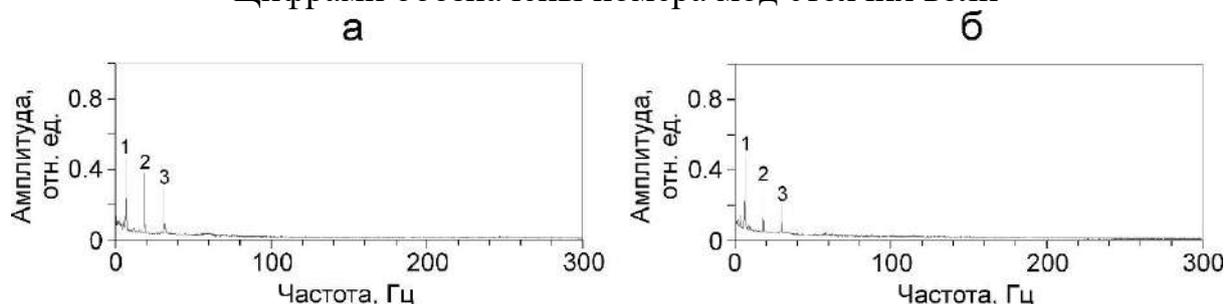


Рис. 2. Результаты накопления амплитудных спектров микросейсм, зарегистрированных в двух точках над ненарушенным грунтом. Цифрами обозначены номера мод стоячих волн

Таблица

Частоты  $f_i$  стоячих волн в точках регистрации микросейсм

Глубина до «мишени», м	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц	$f_3$ , Гц
1.3	76.6	153.2	230.9
2.5	36.4	72.8	109.2
–	6.0	18.1	30.2
–	5.8	17.5	29.1

Это объясняется тем, что обе границы слоев между «мишенями» и земной поверхностью свободны и на них образуются пучности колебаний стоячих волн. Под двумя другими точками наблюдений поверхностный низкоскоростной слой имеет жесткий контакт с нижележащими породами, поэтому на его верхней границе образуется пучность, а на нижней – узел колебаний. Соответственно, и частоты стоячих волн в первом случае определяются формулой (1), а во втором – формулой (2).

Для грунта над «мишенями», используя частоты стоячих волн и известную

глубину до верхней границы «мишени», можно оценить скорость продольных волн  $V_p$ . Согласно формуле (1), она равна 182 м/с над бочкой, закопанной на глубину 2.5 м, и 199 м/с над бочкой, заглубленной на 1.3 м. Столь низкие значения скоростей объясняются тем, что над бочками находится слабо консолидированный грунт, так как его состояние было изменено при их закапывании. Сейсмические скорости в ненарушенном грунте, очевидно, должны быть существенно выше, чем в грунте над «мишенями», поэтому полученные оценки скорости  $V_p$  не могут быть использованы, например, для оценки глубины до подошвы приповерхностного низкоскоростного слоя по записям, полученным  
в местах с нетронутым грунтом.

Как показано в работе [2], выявлять пустоты можно как по частотам, так и по амплитудам стоячих волн, что также подтверждают рис. 1-2, на которых амплитуды стоячих волн над пустотами больше, чем над менее контрастной и залегающей на большей глубине подошвой приповерхностного слоя. Но на практике из этих двух параметров предпочтительнее использовать частоты, так как они менее зависимы от характеристик источника (в данном случае микросейсмического поля) и на точность их определения меньше влияют параметры используемой аппаратуры, в частности, амплитудно-частотные характеристики. Более того, если в спектре микросейсм, зарегистрированных в некоторой точке, появляются регулярные пики, частоты которых удовлетворяют формуле (1), уже это свидетельствует о наличии в этом месте подземного пустотелого (либо существенно низкоскоростного) объекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grandjean G., Leparoux D. The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: Experimentation at a test site // Journal of Applied Geophysics. - 2004. - Vol. 56. - N 2. - P. 93-106.
2. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. - 2015. - № 4. - С. 89-96.
3. Лепендин Л.Ф. Акустика. - М.: Высшая школа, 1978. -[ 448 с.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, 2016

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН В ЦЕЛИКАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ДАННЫМ ПАССИВНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

*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, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

*Константин Владимирович Федин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты физического моделирования, проведенного с целью оценки возможности выявления ослабленных зон в целиках горных выработок по записям сейсмоакустического шума. Показано, что накопление амплитудных спектров последовательных участков шумовых записей позволяет выделить из шума стоячие волны, по частотам и амплитудам которых можно локализовать ослабленные зоны, если скорости упругих волн в них и в целике различаются.

**Ключевые слова:** целики горных выработок, ослабленные зоны, сейсмоакустический шум, стоячие волны, физическое моделирование.

## **DETECTION OF WEAKENED ZONES IN THE MINE WORKING PILLARS USING PASSIVE SEISMO-ACOUSTIC MEASUREMENTS (PHYSICAL MODELLING)**

*Yury I. Kolesnikov*

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

*Konstantin V. Fedin*

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

We present the results of physical modelling, carried out to estimate the ability of detecting weakened zones in the mine working pillars using seismo-acoustic noise. It is shown, that accumulation of amplitude spectra of successive areas of noise records allow to extract the standing waves from a noise field. Their frequencies and amplitudes can be used for locating weakened zones, if elastic velocities in these zones and in the pillar are different.

**Key words:** mine working pillars, weakened zones, seismo-acoustic noise, standing waves, physical modeling.

При проведении подземных горных работ в выработанных пространствах часто оставляют целики – нетронутые участки рудного тела, пласта или

вмещающих горных пород. Целики могут иметь различное назначение, но в большинстве случаев они предназначены для предотвращения разрушения окружающих горных пород. Потеря несущей способности целика может привести к разрушению других целиков на соседних участках, что в лучшем случае осложнит проведение дальнейших горных работ, а в худшем – может иметь катастрофические последствия. Этим обстоятельством обусловлена необходимость разработки эффективных методов контроля состояния целиков.

В настоящее время для такого контроля используют как прямые методы измерения деформаций, перемещений, напряжений и др., так и косвенные геофизические методы в разных модификациях. Из последней группы наиболее часто применяют сейсмические и сейсмоакустические методы, причем как активные (с использованием искусственных источников упругих волн), так и пассивные.

Активными сейсмическими и сейсмоакустическими методами оценивают упругие свойства горных пород, которые отражают, в частности, изменение их трещиноватости, флюидонасыщенности, напряженно-деформированного состояния и т. д. Пассивные методы (регистрация сейсмоакустической эмиссии, микросейсмичности и др.) применяются для изучения активности горных пород, связанной с их прочностными свойствами и напряженно-деформированным состоянием. В работе представлены результаты трехмерного физического моделирования, демонстрирующие возможность оценки состояния целиков в горных выработках по данным пассивных сейсмоакустических измерений.

Предлагаемый метод выявления ослабленных зон в целиках основан на предположении, что в пространстве между боковыми поверхностями целика под действием сейсмоакустических шумов должны формироваться стоячие волны, которые можно выделить из шумового поля при его обработке. Подобный метод описан в работе [1], где моделировались стоячие волны, генерируемые шумами над приповерхностными пустотами. В случае возникновения стоячих волн в целике горной выработки на его свободных боковых поверхностях должны наблюдаться пучности колебаний, а между ними чередоваться узлы и пучности, подобно стоячим волнам в незакрепленном стержне [2]. При этом между границами целика должно укладываться целое число полудлин упругих волн.

Учитывая известную корреляционную связь прочности при сжатии горных пород со скоростью прохождения в них продольных волн [3], естественно предположить, что при неизменной толщине целика снижение скорости упругих волн в его ослабленных зонах должно приводить к соответствующему понижению частот стоячих волн в этих местах. Следовательно, выделяя стоячие волны из шумового поля, по их частотам можно оценивать неоднородность породного массива, а по понижению частот при повторных измерениях выявлять потенциально опасные ослабленные зоны целика.

В лабораторных экспериментах моделировались две параллельные выработки, разделенные ленточным целиком (рис. 1). Модель с внешними размерами  $30 \times 30 \times 30$  см<sup>3</sup> была изготовлена из бетона на основе смеси цемента и

речного песка в пропорции 1:1. Толщина целика составляла 10 см, высота «выработок» также 10 см. В центральной части целика (начиная с 9 см от торца модели) на всю его высоту и толщину было оставлено сквозное отверстие прямоугольного сечения длиной 11 см, которое в трех экспериментах заполнялось разными материалами, имитирующими ослабленную зону целика. Материалы и измеренные импульсным методом скорости продольных волн  $V_p$  в целике и трех «ослабленных» зонах приведены в таблице.

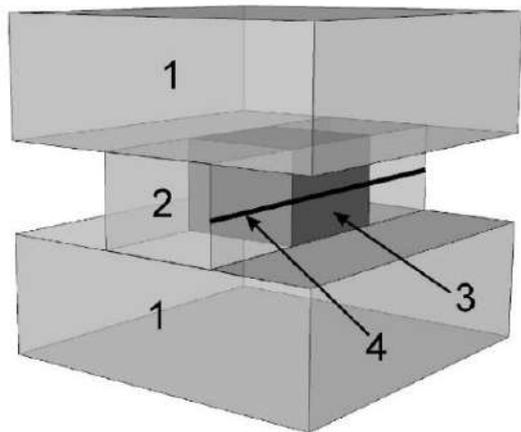


Рис. 1. Структурная схема модели:  
1 – вмещающая среда, 2 – целик,  
3 – «ослабленная» зона в целике,  
4 – профиль наблюдений

Сейсмоакустический шум моделировался с помощью установленных на торцах модели двух громкоговорителей, на которые с двухканального аудиовыхода компьютера подавались генерируемые программой Audacity (<http://audacity.sourceforge.net/>) в режиме белого шума независимые электрические сигналы. Для регистрации шумовых сигналов использовался широкополосный пьезокерамический датчик поршневого типа диаметром 2 мм. Регистрация проводилась с шагом 1 см на продольном линейном профиле длиной 29 см в средней части одной из боковых поверхностей целика (см. рис. 1). Ось максимальной чувствительности датчика была ориентирована по нормали к поверхности наблюдений, поэтому регистрировались преимущественно колебания типа сжатия-растяжения. Сигналы от датчика, оцифрованные с частотой дискретизации 1 МГц, с помощью цифрового осциллографа В-423 записывались на жесткий диск компьютера для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении датчика составляла примерно 2 с.

Таблица

Материалы целика и «ослабленных» зон, скорости  $V_p$  и частоты  $f_i$  трех низших мод стоячих волн в них

	Материал	$V_p$ , м/с	$f_1$ , кГц	$f_2$ , кГц	$f_3$ , кГц
Целик	Бетон (песок/цемент 1:1)	4450	22.5	45.1	67.5
Зона 1	Бетон (песок/цемент 2:1)	2760	14.0	28.1	42.1
Зона 2	Бетон (песок/цемент 4:1)	1350	7.1	14.1	21.3
Зона 3	Высушенная глина	1220	6.3	12.6	18.8

Для выделения стоячих волн из шумового поля, как и в работе [1], проводилось накопление амплитудных спектров последовательных участков шумовых записей длительностью 8192 отсчета каждый. Примеры накопления

240 спектров в «ненарушенном» целике и трех «ослабленных» зонах приведены на рис. 2. Как можно видеть, на всех спектрах после накопления уверенно выделяются три резких пика, соответствующих трем нижшим модам стоячих волн сжатия-растяжения. В том, что это именно стоячие волны сжатия-растяжения, можно легко убедиться, сравнив полудлины волн, соответствующие частотам пиков, с толщиной целика.

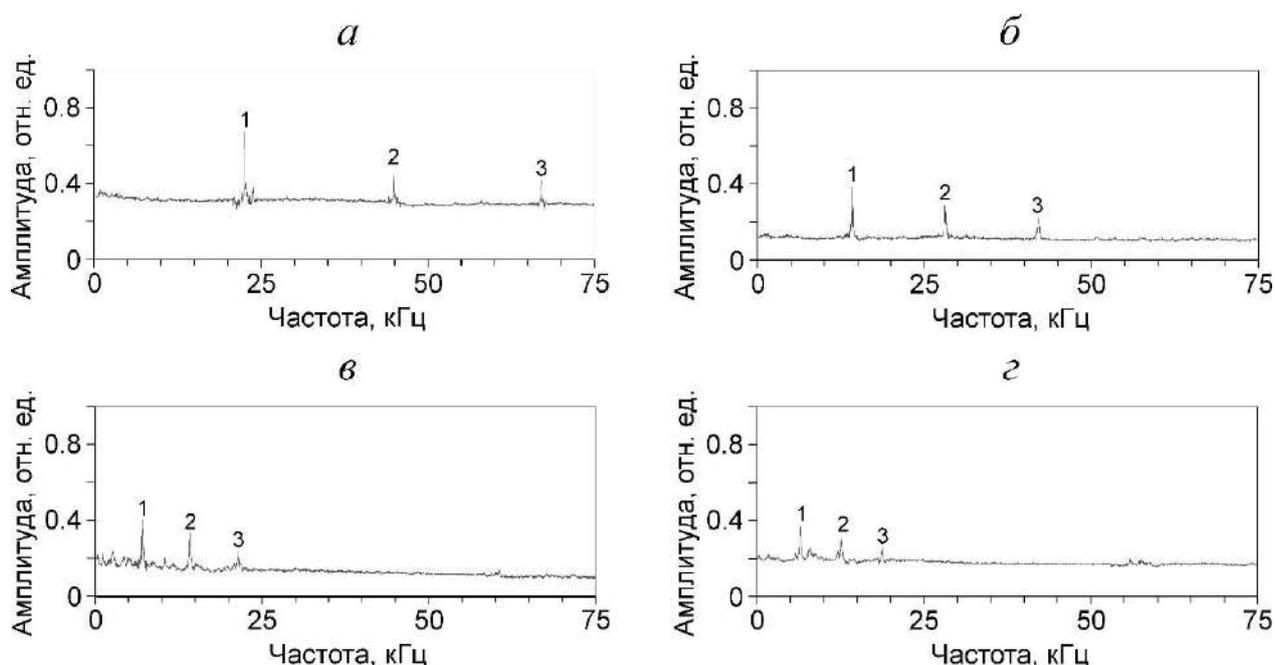


Рис. 2. Результаты накопления амплитудных спектров шумовых сигналов, зарегистрированных на боковых поверхностях «ненарушенного» целика (а) и «ослабленных» зон (см. табл. 1): зоны 1 (б), зоны 2 (в) и зоны 3 (г). Цифрами обозначены номера мод стоячих волн сжатия-растяжения

Например, для «ненарушенного» целика при скорости продольных волн в нем 4450 м/с частоте первой моды (см. табл. 1) соответствует определяемая формулой  $\lambda_1/2 = V_p/2f_1$  полудлина волны 9.9 см, что примерно равно толщине целика, частоте второй моды – полудлина 4.9 см (примерно половина толщины), частоте третьей моды – полудлина 3.3 см (примерно треть толщины). Аналогичные результаты дает и анализ стоячих волн в «ослабленных» зонах.

Наконец, на рис. 3 представлены графики изменения частоты и амплитуды низшей (первой) моды стоячих волн вдоль профиля наблюдений для трех моделей «ослабленных» зон. Как можно видеть, такое профилирование вдоль целика позволяет уверенно выделять в нем «ослабленные» зоны по графикам как частот, так и амплитуд стоячих волн. Тем не менее предпочтительнее, особенно при небольшом контрасте упругих свойств целика и ослабленной зоны, использовать в качестве информативного параметра не амплитуды, а частоты стоячих волн, так как они намного меньше зависят от параметров

используемой аппаратуры и спектральных характеристик сейсмоакустического шума.

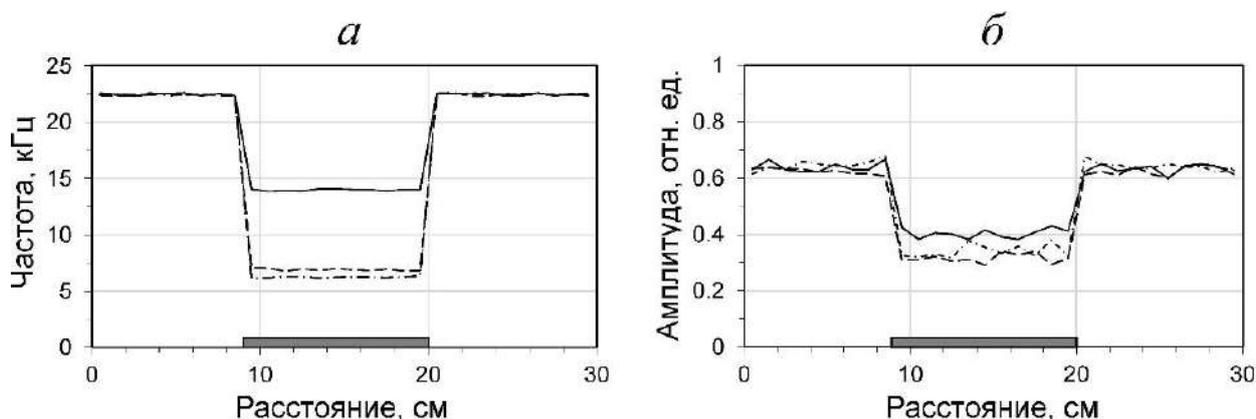


Рис. 3. Распределение частот и амплитуд нижней моды стоячих волн вдоль линии профиля для моделей (см. табл. 1): с зоной 1 (сплошная линия), с зоной 2 (пунктир) и с зоной 3 (штрихпунктир). Положение зон на профиле показано жирной линией над горизонтальной осью

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. - 2015. - № 4. - С. 89-96.
2. Лепендин Л.Ф. Акустика. - М.: Высшая школа, 1978. - 448 с.
3. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / под ред. Н.Б. Дортман. - М.: Недра, 1992. - 391 с.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, 2016

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ СРЕДСТВО ХРАНЕНИЯ, МОНИТОРИНГА И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЗАБОЙНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ**

*Наталья Олеговна Косогова*

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент 3-го курса ФИТ, e-mail: kosogova.natasha@mail.ru

*Дмитрий Владимирович Баранов*

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент 3-го курса ФИТ, e-mail: bar\_di\_92@mail.ru

*Александр Александрович Власов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: alexander.a.vlasov@gmail.com

*Дмитрий Владимирович Тейтельбаум*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, e-mail: teytelbaum@gmail.com

В процессе бурения скважин принимают участие специалисты разных направлений, которым важно оперативно получать информацию о траектории скважины. Основным источником является забойная телесистема, передающая необходимые для корректировки траектории бурения ствола скважины данные. Исходя из этого, возникла потребность в разработке единой информационной системы, которая автоматизирует сбор, хранение и распространение данных каротажа в процессе бурения на территорию бурового комплекса.

**Ключевые слова:** каротаж, информационное средство, хранение и доступ к данным.

## **THE INFORMATION TOOL STORAGE, MONITORING AND INITIAL PROCESSING OF DATA DOWNHOLE TELEMETRY SYSTEM MEASUREMENT WHILE DRILLING**

*Natalya O. Kosogova*

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, 3rd year student of FIT, e-mail: kosogova.natasha@mail.ru

*Dmitry V. Baranov*

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, 3rd year student of FIT, e-mail: bar\_di\_92@mail.ru

*Alexander A. Vlasov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Researcher, e-mail: alexander.a.vlasov@gmail.com

*Dmitry V. Teytelbaum*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Graduate student, e-mail: teytelbaum@gmail.com

Specialists of different areas are involved in a well drilling process. They need to get all the necessary information as quickly as possible. Main data source is downhole telemetry system, which transmits data through drilling mud. Received information is necessary for correcting well trajectory. On this basis, there was a requirement to develop a unified information system that automates the collection, storage and dissemination of logging data while drilling into the territory of the drilling facilities.

**Key words:** logging, information tool, storage and data access.

Автоматизация оперативного распространения необходимой информации очень важна для специалистов, участвующих в процессе бурения. На современных российских буровых комплексах своевременное распространение информации развито слабо, что сказывается на скорости и качестве проведения буровых работ. Поэтому появилась необходимость в создании единого информационного средства для автоматизации сбора, хранения и распространения данных каротажа в процессе бурения на территорию бурового комплекса в режиме реального времени, с возможностью редактирования данных и контроля траектории ствола скважины.

При бурении скважин применяются забойные телесистемы (далее ЗТС), которые являются одним из главных источников данных. ЗТС состоит из скважинной и наземной частей. Скважинная часть содержит каротажный комплекс и устройство передачи данных. Наземная часть состоит из приемника сигнала по каналу связи, который дешифрует сигнал ЗТС. Для гидравлического канала связи таким приемником является датчик давления буровой жидкости. Также наземная часть содержит данные геолого-технологических исследований, необходимых для восстановления глубины замера, и данные, полученные с находящихся на устье скважины датчиков (рис. 1). В данной работе рассматривается прием данных комплекса ЛУЧ-102 [1].

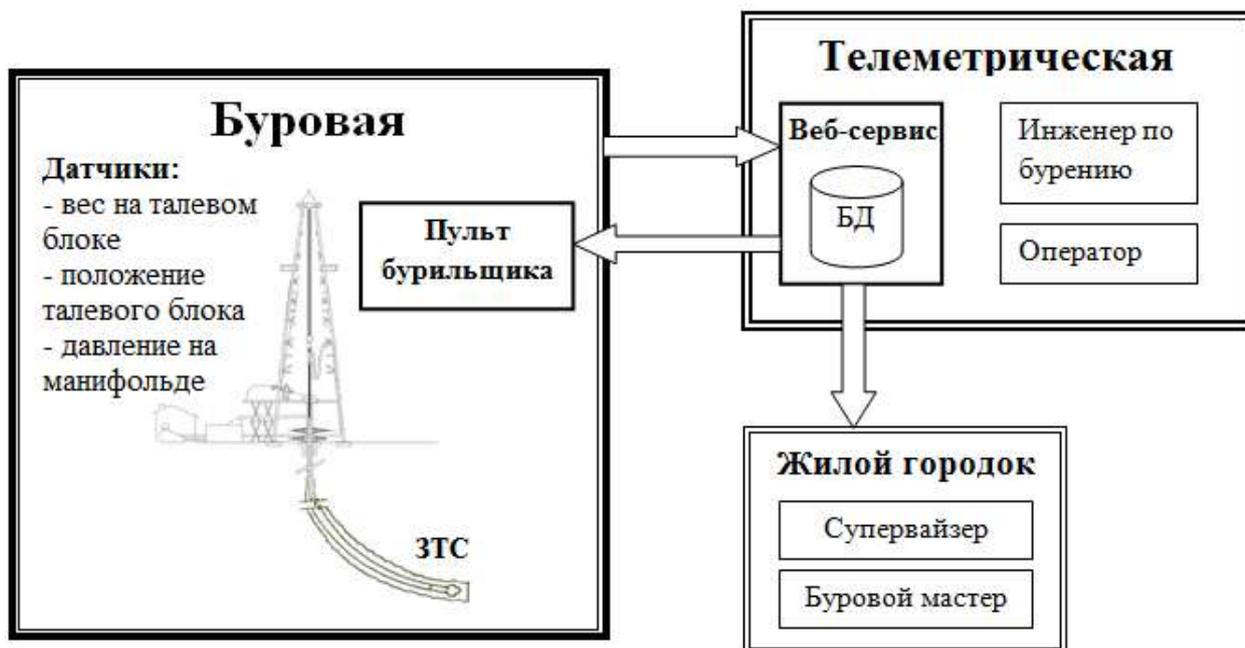


Рис. 1. Схема передачи данных на буровом комплексе

Для сбора, хранения и распространения данных используется единая информационная система. Она состоит из следующих частей.

1. База данных.
2. Веб-сервис.
3. Пользовательские приложения.

Полученная информация автоматически собирается в хранилище данных, находящееся на сервере в телеметрической. За целостность хранимых в информационной системе данных отвечает веб-сервис. Вся работа с информацией происходит с его помощью через интернет, а не напрямую через систему управления базами данных SQL. Пользовательские приложения получают доступ только к тем данным, которые им требуются и позволяют специалистам, находящимся на территории бурового комплекса, удаленно работать с ними: редактировать, изменять и применять к ним алгоритмы предобработки. Общение приложений с веб-сервисом осуществляется посредством протокола HTTPS.

Структура базы данных составлялась на основании знаний о каротаже в процессе бурения при помощи СУБД PostgreSQL [2]. Она состоит из 25 таблиц, поделенных на функциональные блоки (рис. 2), и хранит в себе всю необходимую для работы информацию, постоянно пополняясь новыми данными, полученными в процессе каротажа. Информация поступает в виде пакетов данных, содержащих в себе символы, которые впоследствии расшифровываются для представления полученной информации в удобном для пользователей виде.

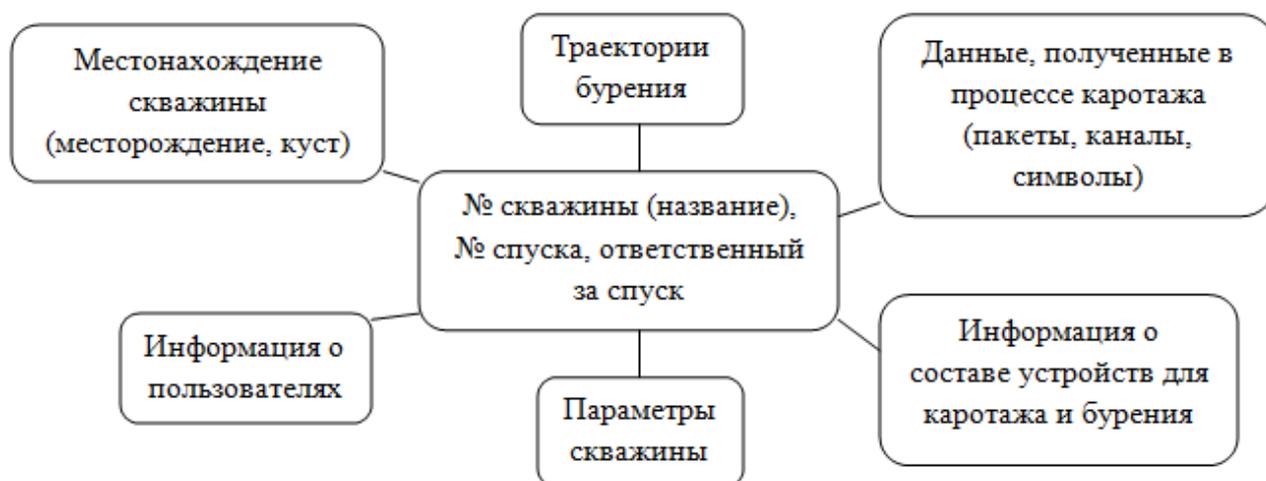


Рис. 2. Структура базы данных

Пользовательские приложения реализованы на языке C# с использованием технологии WPF. Приложения предназначены для мониторинга данных ЗТС, или, другими словами, – для визуального контроля качества принимаемой информации и ее отображения на удаленных компьютерах различных специалистов, для принятия оперативных решений. Также в полуавтоматическом режиме выполняется первичная обработка зарегистрированных сигналов: расчет траектории скважины, учет внешнего воздействия на регистрируемое

магнитное поле, корректировка данных естественной гамма-активности и удельного электрического сопротивления за влияние скважинных условий и особенностей конструкции аппаратуры.

Для получения информации из базы данных пользователь должен авторизоваться в информационной системе, после чего он получает доступ к данным и функциям приложения, соответствующим его правам доступа. Права доступа для всех пользователей определяются во время регистрации в системе администратором. После выбираются необходимые месторождение, куст и скважина для последующей работы с данными выбранной скважины (рис. 3).

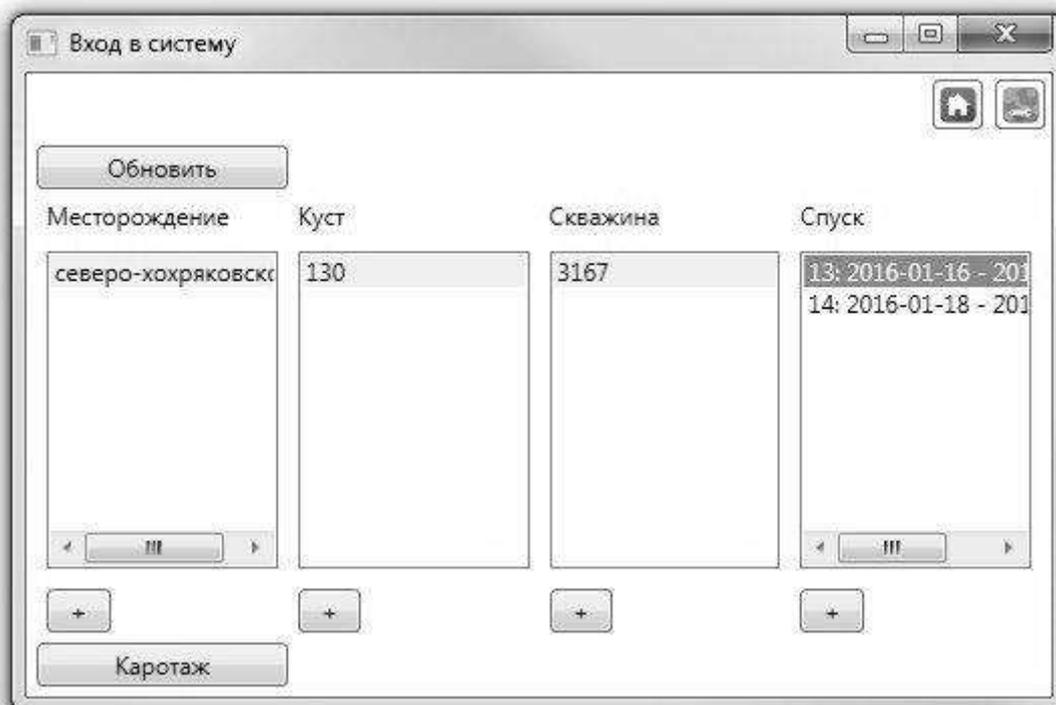


Рис. 3. Окно выбора скважины

Пользовательские приложения поддерживают следующие функции.

1. Получение информации из сервиса сбора и хранения данных в режиме реального времени (рис. 4).
2. Мониторинг данных каротажа в процессе бурения на основе измерений забойной телесистемы.
3. Контроль траектории ствола скважины.
4. Редактирование траекторий для корректировки бурения.

Информационное средство является частью проекта RealDepth 5 [3], разрабатываемого в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН) совместно с ЗАО НПП ГА «Луч» для предобработки данных каротажных комплексов «СКЛ-А» и «Луч» [1]. Единая информационная система позволит значительно снизить временные и материальные затраты за счет оперативной передачи данных забойной телесистемы, особенно в случаях консультаций с узконаправленными специалистами в экстренных ситуациях.

Окно приема данных: [СЕВЕРО-ХОХРЯКОВСКОЕ/ 130/ 3167/ 13:16.01.2016 15:35:09-16.01.2016 15:35:09]

Все Все Все Непромер Настройки шаблона

Стат	Корр	Time	DownH	Depth	Symbols	TFG	TFM	GR	ROPL	ROPH	LLD
D		17.01.16 03:35:37	3145.82	3145.82	S80BC2D00			78.7477	0.5048	0.10	
D		17.01.16 03:36:42	3146.11	3146.12	S80A4FF00			68.6948	964.661	0.10	
D		17.01.16 03:37:52	3146.43	3146.43	S80BCFF00			78.7477	964.661	0.10	
D		17.01.16 03:39:08	3146.70	3146.70	S809EFF00			66.1816	964.661	0.10	
D		17.01.16 03:40:25	3146.70	3146.70	S8098FF00			63.6683	964.661	0.10	
D		17.01.16 03:41:37	3146.70	3146.70	S80A44H			68.6948			
S	X	17.01.16 03:42:34	3146.70	3146.70	SH						
D		17.01.16 03:56:43	3146.94	3146.94	S831CD7A31F0B5						
D		17.01.16 03:58:51	3146.94	3146.94	S54C0A4	37.00		68.6948			
D		17.01.16 03:59:41	3146.94	3146.94	S80981C00			63.6683	0.2738	0.10	
D		17.01.16 04:00:40	3146.94	3146.94	S80A46A00			68.6948	4.5316	0.10	
D		17.01.16 04:01:39	3147.19	3147.20	S80984C00			63.6683	1.5399	0.10	
D		17.01.16 04:02:40	3147.47	3147.48	S80AA4600			71.208	1.2409	0.10	
D		17.01.16 04:03:40	3147.74	3147.75	S80986E00			76.2245	0.64.661	0.10	

Экспортировать в LAS

Рис. 4. Окно приема данных

В рамках проекта проведено экспериментальное бурение с использованием данного информационного средства. В процессе бурения горизонтального окончания скважины система показала себя хорошо, сбоев и отключений не происходило. В итоге были учтены недостатки и составлен список модификаций информационного средства для более удобной и продуктивной работы с системой.

Таким образом, было разработано и реализовано информационное средство, которое дает возможность собирать полученную в процессе каротажа информацию в единую базу данных и хранить ее, затем с помощью пользовательских приложений передавать работникам бурового комплекса по локальной сети. Далее можно производить работу с данными, используя функции пользовательских приложений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремин В.Н. Прибор высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения // Геофизический вестник. - 2005. - № 1. - С. 12-17.
2. Вислобоков В. Краткий обзор возможностей PostgreSQL [Электронный ресурс] // PostgreSQL.Ru.Net. - URL: <http://postgresql.ru.net/docs/overview.html> (дата обращения: 13.02.2016).
3. Тейтельбаум Д.В., Власов А.А. Программная система для каротажа в процессе бурения // 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. – 64–70.

© Н. О. Косогова, Д. В. Баранов, А. А. Власов, Д. В. Тейтельбаум, 2016

## **МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЯ ПРЕДАЛТАЙСКОЙ РАВНИНЫ**

*Павел Степанович Лапин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат географических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-85-73, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

В настоящей работе рассматривается соответствие между современными геодинамическими процессами, результатами макросейсмических проявлений сильных землетрясений и нефтегазоносными областями, выявленными по результатам геохимической съемки по снегу. Установлено, что на исследуемой территории характер изменения макросейсмических проявлений сильных землетрясений приурочен к области интенсивных современных геодинамических процессов и может оказывать влияние на раскрытие трещин в фундаменте как основных источников геохимических аномалий, поскольку за последние годы резко возросло число землетрясений в пределах Алтайского края.

**Ключевые слова:** современные геологические процессы, макросейсмические проявления, нефтегазоносные проявления.

## **MACROSEISMIC EVENTS STRONG EARTHQUAKES, MODERN GEODYNAMICS AND SHOWS OF OIL OF THE PREALTAI PLAIN**

*Pavel S. Lapin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)330-85-73, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

This work considers correspondence between the modern geodynamic processes, results of macroseismic events of strong earthquakes and oil-and-gas areas revealed by results of geochemical shooting on snow. It is established that in the studied territory nature of change of macroseismic events of strong earthquakes is dated for area of intensive modern geodynamic processes and can influence on disclosure of cracks in the base as main sources of geochemical anomalies as the number of earthquakes within Altai Krai in recent years has sharply increased.

**Key words:** modern geological processes, macroseismic events, shows of oil and gas.

В последние десятилетия накоплен значительный объем данных о макросейсмических проявлениях сильных землетрясений и установлены существенные вариации скорости затухания бальности в различных тектонических провинциях. Выясняются пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов сильных коровых землетрясений, которые могут свидетельствовать о миграции ювенильных флюидов [1]. Поток сейсмической энергии, выделяясь из очага землетрясения, постепенно поглощается окружающей средой. Этот процесс может происходить различными путями.

В настоящей работе рассматривается соответствие между современными геодинамическими процессами, выявленными на основе анализа морфогене-

тических особенностей в развитии рельефа земной поверхности [2], результатами макросейсмических проявлений сильных землетрясений [3] и выявленных по результатам геохимической съемки по снегу перспективных в нефтегазоносном отношении территорий [4].

Результаты исследования интенсивности и рисков землетрясений в пределах Алтайского края подробно анализировались Б.Н. Лузгиным и др. [3]. Их удивили большие значения изосейст (изменения от 8 до 10), которые соизмеримы с данными по Западной Монголии. Они считают, что помимо тектонических причин землетрясений существуют и другие – связанные с изменением гравитационных масс, производством взрывных работ, в том числе и ядерных взрывов, возможностью выявления ударных (импактных) землетрясений и др. Они предлагают сейсмическое районирование территории Алтайского края осуществлять не только на схемах потенциальной зональности, но и на достоверном структурном сейсмо-геолого-геоморфологическом уровне выделять мобильные и относительно стабильные, собственно платформенные, структуры.

В пределах Предалтайской равнины установлена неоднородность в проявлении современных рельефообразующих процессов [2] и выявлены соответствия между современными геодинамическими процессами и результатами газогеохимической съемки по снегу [4], которые позволили предположить наличие связи геохимических аномалий с трещинами в фундаменте Предалтайской равнины. Интенсивность нефтегазоносных проявлений может возрастать за счет увеличивающейся в последнее время сейсмичности Алтайского края. Основная цель работы состояла в установлении возможных соответствий между нефтегазоносными проявлениями, современной геодинамикой и макросейсмическими проявлениями сильных землетрясений в пределах объекта исследования. Для достижения поставленной цели сопоставлялись результаты районирования территории на основе выделения и анализа ведущих современных геологических процессов и макросейсмических проявлений сильных землетрясений с результатами газогеохимической съемки. В пределах Предалтайской равнины осуществлен анализ и выделены ведущие современные геологические процессы, которые позволили осуществить районирование и выделить как на региональном, так и локальном уровнях особенности геодинамического развития территории. В пределах объекта исследования (рисунок) выделены области: 1) преобладания склоновых процессов, приводящих к выколаживанию склонов и накоплению обломочного материала в их основании при минимальном водном потоке (районы 2, 5, 10 и 20); 2) преобладания склоновых процессов, приводящие к выколаживанию склонов и накоплению обломочного материала в их основании при типичном для исследуемой территории водном потоке (наиболее перспективные для поисков нефти) (районы 1, 4, 21, 22 и 41); 3) преобладания флювиальных процессов, приводящие к расчленению приводораздельных пространств (районы 3, 6, 9, 12, 16, 23, 33 и 42); 4) преобладания флювиальных процессов, приводящие к увеличению площади долин (районы 14 и 24); 5) преобладания

флювиальных процессов, приводящие к выполаживанию склонов и накоплению обломочного материала в их основании (районы 11, 13 и 15). Таким образом, все разнообразие в проявлении ведущих современных геологических процессов сведено к двум типам процессов (флювиальным или склоновым) и пяти группам. Одна из них совпадает с нефтегазоносными проявлениями, выделенными по результатам геохимической съемки по снегу.

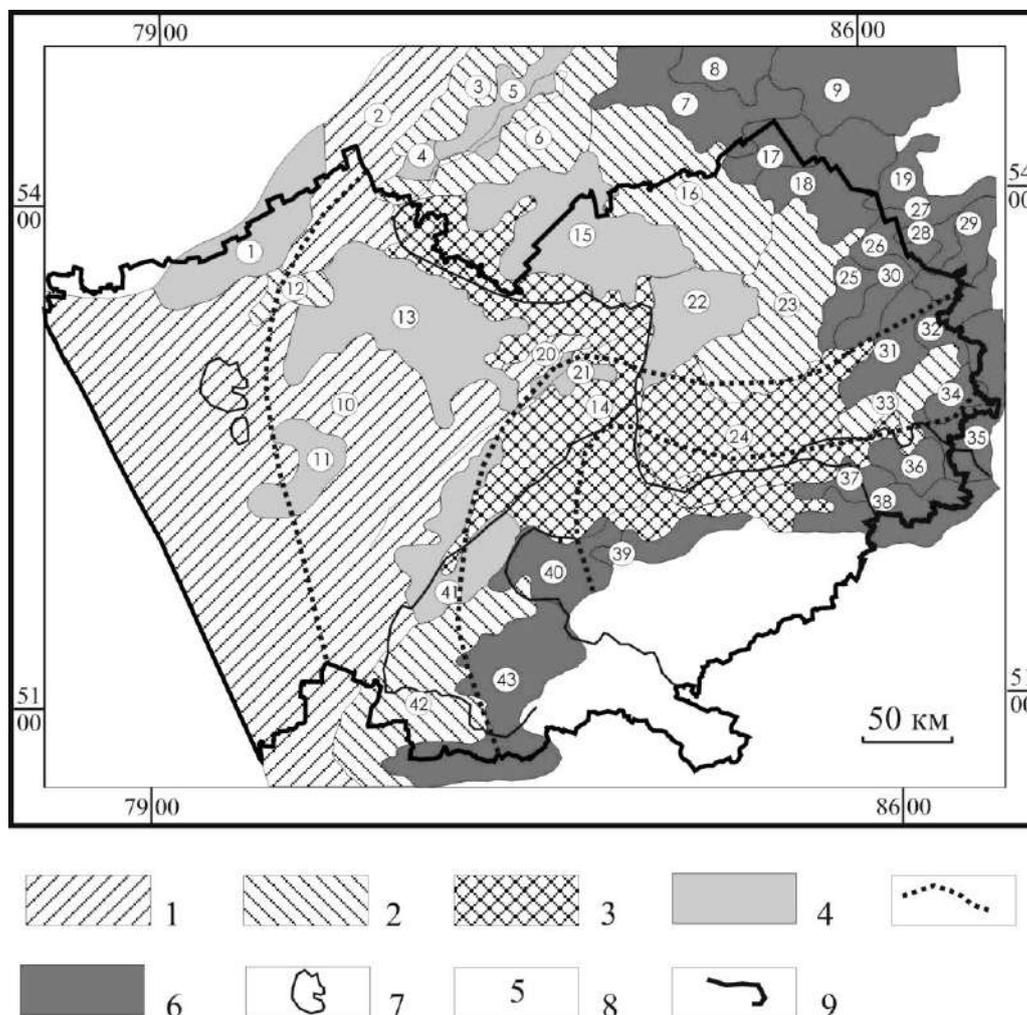


Рис. Современный морфогенез земной поверхности Предатайской равнины.

Реликтовые области с преобладанием: 1 – склоновых процессов, 2 – флювиальных процессов; области с морфогенетическими рядами: 3 – близкими к устойчивому развитию, 4 – существенно отличными от областей устойчивого развития; 5 – схема сводных изосейст Алтайского края [3]; 6 – горная часть Алтайского края; 7 – гидросеть; 8 – номера районов; 9 – границы Алтайского края

Для сопоставления ведущих современных геологических процессов с результатами макросейсмического районирования недостаточно районирования территории по направленности рельефообразующих процессов. Необходимо выявить устойчивые и близкие к ним области. Область устойчивого развития является транзитером вещества и энергии, которые поступают в рассмат-

риваемую систему извне. Области устойчивого развития можно представить как внешнее проявление литодинамического потока по Н.А. Флоренсову.

С литодинамическими потоками в чехле связаны области, в пределах которых происходят интенсивные перемещения вещества и энергии, которые и фиксируются в современных рельефообразующих процессах. На земной поверхности литодинамические потоки приурочены к районам устойчивого равновесия, в пределах которых наблюдается соответствие рельефообразующих процессов в ведущих морфогенетических рядах на двух иерархических уровнях: область – район. В системе происходит достаточно быстрое перераспределение внутренней энергии. На уровне области любое внешнее воздействие фиксируется в ведущем морфогенетическом ряду. Полное соответствие с ведущим морфогенетическим рядом на уровне района приводит к быстрому обмену энергией, которая моментально преобразуется рельефообразующими процессами. Таким образом, можно предположить, что литодинамические потоки, совпадающие с областями устойчивого развития, могут являться областями, где происходит перемещение вещества и энергии как внутренних, так и внешних сил.

Для выделения областей устойчивого развития на основе моделирования ведущих современных рельефообразующих процессов мы воспользовались ранее построенной нами схемой морфогенетического районирования Алтайского края [2]. В пределах исследуемой территории выделены две области устойчивого развития (рис. 1). Они имеют различный генезис. Область северо-восточного направления характеризуется преобладанием склоновых процессов. Область северо-западного направления характеризуется преобладанием флювиальных процессов. Для поддержания функционирования рельефообразующих процессов в пределах областей устойчивого развития, где отмечается соответствие ведущих морфогенетических рядов при переходе область – район, затрачивается незначительная часть энергии литодинамического потока. Большая ее часть поступает в соседние районы и приводит к увеличению интенсивности процессов рельефообразования, которые стремятся преобразовать ведущий морфогенетический ряд данного района к ведущему морфогенетическому ряду области. С этим механизмом преобразования связаны основные тенденции в развитии всей исследуемой территории. Наибольший интерес вызывают территории с морфогенетическими рядами, близкими к ведущему ряду как на уровне района, так и области, поскольку в их пределах незначительное внешнее воздействие приведет к изменению морфогенетического ряда и вместе с тем к увеличению площади области устойчивого развития. Внешнее воздействие может осуществляться с использованием различной энергии, в том числе и сейсмической.

В пределах Алтайского края выделены не только две области устойчивого развития, но и область незначительно отличная от них, в пределах которой преобладают флювиальные процессы (рис. 1). Выделенная область (районы 14 и 24) расположена между двумя реликтовыми областями, что позволяет предположить о существенном влиянии литодинамических потоков на ее

развитие. Возникающие в ее пределах напряжения снимаются двумя зонами сейсмичности (Фасово-алтайской и Каменской). На рисунке показано распределения сводных значений изосейст [3]. Их пространственное распространение хорошо соотносится с выделенной нами областью, которая представлена морфогенетическим рядом, незначительно отличающимся от ведущего. Установлены соответствия между современными геодинамическими процессами и макросейсмическим проявлением сильных землетрясений Алтайского края, что свидетельствует о совместном их влиянии на трещиноватость пород в фундаменте и раздробленность чехла.

Таким образом, в пределах Предалтайской равнины по результатам совместного анализа установлены соответствия в проявлении современных рельефообразующих процессов, макросейсмического районирования территории и результатов газогеохимической съемки, позволяющие предположить большую интенсивность нефтегазопроявлений за счет раскрытия трещин в фундаменте, поскольку в последние годы в пределах исследуемой территории резко возросло число землетрясений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов сильных коровых землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира: свидетельства миграции ювенильных флюидов // Вестник НЯЦ РК. - 2006. - Вып. 4. - С. 94-102.
2. Лапин П.С. Современный морфогенез земной поверхности Предалтайской равнины // География и природные ресурсы. - 2009. - № 3. - С. 87-94.
3. Лузнгин Б.Н., Барышников Г.Я., Осьмушкин В.С. Интенсивность и риск землетрясений в Алтайском крае// Известия АГУ. - 2003. - №3. - С. 55-62.
4. Конторович А.Э., Фомин А.Н., Сенников Н.В. и др. Прямые поиски залежей углеводородов на территории Степного Алтая методом газогеохимической съёмки по снегу // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 5. – С. 60–65.

© П. С. Латин, 2016

## **ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАМЕННОГО ГЛЕТЧЕРА СУКОРСКОГО ОПОЛЗНЯ-ОБВАЛА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

*Анастасия Александровна Лапковская*

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

*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

*Галина Сергеевна Дьякова*

Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, ассистент кафедры физической географии и геоинформационных систем, e-mail: galinabarmaul@mail.ru

Приведены результаты исследований одного из каменных глетчеров Горного Алтая методом электротомографии. По полевым данным построены геоэлектрические разрезы, получена модель по результатам трехмерной инверсии и построены карты распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) по площади на разных глубинах. Установлено, что УЭС каменно-ледяных ядер изменяется от первых десятков тысяч до нескольких сотен тысяч Ом·м. Над каменно-ледяными ядрами отчетливо проявляется сезонно-талый слой мощностью 5-7 м, отличающийся пониженными значениями УЭС.

**Ключевые слова:** каменный глетчер, электротомография, Горный Алтай, многолетнемерзлые породы, геоэлектрический разрез.

## **THE GEOELECTRICAL STRUCTURE OF ROCK GLACIER SUKORSKY LANDSLIDE (ALTAI MOUNTAINS)**

*Anastasia A. Lapkovskaya*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Engineer, e-mail:lapkovskaya.a.a@gmail.com

*Vladimir V. Olenchenko*

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

*Galina S. Dyakova*

Altai State University, 656049, Russia, Barnaul, Lenin Prospect 61, Assistant of the Department of Physical Geography and GIS, e-mail: galinabarmaul@mail.ru

The results of electrical resistivity tomography of one of rock glaciers of the Altai Mountains are presented. It was found that the resistivity of rock-ice cores varies from a few tens of thousands to several hundred thousand ohms · m. Above the rock-ice cores clearly manifested active layer capacity of 5-7 m, wherein reduced values of resistivity.

**Key words:** rock glacier, electrical resistivity tomography, Altai Mountains, permafrost, geoelectric section.

Изучение каменных глетчеров (КГ) становится актуальным направлением ряда физико-географических исследований. Результаты этих исследований приобретают сегодня особое значение при разработке планов социально-экономического развития горных территорий России. Кроме того, данные о внутренней структуре каменных глетчеров могут применяться в процессе палеогеографических и палеосейсмогеологических реконструкций [1, 2].

По данным исследований [1], на территории Горного Алтая насчитывается более 1200 подобных объектов, и многие из них находятся в непосредственной близости с населенными пунктами. Определенные условия развития комплексов гляциально-мерзлотных каменных образований могут привести к быстрому перемещению огромного объема ледового-каменного материала. В связи с активным освоением территории Алтайских гор КГ могут нести серьезную угрозу для эффективного развития региона, его инфраструктуры. Комплексное изучение внутреннего строения КГ, их особенностей и специфических характеристик позволит обеспечить продуктивность и безопасность процесса освоения горных территорий.

Современные представления зарубежных специалистов о внутреннем строении каменных глетчеров основаны на комплексировании данных различных геофизических методов [3]. Однако в российской практике гляциальных исследований нет примеров целенаправленного использования геофизических методов для изучения подобных объектов. С 2014 г. в ИНГГ СО РАН ведется научная работа по изучению каменных глетчеров геофизическими методами.

Район исследований находится на территории республики Алтай Кош-Агачского района. Участок исследований расположен между Курайской и Чуйской степями, на Чаган-Узунском блоке, у подножия горы Сукур (абс. 2926 м). Данный участок относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород [4]. В геологическом строении территории участвуют баратальская свита, представленная известняками, доломитами и силицитами, а также арыджанская свита, включающая в основном вулканогенный, лавовый материал: пиллоу-лавы базальтов, сланцы.

Изучаемый каменный глетчер имеет несколько различных генераций и располагается внутри цирка на северном склоне г. Сукур. Внутренняя часть цирка заполнена обвально-осыпными отложениями, состоящими из глыб, валунов, щебня, предполагаемой мощностью 70-100 м. Ряд исследователей рассматривают данный объект как палеосейсмодислокацию, в которой сформировался оползень-обвал [5].

В 2015 г. площадными исследованиями был изучен каменный глетчер, расположенный в левом (северо-западном) борту цирка. Данные об особенностях внутреннего строения были получены с помощью метода электротомографии (ЭТ), исследования проводились многоэлектродной

электроразведочной станцией «Скала-48». Измерения выполнены поперек структуры КГ по семи профилям. Шесть профилей имели протяженность 475 м и один – 355 м. Расстояние между профилями составляло 50 м. Один из профилей длиной 840 м располагался вдоль оси структуры. Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродной (поле-диполь) прямой и встречной установкам ( $AO_{\max}=215$  м). Шаг измерений по профилю составлял 5 м. Максимальная глубинность измерений составила 80 м.

Инверсия полученных данных осуществлялась в рамках двумерных и трехмерных моделей с учетом рельефа с помощью программ Res2Dinv, Res3Dinv [6]. По результатам интерпретации были построены геоэлектрические разрезы по профилям, на основе 3D-инверсии получена трехмерная модель и построены карты распределения УЭС по площади на разных глубинах.

Особенности строения наиболее наглядно отражаются на геоэлектрическом разрезе продольного профиля. На рисунке показан геоэлектрический разрез и его интерпретация по профилю, пересекающему каменный глетчер вдоль оси, по направлению спуска.

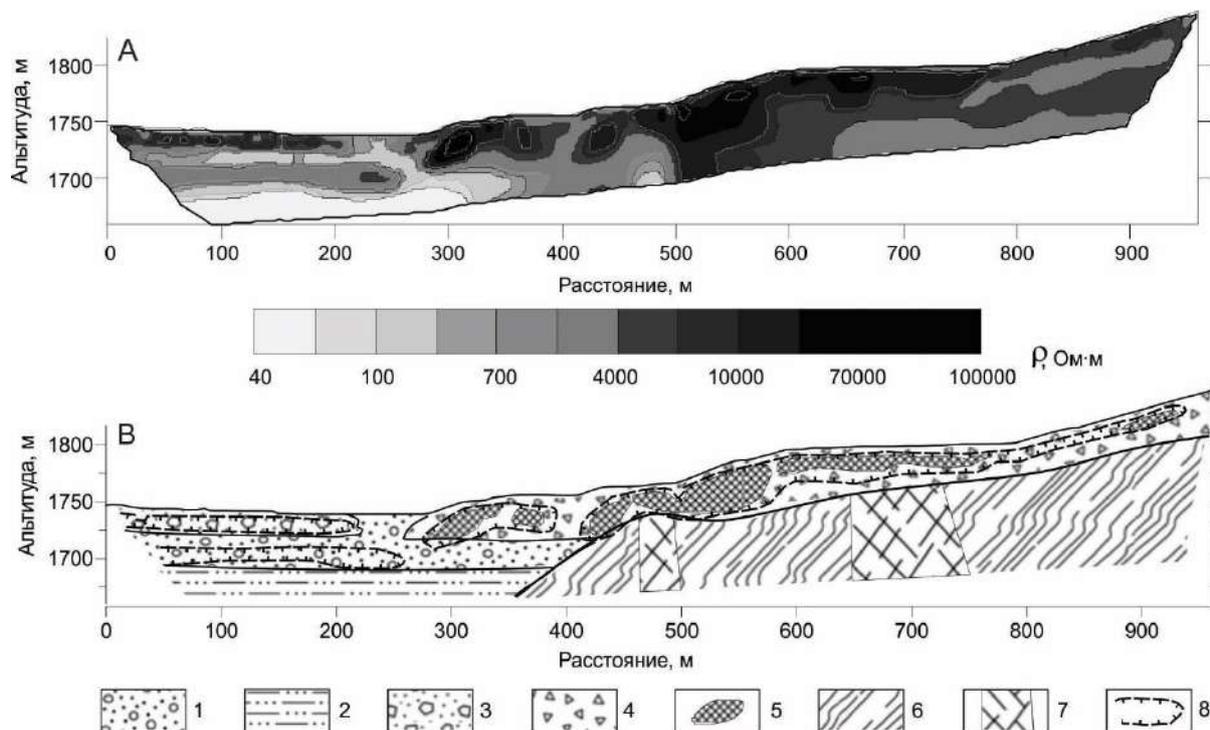


Рис. А) Продольный геоэлектрический разрез каменного глетчера  
 В) Интерпретация: 1 – песчано-галечниковые отложения; 2 – супеси;  
 3 – моренные отложения; 4 – каменный глетчер; 5 – каменно-ледяное ядро;  
 6 – коренное ложе; 7 – зоны разломов в коренных породах; 8 – граница  
 многолетнемерзлых пород

Данный профиль охватывает прифронтальную часть, несколько генераций основного потока, а также частично боковой фронт каменного глетчера. Профиль пересекает не менее 5 генераций, а также несколько прифронтальных

напорных валов. Сам каменный комплекс является неактивным. Практически вся поверхность этой геоморфологической структуры покрыта лесом и кустарником, что говорит о значительном возрасте каменных комплексов. Доказательством этому служит отсутствие признаков современной активности: фронтальные части каменного глетчера выположены и задернованы, молодая древесная растительность не имеет видимых нарушений (перекрученных или наклоненных стволов). В прифронтальной части данного образования фиксируются напорные валы, свидетельствующие о том, что ранее каменный глетчер активно двигался.

С помощью программы Past 3.1 [7] был проведен статистический анализ распределения УЭС в среде. Инструмент Mixture analysis программы Past 3.1 позволяет оценить параметры (среднее значение, стандартное отклонение и т. д.) двух или более одномерных нормальных распределений на основе обобщенной одномерной выборки. По результатам статистического анализа можно выделить несколько комплексов пород, различающихся по УЭС (таблица). Согласно известной [8] зависимости УЭС рыхлых пород от литологического состава, выделенные комплексы пород можно отнести к представленным в таблице литологическим группам.

*Таблица*

Комплексы пород, различающиеся по УЭС

УЭС пород, Ом·м			Литология
-σ	+σ	Среднее	
52	73	61	Супеси
101	115	108	Пески
215	1144	496	Галечниковые с песчаным заполнителем
1230	4027	2225	Мёрзлые моренные, мёрзлые аллювиальные
3493	4535	3980	Осыпные отложения, коренные породы
3529	9815	5886	Мёрзлые склоновые
16625	70999	34356	Каменно-ледяные

В верхней части разреза на первых 250 м профиля выделяется горизонт повышенного УЭС, представленный моренными отложениями. Высокое электрическое сопротивление (6000-12000 Ом·м) внутренних частей морены говорит об их мерзлом состоянии. При этом в интервале глубин 27-45 м выделяется еще один горизонт высокого УЭС (1200-4000 Ом·м), интерпретируемый как погребенная многолетнемерзлая толща. Она подстилается отложениями низкого электрического сопротивления (60 Ом·м), вероятно, представленными супесями.

Таким образом, геолого-геофизическая интерпретация полученных данных позволила соотнести высокоомные аномалии с каменно-ледяными ядрами в отложениях каменного глетчера. Зафиксировать, что УЭС каменно-ледяных ядер изменяется от первых десятков тысяч до нескольких сотен тысяч Ом·м. Предположительно, такой разброс значений объясняется различной

льди́стостью. В коренных породах вертикальными зонами пониженных УЭС выделяются тектонические нарушения. Над каменно-ледяными ядрами отчетливо проявляется сезонно-талый слой мощностью 5-7 м, отличающийся пониженными значениями УЭС, причем максимальная глубина оттаивания отмечается в местах незадернованной каменистой поверхности.

Авторы выражают благодарность Потапову В.В., Шеину А.Н., Камневу Я.К. за помощь в проведении полевых исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Останин О.В., Дьякова Г.С. Гляциально-мерзлотные каменные образования Центрального Алтая // Известия АлтГУ. - 2013. - Т. 2 - С. 167-170.
2. Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока России: строение, генезис, возраст, географический анализ: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. - СВНЦ ДВО РАН, 2009. - 35 с.
3. Ribolini A. and etc. The internal structure of rock glaciers and recently deglaciated slopes as revealed by geoelectrical tomography: insights on permafrost and recent glacial evolution in the Central and Western Alps (Italy–France) // Quaternary Science Reviews. - 2010. - Vol. 29. - P. 507-521.
4. Шац М.М. Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. - Новосибирск: Наука, 1978. - 103 с.
5. Деев Е.В., Зольников И.Д., Староверов В.Н. Отражение быстрых геологических процессов в отложениях и текстурах (на примере разновозрастных комплексов Северной Евразии) // Литосфера. - 2012. - № 6 - С. 14-35.
6. 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.
7. Oyvind Hammer, 1999-2012, PAST – Paleontological Statistics, Reference Manual.
8. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. - М.: ПНИИИС Госстроя России, 2004. - 53 с.

© А. А. Лапковская, В. В. Оленченко, Г. С. Дьякова, 2016

## **О МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ ЕЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И УРОВНЯ ВОДОХРАНИЛИЩА**

*Алексей Владимирович Лисейкин*

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

*Виктор Сергеевич Селезнев*

ФГБУН «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.sbras.ru

*Дмитрий Владимирович Кречетов*

Сейсмологический филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-геофизик, тел. (383)330-39-14, e-mail: krechet1@bk.ru.

Анализируются данные с сейсмостанции «Черемушки» (CERR), расположенной в 4,4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, с использованием разработанной ранее методики выделения собственных частот инженерных сооружений из микросейсмических колебаний. Построены зависимости между значениями уровня водохранилища и собственных частот плотины за последние 15 лет и установлено, что данные зависимости не менялись, что может свидетельствовать об отсутствии изменений в техническом состоянии плотины.

**Ключевые слова:** микросейсмические колебания, собственные частоты, Саяно-Шушенская ГЭС, сейсмостанция «Черемушки».

## **ABOUT MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE DAM OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA POWER PLANT BASED ON THE ANALYSIS OF ITS NATURAL FREQUENCIES CHANGES AND THE STORAGE RESERVOIR LEVEL CHANGES**

*Aleksei V. Liseikin*

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

*Victor S. Seleznev*

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

*Dmitry V. Krechetov*

Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Geophysicist, tel. (383)330-39-14, krechet1@bk.ru

The article is devoted to analysis of data from the seismic station «CERR» which is located at distance of 4,4 km from the Sayano-Shushenskaya Hydropower Plant. A method of selection the natural frequencies from microseismic oscillations is used. The correlations between water level of

the reservoir and values of natural frequencies of the dam was obtained during last 15-years period. It found that these correlations were not changed. It is assumed that the technical condition of the dam was not changed too.

**Key words:** microseismic oscillations, natural frequencies, Sayano-Shushenskaya HPP, seismic station «CERR».

В исследованиях [1, 2], выполненных сотрудниками ГС СО РАН, была разработана методика выделения собственных частот инженерных сооружений по записям с удаленных сейсмических станций. Так, было показано, что из записей микросейсмических колебаний, регистрируемых сейсмостанцией «Черемушки» (международный код – CERR), расположенной в 4,4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, с применением процедур накопления полезного сигнала и фильтрации высокоамплитудных помех, можно выделить собственные колебания плотины и определить значения ее собственных частот (рис. 1). На рис. 1, б представлены фрагменты усредненных амплитудных спектров пяти суточных записей микросейсмических колебаний, по которым определяются значения собственных частот.

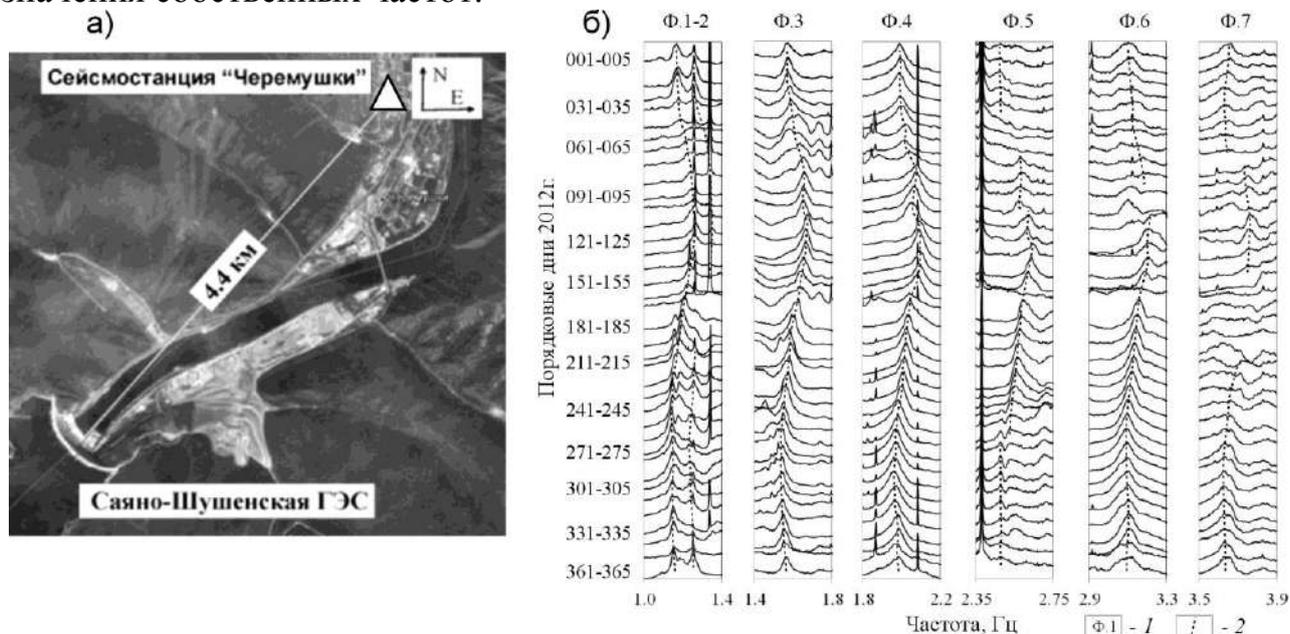


Рис. 1. Схема наблюдений (а) и фрагменты усредненных амплитудных спектров пяти суточных записей сейсмостанции «Черемушки» (б).

1 – обозначения формы собственных колебаний плотины; 2 – определения значений собственных частот

Известно, что такие изменения физического состояния сооружения, как появление трещин, ослабленных зон, смена напряженно-деформированного состояния, приводят к изменению параметров поля стоячих волн и, в частности, к изменению значений собственных частот. Поэтому широкое распространение получили способы мониторинга, основанные на анализе их изменений с течением времени [3].

Существуют различные способы определения собственных частот сооружений. Например, основанные на регистрации колебаний сооружения под воздействием вибрационных источников или ударных воздействий, обследование сооружения на основе данных микросейсмических колебаний методом стоячих волн. Однако данные способы достаточно трудоемкие, требующие временных и материальных затрат, и поэтому не подходят для решения задачи непрерывного и оперативного мониторинга состояния сооружений. Способ, предложенный в [2], позволяет достаточно быстро, используя записи непрерывно регистрирующей сейсмостанции, определять значения собственных частот сооружения и в случае обнаружения значительных отклонений их от первоначальных значений делать выводы об изменениях физического состояния сооружения.

Выполняя анализ изменений значений собственных частот сооружений, необходимо учитывать, что не всегда эти изменения вызваны появлением каких-то дефектов. Это могут быть изменения внешней нагрузки на сооружение. Например, в случае с плотиной Саяно-Шушенской ГЭС такой нагрузкой является давление воды со стороны водохранилища, уровень которого меняется в зависимости от гидрологического режима. В работе [2] в результате обработки данных за 2-х летний период (2013-2014 гг.) показано, что существует достаточно тесная, в первом приближении линейная, связь между уровнем наполнения водохранилища и значениями собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС: с увеличением уровня воды частоты уменьшаются. В настоящей работе с привлечением архивных цифровых данных с сейсмостанции «Черемушки» (15-летний период, начиная с февраля 2001 г.) эти исследования были продолжены.

На рис. 2 представлены графики изменения собственных частот плотины, сопоставленные с графиками изменения уровня водохранилища (УВБ) за период наблюдений с февраля 2001 г. по январь 2016 г. Наблюдается обратная корреляция этих параметров между собой: с увеличением значений УВБ значения собственных частот понижаются, и этот процесс повторяется из года в год. Видно, что коэффициенты корреляции между значениями УВБ и частотами 1-й, 2-й, 3-й и 6-й форм собственных колебаний достаточно высокие (по модулю не менее 0,95). В целом можно отметить, что за 15-летний период наблюдений характер изменения собственных частот плотины в зависимости от уровня наполнения водохранилища не поменялся. Это может свидетельствовать о том, что техническое состояние плотины за этот период не изменилось.

На рис. 3 приведены зависимости между УВБ и значениями собственных частот за 15-летний период наблюдений. Видно, что данные зависимости практически линейные для форм с 1-й по 3-ю и 6-й. Что касается 4-й, 5-й и 7-й форм, то видно, что разброс в данных больше (при этом модули коэффициентов корреляции понижены до 0.81-0.90). Причина этого может быть, с одной стороны, связана с погрешностями измерений. Так, амплитуды собственных колебаний плотины, регистрируемых на сейсмостанции, при достижении

определенных уровней водохранилища понижаются и становятся ниже фона шумовых колебаний. Также уровень шума значительно увеличивается в периоды холостых сбросов воды. С другой стороны, наблюдаемые изменения значений собственных частот, плохо коррелирующие со значениями УВБ, могут быть связаны и с изменениями состояния плотины, природа которых на настоящий момент не установлена. Известно, например, что при определенных УВБ раскрываются микротрещины в теле плотины, которые закрываются при их последующем снижении. Также известно, что напряженно-деформированное состояние меняется при смене температуры в теле плотины. Можно предположить, что эти процессы отражаются в дополнительных изменениях значений собственных частот.

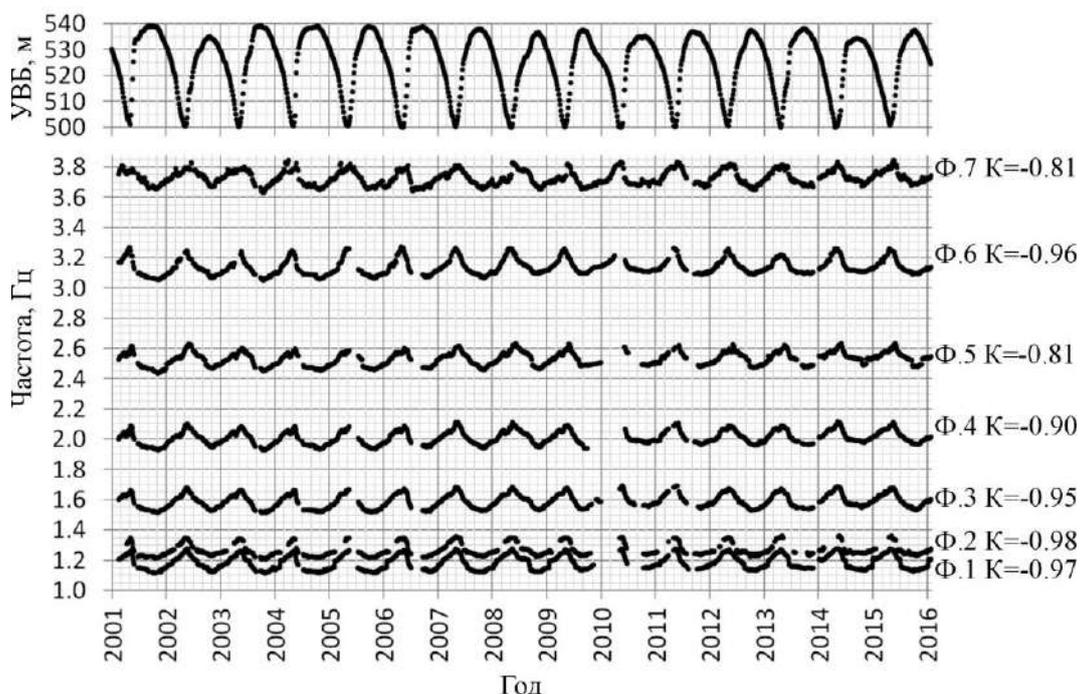


Рис. 2. Изменения уровня водохранилища (УВБ) и значений собственных частот (Ф.1-7) плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

К – коэффициенты корреляции между УВБ и значениями соответствующих собственных частот

Результаты, полученные в настоящем исследовании, могут быть использованы при мониторинге технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Можно предложить следующий алгоритм. По непрерывным записям с сеймостанции «Черемушки» каждые 5 суток определяются значения собственных частот плотины. Эти значения необходимо сравнивать с величинами, полученными ранее при соответствующих уровнях наполнения водохранилища. Если значения собственных частот будут различаться, то необходимо выполнить более подробный анализ состояния плотины, например, с детальным обследованием методом стоячих волн для установления причин этих различий.

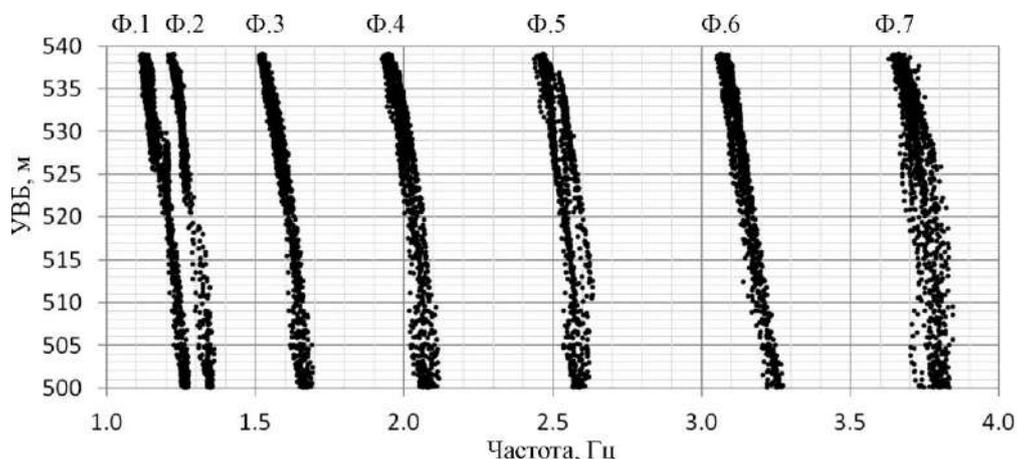


Рис. 3. Зависимости между уровнем водохранилища (УВБ) и значениями собственных частот (Ф.1-7) плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным с 17.02.2001 по 28.01.2016

В результате проведенного исследования установлено, что за последние 15 лет зависимости между уровнем водохранилища и собственными частотами плотины не менялись, что может свидетельствовать о ее неизменном техническом состоянии.

Авторы выражают благодарность руководству филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» за предоставленные данные по изменению уровня водохранилища.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А., Громыко П.В. О причине аварии на Саяно-Шушенской ГЭС с точки зрения сейсмолога // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 136–140.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Бах А.А., Кречетов Д.В. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева «Геофизические методы исследования земной коры». - Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. - С. 182-186.
3. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: пат. на изобретение РФ / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, А.А. Брыксин. - № 2461847. - Бюл. № 26, 20.09.2012 г.

© А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, Д. В. Кречетов, 2016

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО (НИЗКОЧАСТОТНОГО) ПОЛЯ**

*Александр Игоревич Макаров*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: AlexanderI.Makarov@bakerhughes.com

*Александр Николаевич Василевский*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Alexandr.Vasi-levskiy@bakerhughes.com

*Игорь Николаевич Ельцов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, зам. директора по научной работе, тел. (383)330-75-55, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

*Глеб Владимирович Дятлов*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

*Юлий Александрович Дашевский*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, директор, e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

Разработка новых технологий для оценки геометрических характеристик трещин гидравлического разрыва пласта с помощью геофизических методов является актуальной задачей. В данной работе предлагается метод определения геометрии трещины с помощью измерений электрического поля в скважинах. Заполняя пространство трещины жидкостью с высокой электрической проводимостью и наблюдая за вариацией электрического поля в процессе гидравлического разрыва, мы можем определить глубину трещины, решая обратную задачу. Для определения возможностей предложенного метода мы проводим анализ уровня сигнала и его чувствительности к вариации длины трещины.

**Ключевые слова:** гидравлический разрыв пласта, электрическое поле, жидкость с высоким удельным электрическим сопротивлением.

## **FEASIBILITY STUDY OF HYDRAULIC FRACTURE GEOMETRY EVALUATION METHOD USING TIME-LAPSE BOREHOLE MEASUREMENTS OF LOW-FREQUENCY ELECTRIC FIELD**

*Alexander I. Makarov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: AlexanderI.Makarov@bakerhughes.com

**Alexander N. Vasilevsky**

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Alexandr.Vasilevskiy@bakerhughes.com

**Igor N. Eltsov**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Science deputy director, tel. (383)330-75-55, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

**Gleb V. Dyatlov**

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

**Yuliy A. Dashevsky**

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Professor, Director NTC, tel. (383)332-94-43, e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

The investigation of possible techniques for evaluation of the geometry of hydraulic fractures by geophysical methods is a topical problem. We propose to evaluate the hydraulic fracture geometry by carrying out measurements of the electric field in boreholes. Filling the fracture with a conductive fluid, energizing by direct or low-frequency electric current source and looking at the variation of the electric field in borehole during the hydraulic fracture process, we can evaluate the fracture geometry through solution of the inverse problem. For estimation of capabilities of suggested method we analyze the level of the signal and its sensitivity to the variation of the fracture length.

**Key words:** Hydraulic fracturing, electric field, high-conductive fluid.

Hydraulic fracturing of a reservoir is a recognized process for improving well productivity. This operation is performed by injecting a fracturing fluid into a wellbore penetrating a formation at a pressure sufficient to create a fracture. The fracture geometry may be obtained from the measurements of the rock deformation caused by the growing fracture. This analysis is usually limited to data from indirect measurements (temperature, pressure, etc.). However, this data cannot be considered a reliable fracture geometry evaluation because of wellbore effects (fluid density, fluid friction, etc.). Thus, the investigation of possible techniques for evaluation of the fracture geometry properties by geophysical methods is a topical problem [2].

Our approach is based on resistivity contrast between fracture channel and formation. The objective of the study is to propose a technical solution and describe its capabilities for determining the geometry of hydraulic fractures. The main method for investigation is physical analysis of the electric field and mathematical modeling of the electric field in 3D realistic earth models. Resolution and sensitivity analysis of the computed signals are performed to formulate the requirements to the accuracy of the measured signal.

A vertical well with a rectangular hydraulic fracture filled with a high-conductive fluid with proppant materials is considered. It is placed in a homogeneous formation with resistivity of 100 Ohm·m. The length of the fracture wing ( $L$ ) is in the

range of 10 to 200 m, the  $W$  fracture width is 30 m, the fracture channel  $D$  is 0.6 cm and the fracture productive channel resistivity 0.05 Ohm·m. The electric field sensitivity to the fracture wing length was investigated for a set of various measurement setups. We present the voltage difference  $|U_{MN}|$  between two points M and N at the distance 10 m. We suppose the observation point  $\xi$  is placed in the middle of the MN line. To compute the electric current leakage from a cased tube, a special algorithm [1] was applied.

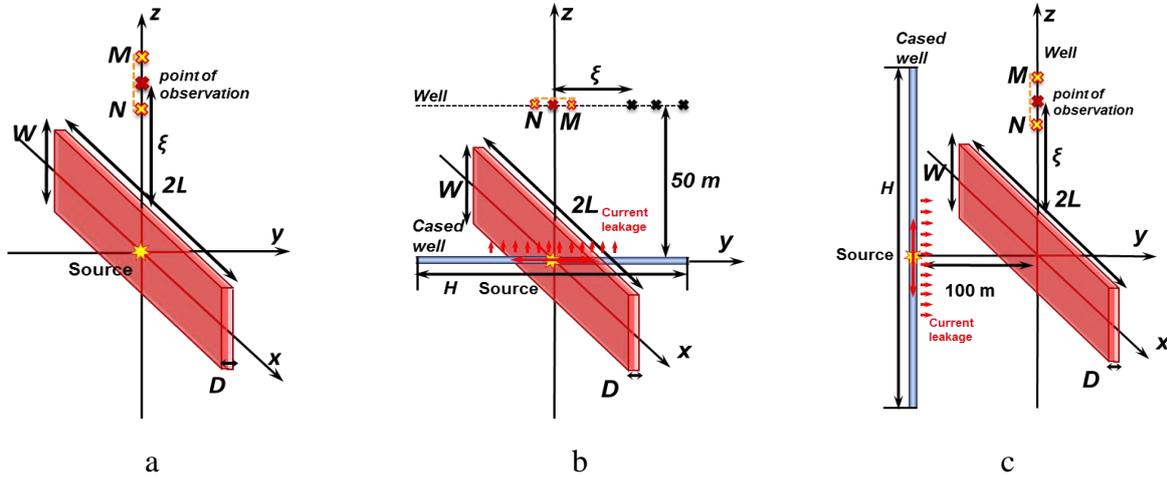


Fig. 1. Examples of measurement configurations for fracture wing length tracking in the presence of a cased and uncased borehole

Examples of measurement configurations are shown in the Fig. 1. The first configuration (Fig. 1.a) includes an uncased well with fractured interval and the point electric current source in the middle of the fracture. In the second configuration (Fig. 1.b), the cased well is fractured across the well direction (along the y-axis). The receivers were placed in the non-cased neighboring well. The third setup (Fig. 1.c) utilizes the electric current source grounded in the cased-neighbor well that is 100-m away from the fractured non-cased well. The casing tube conductivity is  $10^7$  S/m and its length ( $H$ ) is 1000 m, and the current source is in the middle of the tube. The measurement points are along the z-axis in the non-cased fractured well.

To describe quantitatively the capability of acquisition schemes for fracture geometry estimation (described above), the sensitivity  $\eta_L^{E_i}$  of the measured signal  $E_i$  is introduced to the fracture wing length  $L$ :

$$\eta_L^{E_i} = \frac{\partial \ln E_i}{\partial \ln L} = \frac{\Delta E_i / \Delta L}{E_i / L},$$

where  $i$  is the direction of the electric field component ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), and  $\Delta E_i$  is the electric signal difference caused by a variation of the fracture wing length  $\Delta L$ . To analyze the applicability of the proposed method, both the voltage signal level and the electric field sensitivity to fracture depth  $L$  was analyzed. To demonstrate the electric field method of measurement, level  $\eta_L^{E_i}$  is equal to 0.1.

For the measurement setup of Fig. 1.a,  $\eta_L^{E_z}$  and  $|U_{MN}|$  is plotted versus the fracture length (Fig. 2). The signal level decreases as the measurement point ( $\xi$ )

moves away from the fracture along the borehole. The sensitivity of the signal to the fracture wing length  $L$  takes values greater than 0.1 when  $L$  is between 10 and 80 m. The better/higher sensitivity is attained when the measurement point is as close to the fracture edge as possible.

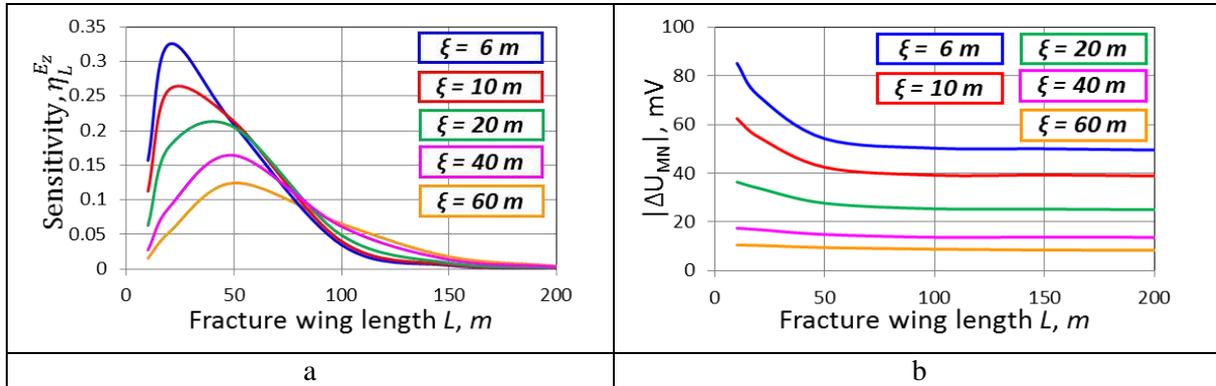


Fig. 2. Sensitivity of the electric field to the fracture wing length and voltage in the receiver line MN at the various observation points  $\xi$ .

Fig. 3 shows the plot of  $\eta_L^{E_y}$  and  $|U_{MN}|$  versus the fracture length for the second setup (Fig. 1.b). In the presence of the casing tube, the voltage in MN line is reduced by 100 times in comparison to the signal level for the first setup, but it is still measurable by the current apparatus. The sensitivity  $\eta_L^{E_y}$  values are greater than 0.1 when  $L$  is between 10 and 120 m. The more distant the receiver point, the less the voltage level at the receiver and the lower the  $\eta_L^{E_y}$ .

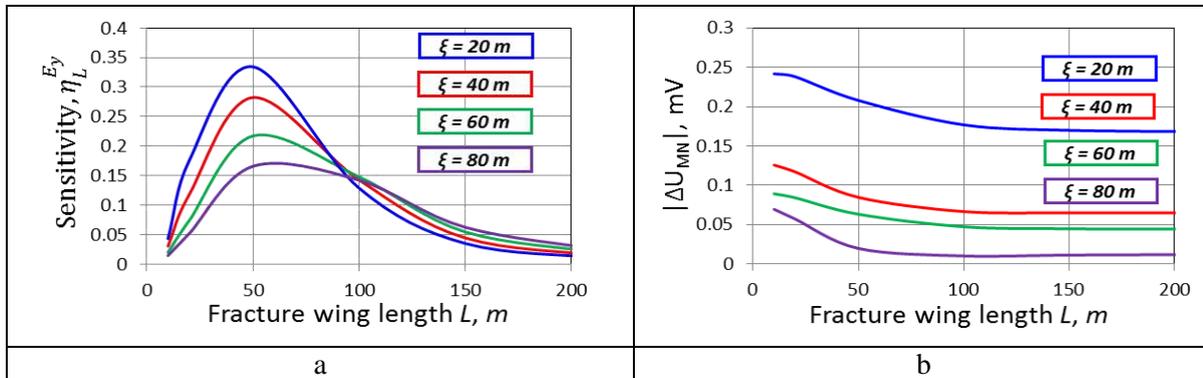


Fig. 3. Sensitivity of the electric field to the fracture wing length and voltage in the receiver line MN at the various observation points  $\xi$

For the third measurement setup (Fig. 1.c),  $\eta_L^{E_z}$  and  $|U_{MN}|$  is plotted versus the fracture length (Fig. 4). In this setup, the signal sensitivity to the  $L$  takes values greater than 0.1 when  $L$  is between 25 and 130 m (for  $\xi = 6$  m). If the observation point ( $\xi$ ) is 60 m, the  $L$  is between 10 and 200 m. The better sensitivity is attained when  $\xi$  is 60 m.  $|U_{MN}|$  for  $\xi = 60$  m is greater than 80  $\mu$ V at fracture wing length  $L = 100 - 200$  m. This signal level can be measured by current apparatus with sufficient accuracy. To track the fracture growth to the range  $L = 0 - 200$  m, the following

conditions are recommended: an optimal sensor placement for electric voltage  $|U_{MN}|$  measurement at points  $\xi = 6 - 60$  m; the direct current source is grounded in the cased well parallel to the fractured well with a distance of 100 m between them.

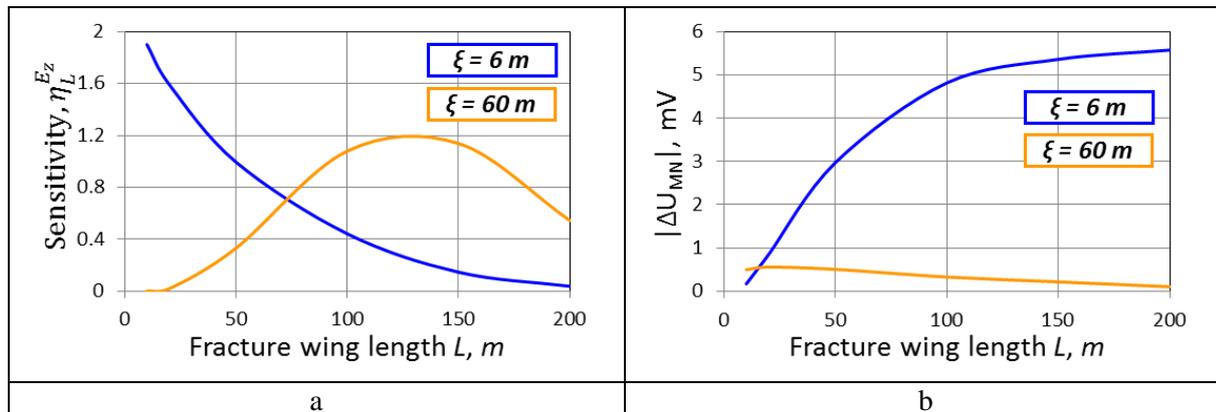


Fig. 4. Sensitivity of the electric field to the fracture wing length and voltage in receiver line MN at the various observation points  $\xi$

Based on the feasibility study (presented above), the hydraulic fracture geometry was evaluated using time-lapse measurements of the electric field in boreholes. The suggested method comprises an injection of highly conductive fluid and energizing the fracture with a direct (low-frequency) current. During the process, time-lapse measurements of the electric field are performed before and after the fracturing process. Changes in the electric field while fracturing are acquired in active or/and observation wells with electrode arrays. The acquired electrical data are inverted for the fracture geometry.

## REFERENCES

1. Dashevsky Yu., Surodina I.V. et al. Forward and Inverse Problems of Geoelectrics in the Methods of Piles Foundation Control without Damaging // Industrial Mathematics Siberian Journal. - 2005. - Vol. 7. - № 2 (22).
2. Kim J., Um E.S., Moridis G.J. Fracture Propagation, Fluid Flow, and Geomechanics of Water-Based Hydraulic Fracturing in Shale Gas Systems and Electromagnetic Geophysical Monitoring of Fluid Migration // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. The Woodlands, Texas, USA, 4–6 February 2014. - SPE 168578.

© А. И. Макаров, А. Н. Василевский,  
И. Н. Ельцов, Г. В. Дятлов, Ю. А. Дашевский, 2016

## РЕГИСТРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

*Сергей Юрьевич Малышков*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, старший научный сотрудник, тел. (382)249-25-91, e-mail: msergey@imces.ru

*Василий Федорович Гордеев*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (382)249-25-91, e-mail: gordeev@imces.ru

Рассмотрены принципы построения измерительной аппаратуры для регистрации пространственно-временных вариаций электромагнитных шумов. Предложены научные и методические подходы к использованию методов регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли для геофизической разведки. Приводятся примеры разведки месторождений полезных ископаемых, оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, мониторинга оползневой активности, выявления геодинамически опасных участков.

**Ключевые слова:** регистратор, геофизическая разведка, импульсное электромагнитное поле.

## ELECTROMAGNETIC PULSE FIELDS RECORDER FOR GEOPHYSICAL SURVEY

*Sergey Yu. Malyshkov*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 634055, Russia, Tomsk, 10/3 Akademicheskoy Avenue, Senior researcher, tel. (382)249-25-91, e-mail: msergey@imces.ru

*Vasiliy F. Gordeev*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 634055, Russia, Tomsk, 10/3 Akademicheskoy Avenue, Ph. D., Senior Researcher, tel. (382)249-25-91, e-mail: gordeev@imces.ru

The paper considers design principles for measurement devices recording spatiotemporal electromagnetic noise variations. Scientific and methodical approaches are suggested for natural earth electromagnetic pulse recording methods application to geophysical survey. Authors provide examples of methods application for mineral exploration, stress-deformed state of the rocks estimation, landslide activity monitoring, detection of dangerous geodynamical areas.

**Key words:** recorder, geophysical survey, electromagnetic pulse field.

Источниками электромагнитных импульсов, на регистрации которых базируется метод геофизической разведки по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) [1], являются неоднородности структуры грунтов, разнонапряженные структуры, трещины и микротрещины. В результате механоэлектрических преобразований под действием деформационных волн из нижней мантии, приливных сил,

микросейсмических колебаний, ветровой и техногенной нагрузки на этих источниках возникают импульсные электромагнитные поля, которые и создают естественный электромагнитный фон литосферного происхождения. Впервые метод ЕИЭМПЗ для геофизической разведки был применен в Томском политехническом институте для оценки активности оползневых склонов, в настоящее время в Украине используют для этих целей радиоволновый индикатор производства Западно-Украинской геофизической экспедиции (РВИНДС). Но РВИНДС не имеет привязки зарегистрированных значений к точному времени, что делает невозможным использование реперных регистраторов для фильтрации временной составляющей поля, прибор регистрирует только интенсивность импульсного потока, амплитуда импульсов не регистрируется.

Для регистрации параметров ЕИЭМПЗ в Институте мониторинга климатических и экологических систем разработан Многоканальный геофизический регистратор. Поскольку в земной коре существует сложное пространственно-временное поле механических напряжений, то для приема сигналов от максимально возможного числа природных источников импульсов в приборе используются несколько приемников поля. Блок-схема многоканального геофизического регистратора «МГР-01» показана на рисунке. Антенны для приема магнитной составляющей ЕИЭМПЗ в направлении север-юг 1 и в направлении запад-восток 3 представляют собой магнитные ферритовые антенны, принимающие сигнал на частоте  $14,5 \pm 1$  КГц. Эта частота выбрана из-за того, что на ней выделяется максимум энергии при разрушении образцов горных пород. Взаимно ортогональное расположение этих антенн позволяет получить диаграмму направленности системы, близкую к круговой. В качестве антенны 5 для приема электрической составляющей ЕИЭМПЗ используется дифференциальный емкостной датчик, работающий в ближней зоне приема в диапазоне частот 500 Гц-100 КГц.

Регистратор работает следующим образом. Импульсы ЕИЭМПЗ, генерируемые массивом горных пород в точке расположения устройства, через приемные антенны 1, 3 и 5 поступают на входы соответствующих каналов 2, 4, 6, где происходит их усиление и фильтрация в определенной полосе частот. Далее импульсы, превысившие установленный порог опорного напряжения, суммируются в течение заданного промежутка времени. В этом же отрезке времени фиксируется амплитуда первого импульса, который превысил опорное напряжение. По истечении этого временного интервала данные из каналов передаются в блок управления 11.

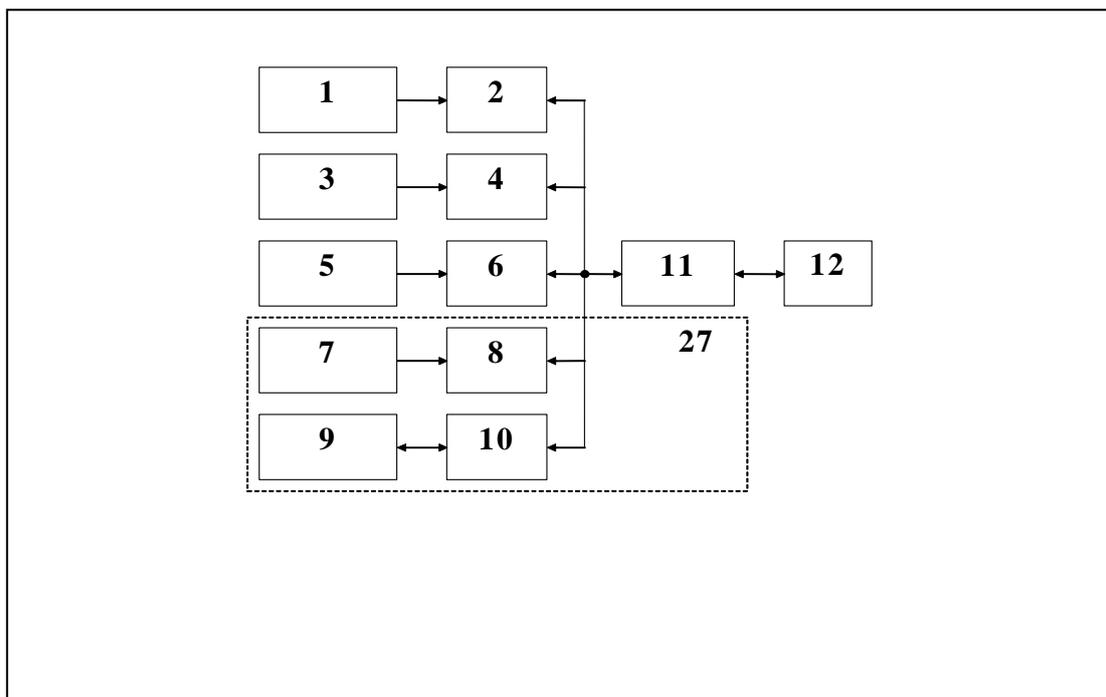


Рис. Блок-схема многоканального регистратора «МГР-01»:

- 1 – антенна для приема магнитной компоненты Н в направлении север-юг (С-Ю);  
 2 – измерительный канал (С-Ю); 3 – антенна для приема магнитной компоненты Н в направлении запад-восток (З-В); 4 – измерительный канал З-В; 5 – антенна для приема электрической компоненты Е; 6 – измерительный канал Е; 7 – датчик дополнительного канала; 8 – дополнительный измерительный канал; 9 – внешняя антенна GSM;  
 10 – GSM/GPRS модем и блок управления питанием; 11 – блок управления регистратором; 12 – буфер последовательного порта; 27 – оборудование, не входящее в базовую комплектацию и поставляемое по заказу

Для устройства управления и всех измерительных каналов регистратора разработаны свои программы, которые загружаются во встроенное электрически перепрограммируемое ПЗУ микроконтроллеров. Это позволяет быстро менять алгоритмы сбора и предварительной обработки данных. Перед началом работ регистратор программно устанавливается в режим непрерывного мониторинга либо в режим полевых измерений для поиска структурных и литологических неоднородностей земной коры. В режиме полевых измерений регистратор инициирует измерение по сигналу, прошедшему от интерфейса внешнего синхросигнала для запуска измерений. К этому интерфейсу может быть подключен синхросигнал от подрывной машины, а также кнопка, расположенная на лицевой панели регистратора. Использование синхросигнала от подрывной машины удобно для записи электромагнитного отклика на динамическое (ударное) возбуждение земной поверхности и предназначено для изучения быстропротекающих, кратковременных процессов. В этом режиме вначале подается команда “огонь” для подрыва заряда или запуска ударника. Через некоторое время после запуска (время задержки) или сразу по команде “огонь” начинается оцифровка аналоговых сигналов электромагнитного

отклика горных пород на динамическое воздействие (по Е-компоненте), а также число и амплитуда импульсов по двум Н-каналам. Время задержки устанавливается либо оператором, либо определяется автоматически по моменту превышения сигнала, заданного оператором уровня срабатывания при первом пробном воздействии на объект контроля. В этом режиме оцифровка параметров электромагнитного отклика может осуществляться с тактовой частотой 2 Гц; 4 Гц; 8 Гц; 16 Гц; 32 Гц; 64 Гц; 128 Гц; 256 Гц; 512 Гц; 1024 Гц. Частота оцифровки задается оператором с клавиатуры компьютера. Для работы в этом режиме комплекс может укомплектовываться дополнительным, акустическим каналом, позволяющим фиксировать вертикальные перемещения почвы, вызванные взрывом. В качестве датчиков перемещений используется стандартный сейсмоприемник СВ-5 или его аналог. Показания этого датчика в процессе записи отклика на динамическое воздействие также оцифровываются. Это позволяет сопоставлять времена прихода акустических и электромагнитных сигналов, более грамотно интерпретировать полученные результаты и правильно обосновывать их физически.

В случае запуска кнопкой “Пуск” производится регистрация характеристик электромагнитных полей в течение заранее программно заданного времени. Измеряется интенсивность электромагнитных импульсов по двум независимым каналам Н-компоненты и одному каналу Е-компоненты, превысивших по амплитуде заданный оператором порог срабатывания и амплитуду импульсов по Н-компонентам. Кроме этого, оцифровываются импульсы по Е-компоненте, что дает возможность изучения формы и спектральных характеристик сигнала для этого канала. В режиме непрерывного мониторинга производится регистрация параметров ЕИЭМПЗ до полного заполнения памяти регистратора.

Естественное ритмичное движение земной коры хорошо выявляется только при определенной оптимальной чувствительности станций. Поэтому перед началом измерений программно осуществляют настройку регистраторов на оптимальную чувствительность по специально разработанным тарифовочным графикам в зависимости от сезона и местного солнечного времени [2].

Импульсные электромагнитные поля могут меняться как при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов, так при изменении воздействия на источники полей. Многолетние измерения в различных регионах показали, что ЕИЭМПЗ литосферного происхождения имеет ярко выраженный устойчивый суточный и сезонный ход. Это объясняется тем, что деформационные волны в земной коре связаны с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Типичный суточный ход может изменяться локальными геологическими процессами вблизи станции наблюдения, атмосферными грозами, техногенными помехами. Поскольку регистрируемый поток импульсов определяется пространственно-временными вариациями, то в случае выполнения геофизических работ для получения информации о строении земной коры из зарегистрированного сигнала должны быть удалены временные вариации полей и оставлены только пространственные вариации.

Поэтому для геофизической разведки применяется система реперных и маршрутных регистраторов, создано программное обеспечение для выделения пространственных аномалий в структуре поля.

Каждая геологическая структура обладает своей излучательной способностью. Так, например, геологические разломы отличаются от окружающего пространства повышенной интенсивностью сигнала на бортах разлома и некоторым снижением интенсивности в осевой зоне разлома, заполненной, как правило, глиной трения. Распределение импульсов по амплитудам, регистрируемое в зоне разлома, имеет острый максимум, указывающий на то, что геологический разлом генерирует преимущественно импульсы с одной и той же определенной амплитудой сигнала. Ширина зоны с аномальными характеристиками электромагнитных полей при пересечении глубинных геологических разломов может достигать в поперечнике нескольких сотен метров. Мощные трансконтинентальные разломы создают аномальную зону шириной несколько километров и даже несколько десятков километров. Территории перспективные по содержанию углеводородов имеют свои характерные признаки. Месторождение в большинстве случаев окружено «ореолом» территории с повышенной интенсивностью ЕИЭМПЗ, тогда как над самим месторождением углеводородов регистрируется сигнал с более низкими значениями как интенсивности, так и амплитуды импульсов.

Метод ЕИЭМПЗ апробирован на известных месторождениях лития в Финляндии, месторождениях углеводородов в Томской области, республиках Татарстан и Удмуртия и показал свою высокую эффективность. Натурные исследования на различных известных геологических объектах показали высокую перспективность метода, хорошую воспроизводимость результатов работ и лучшую информативность по сравнению с другими малозатратными методами разведки. Метод применялся для поиска активных геологических разломов при обосновании выбора площадок для строительства объектов атомной промышленности во Вьетнаме и РФ. В настоящее время система мониторинга оползневых процессов внедрена на магистральных газопроводах.

Таким образом, метод регистрации ЕИЭМПЗ является универсальным инструментом для геофизической разведки, мониторинга геодинамической активности Земной коры и научных исследований в области наук о Земле. Разработанные регистраторы аттестованы как средство измерения, метод защищен патентом РФ, программное обеспечение зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ РФ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способ геофизической разведки: пат. РФ № 2414726, БИ № 8 / Ю.П. Малышков, С.Ю. Малышков, С.Г. Шталин, В.Ф. Гордеев, В.И. Поливач. - 20 марта 2011 г.
2. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли. // Геология и геофизика. - 2009. - №2. - С. 152-172.

© С. Ю. Малышков, В. Ф. Гордеев, 2016

## **РАЗРАБОТКА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РИФОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПРЕДЕЛАХ ВОСТОЧНОГО БОРТА КУРЕЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

*Анна Васильевна Мамаева*

ООО ГП «Сибгеотех», 630099, Россия, г. Новосибирск, а/я 283, ведущий геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)222-82-32, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

*Елена Николаевна Махнач*

ООО ГП «Сибгеотех», 630099, Россия, г. Новосибирск, а/я 283, главный геофизик отделения нефти и газа, тел. (383)222-82-32, e-mail: machnach@sibgeotech.ru

В работе описан подход к обработке и интерпретации данных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) при изучении геологического строения вендских и нижнесреднекембрийских рифогенных образований в пределах восточного борта Курейской синеклизы на Сибирской платформе. Отработанная сеть профилей МТЗ позволила наметить границы и проследить рифогенный барьер на протяжении около 120 км при ширине центральной (ядерной) части 10-15 км. В северной части площади установлены разобщенные высокоомные объекты, отвечающие средневерхнекембрийским органогенным постройкам. По распределению сопротивления оконтурена зона выклинивания отложений ванаварской свиты венда, выполнена оценка качества покрышек, перекрывающих поисковые объекты. Дан прогноз перспектив площади на обнаружение углеводородов.

**Ключевые слова:** магнитотеллурические зондирования, геоэлектрическая модель, электрическое сопротивление, проводимость, анализ МТ-данных, рифогенный барьер, кембрий, Курейская синеклиза.

## **PROCESSING AND INTERPRETATION TECHNIQUE OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING DURING THE STUDY OF REEFOGENIC BUILDUP WITHIN THE EASTERN LIMIT OF KUREI SINECLISE**

*Anna V. Mamaeva*

«Sibgeotech» Ltd, 630099, Russia, Novosibirsk, post office box 283, Senior geophysicist, tel. (383)222-82-32, e-mail: mamaeva@sibgeotech.ru

*Elena N. Makhnach*

«Sibgeotech» Ltd, 630099, Russia, Novosibirsk, post office box 283, Chief geophysicist, tel. (383)222-82-32, e-mail: machnach@sibgeotech.ru

The work describes an approach to processing and interpretation of magnetotelluric sounding data during the study of geological structure of Vendian and middle-lower-Cambrian reefogenic formations within the eastern limit of Kurei sineclise on Siberian Platform. Completed MT-sounding profile network allows to outline and to trace reefogenic buildup up to 120 kilometers in length while width of the central part is 10-15 km. In the northern part of the area, dissociated high-resistivity objects have been discovered. These objects respond to middle-upper-Cambrian organogenous structures. Distribution of resistivity allowed to delineate Vendian Vanavara group of sediment attenuation zones; to assess the quality of overlying seals that overlap the prospects. Also, the hydrocarbon potential of exploration area is given.

**Key words:** magnetotelluric sounding, geoelectric model, electric resistance, conductivity, MT-data analysis, reefogenic buildup, Cambrian, Kurei sineclise.

С целью изучения геологического строения вендских и нижнесреднекембрийских рифогенных образований в пределах восточного борта Курейской синеклизы было отработано 500 погонных км электроразведочных работ методом МТЗ с применением электроразведочных станций MTU производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics». Регистрация МТ-поля осуществлялась 24-х разрядным АЦП в частотном диапазоне 400-0,0006 Гц с шагом 1000 м. Длительность записи на каждом пункте наблюдения составляла не менее 14 часов. Методика обработки и интерпретации данных магнитотеллурических зондирований включала: построение частотных зависимостей компонент тензора импеданса (сплайнов), кривых кажущегося сопротивления в направлениях установки датчиков поля, качественном анализе МТ-данных, выборе направления, по которому будут строиться разрезы, составлении априорной геолого-геофизической модели и построении геоэлектрических разрезов по результатам 1D, 2D-интерпретации данных МТЗ.

Определение границ геоэлектрических структур и их размерность проводилось с помощью параметров  $N$  (магнитотеллурический параметр неоднородности),  $skew\beta$  (параметр асимметрии Бара),  $skews$  (параметр асимметрии Свифта). По сочетанию этих параметров оконтуривались горизонтально-однородные и горизонтально-неоднородные области. Они оценивались по отношению к пороговым значениям  $\delta$ , характеризующим уровень измерительных погрешностей. Значения  $\delta$  обычно выбираются в интервале 0.05-0.15 [1]. Сделан вывод о возможности одномерных оценок для западной части площади, для остальной территории модель двумерная с локальными 3D-неоднородностями, присутствующими в верхней части разреза. Эти заключения подтверждают полярные диаграммы, построенные на периодах 0,1, 1, 10, 100 и 1000 секунд, являющиеся надежным индикатором размерности геоэлектрических структур.

Области пониженных и повышенных значений МТ-параметров, выделяемые на высокочастотных картах, сохраняют свою конфигурацию практически на всех картах, претерпевая небольшие деформации, подтверждая, таким образом, слабую зависимость параметров от частоты. Это дает основание связать искажения низкочастотного магнитотеллурического поля в большей степени с гальваническим влиянием приповерхностных неоднородностей, которые в значительной мере устраняются нормализацией кривых МТЗ. В данном случае использовалась «статистическая» нормализация по левой части кривой (высокочастотной). Сначала выбирался период нормализации, при этом соответствующая часть разреза приводилась к однородной или слабо меняющейся по горизонтали среде. Таким образом строилась некоторая сглаженная кривая по выбранному периоду для всего профиля, и затем умножением на коэффициент на нее сажали кривые.

В ходе обработки данных кривые кажущегося сопротивления были развернуты в направлениях, близких к направлениям геологических структур, и далее широтные и меридиональные кривые рассматривались как поперечные  $\rho^{\perp}$  и продольные  $\rho^{\parallel}$  по отношению к ним соответственно. Выполненный анализ

свидетельствует, что поперечные кривые в сильной мере искажены эффектом «S». Продольные кривые менее затронуты искажающим эффектом от трехмерных неоднородностей. Они использовались в качестве основных для изучения глубинной электропроводности.

Целенаправленного изучения рифовых объектов на исследуемой площади по данным электроразведки не проводилось, однако анализ каротажа КС по скважинам на соседних площадях (Кумакская, Синская, Баппагайская и др.) показывает, что по данным электроразведки есть возможность картирования рифогенных образований. Это связано с различным внутренним строением рифовых комплексов, которое находит отображение в геофизических полях [2-4]. Собственно, рифовая зона характеризуется карбонатным разрезом сложного строения, чередованием плотных известняков с продуктами их разрушения. Доломитизированные известняки, имея высокую скорость, плотность, обладают и повышенным сопротивлением. В случае их кавернозности и трещиноватости будут изменяться их петрофизические характеристики (в частности, понижение плотности и сопротивления), что дает возможность их выделения в разрезе. На рис. 1 приведены разрезы по скважинам в пределах Вилуйской синеклизы, вскрывшие рифовую зону.

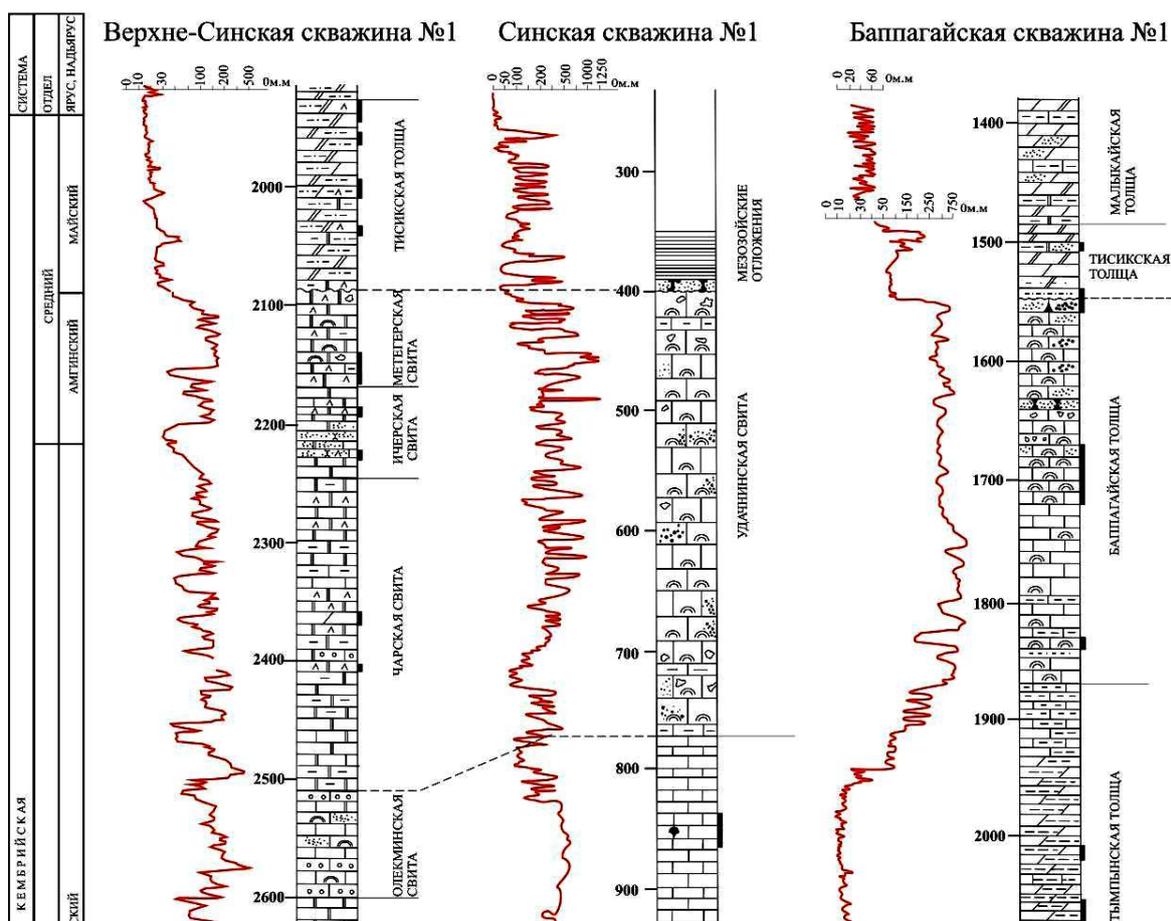


Рис. 1. Отображение рифовых комплексов в данных каротажа КС

Рифовым телам в разрезе соответствует повышение сопротивления до 750-1000 и выше Ом.м. на фоне первых десятков Ом.м. в случае их присутствия в толще, представленной карбонатно-глинистыми отложениями. Такая ситуация наблюдается по скважине Баппагайская-1, которая вскрыла рифовые постройки танхайско-устьмильского комплекса, прошла толщу заполнения майского века и низезалегающие маломощные осадки ленско-амгинского возраста (куонамская, иниканская свиты). Сверху рифовые постройки перекрыты верхоленской свитой верхнего кембрия (ее аналоги), отложения которой обладают пониженным сопротивлением (первые десятки Ом.м.) и являются высокопроводящими. Выделение рифовых построек на фоне карбонатного разреза менее контрастно, но и здесь есть некоторая закономерность: наибольшим сопротивлением будут отмечаться ядра рифовых построек и участки, сложенные плотными известняками, наименьшими – сложенные слабосцементированными обломочными породами пространства между ядрами построек и на их флангах (скв. Верхне-Синская-1, Синская-1).

Четко выраженная фациальная зональность кембрийских рифовых комплексов позволила разработать геоэлектрическую модель, которая была взята за основу при интерпретации данных МТЗ (рис. 2). Границы геоэлектрических комплексов пород закреплялись по сейсмической модели (соответствуют ОГ R0, V, Б, Нк, Н1 и Э1). Выше границы Э1 подбор выполнен по данным МТЗ.

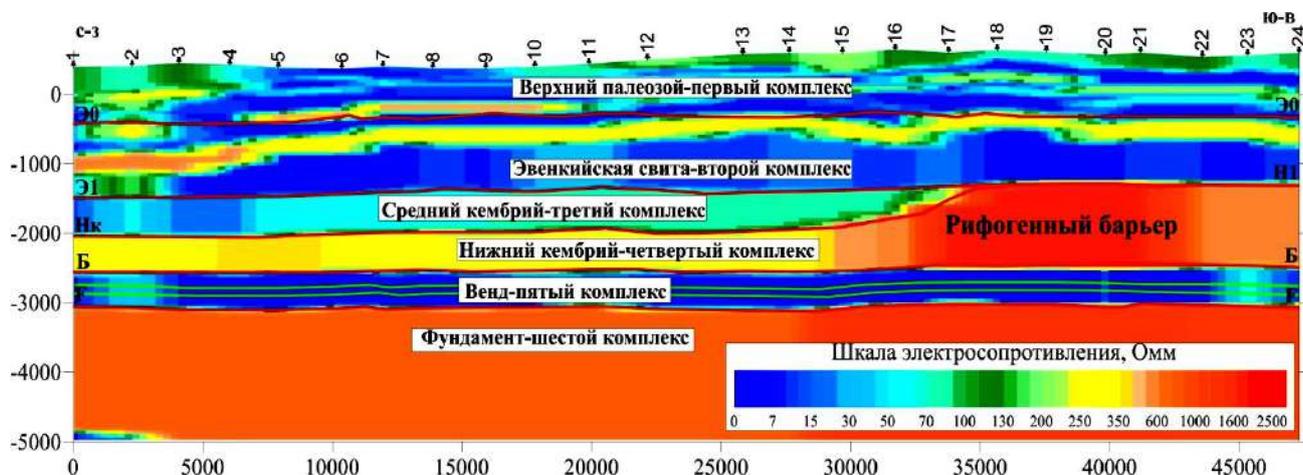


Рис. 2. Выделение и стратиграфическая привязка геоэлектрических комплексов пород по данным электроразведки МТЗ

Представленный на рис. 2 профиль расположен в зоне относительно неглубокого залегания образований барьера, вскрытых скважинами Танхайская 708 и Сохсолохская 706. При приближении к рифовому барьеру (с юго-востока на северо-запад), где из разреза соли выпадают, сопротивление составляет 400-500 Ом. м, характеризую нижнекембрийский разрез как преимущественно карбонатный. В зоне рифового барьера, в местах развития массивных карбонатных образований, сопротивление существенно увеличивается до тысяч

Ом. м. В сторону площади распространения бассейновых отложений сопротивление резко понижается до значений первых сотен Ом. м, характерных для толщи заполнения. Следующий, располагающийся стратиграфически выше, рифогенный комплекс характеризуется иными условиями залегания и особенностями строения, что имеет отображение на геоэлектрическом разрезе. На фоне относительно низкого сопротивления выделяются локальные объекты повышенного сопротивления (до сотен Ом. м), объединяющиеся в зоны, которые интерпретируются как купола и крупные органогенно-обломочные массивы. Сверху нижнекембрийские отложения и косослоистый комплекс среднего-верхнего кембрия перекрывают терригенные отложения эвенкийской свиты и ее аналогов, сопротивлением первые десятки Ом. м. Уменьшение сопротивления (особенно в нижней части эвенкийской свиты) связывается с увеличением доли глинистого материала в осадках, что может характеризовать качество покрышек для ниже залегающих перспективных объектов.

Проведенные исследования показывают широкие возможности электро-разведки МТЗ при картировании и изучении глубокозалегающих геологических структур и объектов различной природы. По результатам глубинного моделирования МТ-поля закартирована поверхность кристаллического фундамента, являющегося опорным высокоомным горизонтом, уточнена линия выклинивания отложений терригенного венда, прослежен рифогенный барьер, приуроченный к зоне флексурного перегиба. В северной части площади в пределах толщи компенсации (красноцветные отложениями среднего-верхнего кембрия) установлены локальные аномалии повышенного сопротивления, которые интерпретируются как разобщенные органогенные постройки. По данным электроразведки выполнена оценка качества покрышек в перекрывающей отложения нижнего и среднего кембрия эвенкийской свите.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. - 680 с.
2. Вальчак В.И., Горюнов Н.А., Евграфов А.А. Новые данные о развитии нижне - среднекембрийского рифогенного комплекса в восточной части Курейской синеклизы. Научно-практическая конференция «Нефтегазогеологический прогноз и перспективы развития нефтегазового комплекса востока России» 22-26 ноября 2010 г., ФГУП «ВНИГРИ». - Санкт-Петербург, 2010. - С. 125-130.
3. Евграфов А.А., Шайдаков В.А. Строение рифогенного барьера нижнего-среднего кембрия и обоснование глубокого бурения на восточном борту Курейской синеклизы для определения перспектив его нефтегазоносности. (материалы второй научно-практической конференции 21-24 апреля 2015 г.). - Новосибирск: СНИИГГиМС, 2015.
4. Сухов С.С. Фациально-стратиграфическая модель Далдыно-Мархинской банки – иллюстрация закономерностей карбонатакопления на Сибирской платформе. – Литология и нефтегазоносность карбонатных отложений // Материалы второго Всероссийского симпозиума по ископаемым кораллам и рифам. - Сыктывкар: Геопринт, 2001. - С. 237-239.

© А. В. Мамаева, Е. Н. Махнач, 2016

## **АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА**

### ***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: MikhaylovIV@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, зав. 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

Реализован алгоритм совместной двумерной инверсии данных электромагнитного и электрического каротажа на основе метода конечных разностей. Алгоритм позволяет получать согласованную геоэлектрическую модель сложного геологического разреза.

**Ключевые слова:** электрокаротаж, двумерная инверсия, комплексирование методов, метод конечных разностей, нелинейная минимизация.

## **AN ALGORITHM FOR JOINT 2D INVERSION OF ELECTROMAGNETIC AND ELECTRIC LOGS**

### ***Igor V. Mikhaylov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D. Student, Leading Programmer, e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

### ***Viacheslav N. Glinskikh***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, 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, Koptyug Prospect 3, 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, Lavrentjeva Prospect 6, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We have implemented an algorithm for joint 2D inversion of electromagnetic and electric logging data, which relies on the finite difference method. The algorithm allows for obtaining a consistent geoelectric model of the complex geologic section.

**Key words:** electrologging, 2D inversion, integration of methods, finite difference method, nonlinear minimization.

Настоящая работа посвящена развитию алгоритмической базы численной инверсии данных электрокаротажных зондирований для повышения достоверности восстановления распределения электрофизических параметров геологических разрезов нефтяных и газовых скважин [4, 5, 7, 8]. Одним из приемов повышения точности результатов интерпретации является выполнение инверсии по данным комплекса методов с привлечением реалистичных моделей. Основная идея заключается в совместной численной инверсии данных электромагнитного и электрического каротажа в рамках осесимметричной среды, что позволяет получать согласованную двумерную геоэлектрическую модель по комплексу методов.

В отличие от приближенных алгоритмов двумерного моделирования и инверсии сигналов электромагнитного каротажа в линеаризованных постановках [2, 3, 9], реализованный алгоритм использует решение прямой двумерной задачи на основе метода конечных разностей [6]. Стартовая модель основана на результатах одномерной инверсии в рамках цилиндрически-слоистой модели среды. Оптимизационным подходом к решению обратной задачи является нелинейная минимизация функционала невязки, традиционно описывающегося среднеквадратичным расхождением практических и синтетических диаграмм. Итерационно выполняется численная инверсия по пластам изучаемого разреза с определением их электрофизических и геометрических параметров.

Алгоритм апробирован на зашумленных синтетических, а также на практических данных электромагнитного и электрического каротажа из скважин Западной Сибири. Рассмотрим результат применения алгоритма на практических диаграммах с интервала пластов АС<sub>5-6</sub> Фёдоровского месторождения (рисунок). В данном примере стартовая модель построена по результатам одномерной инверсии данных электромагнитного каротажа. Как видно на рисунке (сверху слева), совпадение соответствующих практических (сплошные линии) и синтетических (пунктир) диаграмм достаточно удовлетворительное. В то же время ситуация значительно хуже с диаграммами электрического каротажа, где расхождение между одноименными кривыми значительно (рисунок, сверху справа).

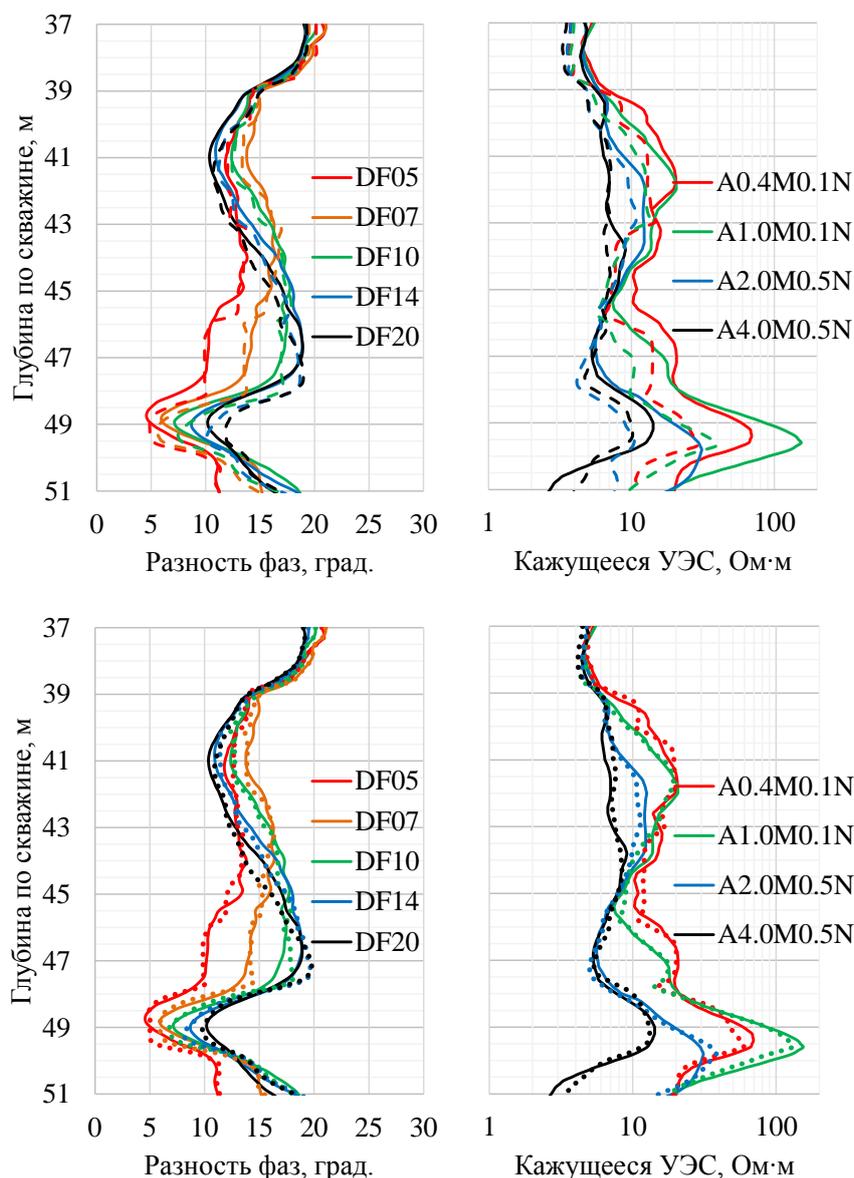


Рис. Диаграммы электромагнитного (слева) и электрического (справа) каротажа на интервале пластов АС<sub>5-6</sub> Фёдоровского месторождения. Сплошные линии – практические диаграммы, пунктирные – рассчитанные в стартовой модели, точечные – в модели, полученной в ходе совместной двумерной инверсии

В результате совместной двумерной инверсии все параметры модели уточнены. Результат приведен на рисунке снизу. Отмечается высокая степень совпадения практических и синтетических диаграмм как электромагнитного, так и электрического каротажа. Найденная согласованная геоэлектрическая модель отражает наличие глинистых отложений в верхней части разреза, перекрывающих нефтеводонасыщенный коллектор с уменьшением водонасыщения при движении сверху вниз, на что указывает наличие окаймляющих зон [1] и уменьшение удельного электрического сопротивления неизменной части пласта. В нижней части коллектор осложнен высокоомным

карбонатным прослоем. Отдельно заметим, что электрофизические параметры высококонтрастных пластов удается удовлетворительно подобрать, как правило, после уточнения положения горизонтальных границ.

Итак, реализован алгоритм совместной двумерной инверсии данных электромагнитного и электрического каротажа на основе метода конечных разностей и нелинейной минимизации, позволяющий с достаточной для практики точностью строить реалистичные геоэлектрические модели геологических разрезов сложного строения.

Работа поддержана Правительством Новосибирской области.

#### 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 - 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 учётом токов смещения // Геология и геофизика. - 2013. - Т. 54. - № 12. - С. 1942-1951.
3. Глинских В. Н., Нестерова Г. В., Эпов М. И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика. - 2014. - Т. 55. - № 5-6. - С. 1001-1010.
4. Михайлов И. В., Глинских В. Н. Особенности сигналов ВИКИЗ и их численная инверсия в окрестности границ «глина-песчаник» // Каротажник. - 2015. - Вып. 1. - С. 24-34.
5. Михайлов И. В., Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Суродина И. В. Двумерная инверсия данных электромагнитного каротажа на основе метода конечных разностей и нелинейной минимизации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – 156–160.
6. 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.
7. 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
8. и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. - 2010. - № 2. - С. 16-19.
9. Nikitenko M. N., Surodina I. V., Mikhaylov I. V., Glinskikh V. N., Suhorukova C. V. Formation Evaluation via 2D Processing of Induction and Galvanic Logging Data Using High-performance Computing // Extended Abstracts of the 77th EAGE Conference & Exhibition (Madrid, Spain, 1-4 June, 2015) - 2015. - Tu N107 15.
10. Tabarovsky L. A., Rabinovich M. B. Real time 2D inversion of induction logging data // Journal of Applied Geophysics. - 1998. - Vol. 38. - Iss. 4. - P. 251-275.

© И. В. Михайлов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина, 2016

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ ЛИФТОВОЙ КОЛОННЫ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ НА ОСНОВАНИИ ЧИСЛЕННОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Дмитрий Игоревич Михальченко*

Инженерно-технический центр ООО «Газпром добыча Надым», 629730, Россия, г. Надым, ул. Полярная, 1, инженер службы геотехнического мониторинга, тел. (922)479-82-29, e-mail: Mikhalchenko.DI@nadym-dobycha.gazprom.ru

Представлены результаты промысловых исследований эффективности теплоизолированных лифтовых труб (ТЛТ), используемых для снижения теплового воздействия газодобывающих скважин на многолетнемерзлые породы. В целях интерпретации полученных данных выполнен анализ развития тепловых процессов в муфтовой зоне ТЛТ посредством численного теплотехнического моделирования.

**Ключевые слова:** теплоизолированная лифтовая труба (ТЛТ), теплофизические характеристики, муфтовое соединение, многолетнемерзлый грунт, мониторинг.

## **NUMERICAL THERMAL ANALYSIS OF PERFORMANCE OF VACUUM INSULATED TUBING STRING OF GAS WELL IN PERMAFROST**

*Dmitry I. Mikhalchenko*

Engineering Center, Gazprom Dobycha Nadym LLC, 629730, Russia, Nadym, Polyarnaya Str. 1, Engineer of department of geotechnical monitoring, tel. (922)479-82-29, e-mail: Mikhalchenko.DI@nadym-dobycha.gazprom.ru

The article reviews results of field studies of vacuum insulated tubing (VIT) used to reduce thermal influence of gas wells on permafrost soils. In order to interpret field data, numerical thermal analysis of VIT coupling zone is conducted.

**Key words:** vacuum insulated tubing (VIT), thermal properties, coupling, permafrost soil, monitoring.

Освоение газоконденсатных месторождений в условиях криолитозоны сопряжено с рядом проблем в области обеспечения эксплуатационной надежности газовых скважин (ГС). Интенсивное тепловое влияние добываемого продукта сопровождается образованием и развитием вокруг ствола скважины кольцевого концентрического фронта оттаявших многолетнемерзлых пород (ММП), что, в зависимости от сложности криогенного строения верхней части разреза, может привести к формированию термокарстовой просадки грунта в устьевой зоне и обрушению стенок скважины. Следствием данных процессов может являться широкий спектр осложнений: продольные изгибы обсадных колонн из-за потери устойчивости в воронке оттаивания, нарушение герметичности обсадных колонн и фонтанной арматуры, деформации трубопроводов скважинной обвязки [1].

Данная проблема особенно актуальна при эксплуатации скважинного фонда Бованенковского месторождения (БНГКМ), для территории которого

характерно повсеместное распространение сильнольдистых ММП с включениями залежей пластового и жильного льда, дающих значительные просадки при оттаивании. В связи с этим для снижения тепловой нагрузки на ММП проектными решениями предусмотрено применение в верхней части конструкции скважин БНГКМ теплоизолированных лифтовых труб (ТЛТ) взамен стандартных насосно-компрессорных (НКТ).

ТЛТ представляет собой конструкцию из двух концентрично расположенных стальных труб, сваренных по торцам, с кольцевым зазором между ними (рис. 1). Кольцевая полость вакуумируется и заполняется экранирующим материалом для предотвращения теплообмена излучением. Лифтовая колонна, собранная из ТЛТ, обладает низкими значениями коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) в диапазоне 0,008-0,016 Вт/м·°С (против  $\lambda \approx 47$  Вт/м·°С у обычной стальной НКТ), что позволяет существенно сократить мощность тепловых потоков от скважины в толщу мерзлых пород.

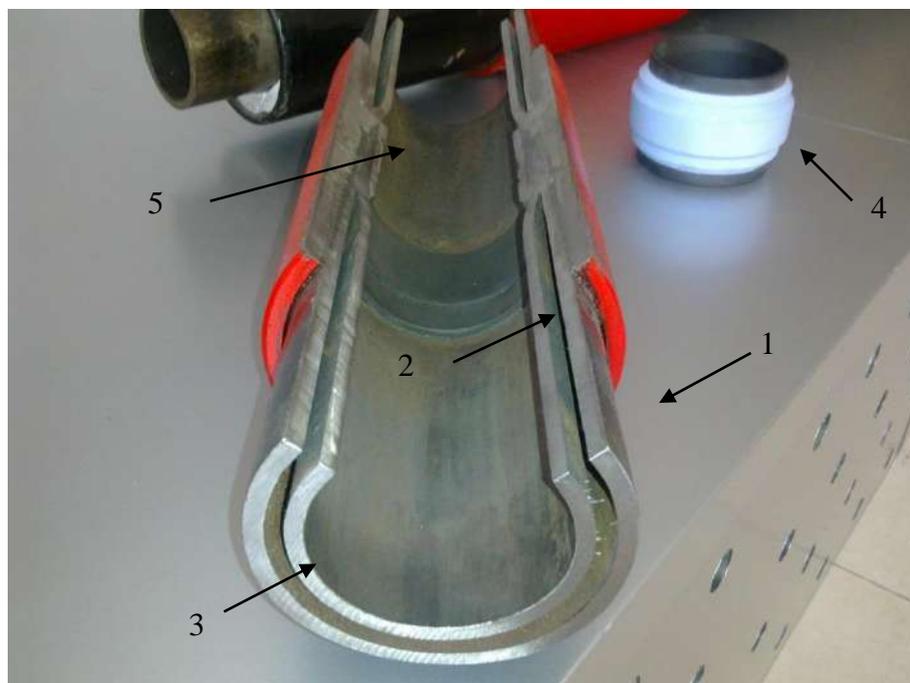


Рис. 1. Конструкция ТЛТ в разрезе. 1 – внешняя труба; 2 – внутренняя труба; 3 – кольцевая вакуумируемая полость; 4 – муфтовый вкладыш; 5 – зона муфтового соединения

Необходимо заметить, что в силу конструктивных особенностей для ТЛТ характерны повышенные теплотери в зоне муфтового соединения двух соседних секций лифтовой колонны. Для теплоизоляции данных участков применяются муфтовые вкладыши из полимерных материалов (как правило, фторопласта,  $\lambda \approx 0,25$  Вт/м·°С).

Для контроля теплоизоляционных характеристик ТЛТ в устьевых зонах ряда газовых скважин БНГКМ организован мониторинг температурного режима грунтов. С помощью стационарно установленной измерительной

аппаратуры (термозондов) ежедневно регистрируются значения температуры грунтов в трубках-сателлитах, обустроенных на стенке внешней обсадной трубы на контакте с массивом ММП.

На рис. 2 приведена температурная кривая, характеризующая температурное состояние ММП устьевого зоны ГС № 4603 БНГКМ на период максимального оттаивания (конец теплого периода года).

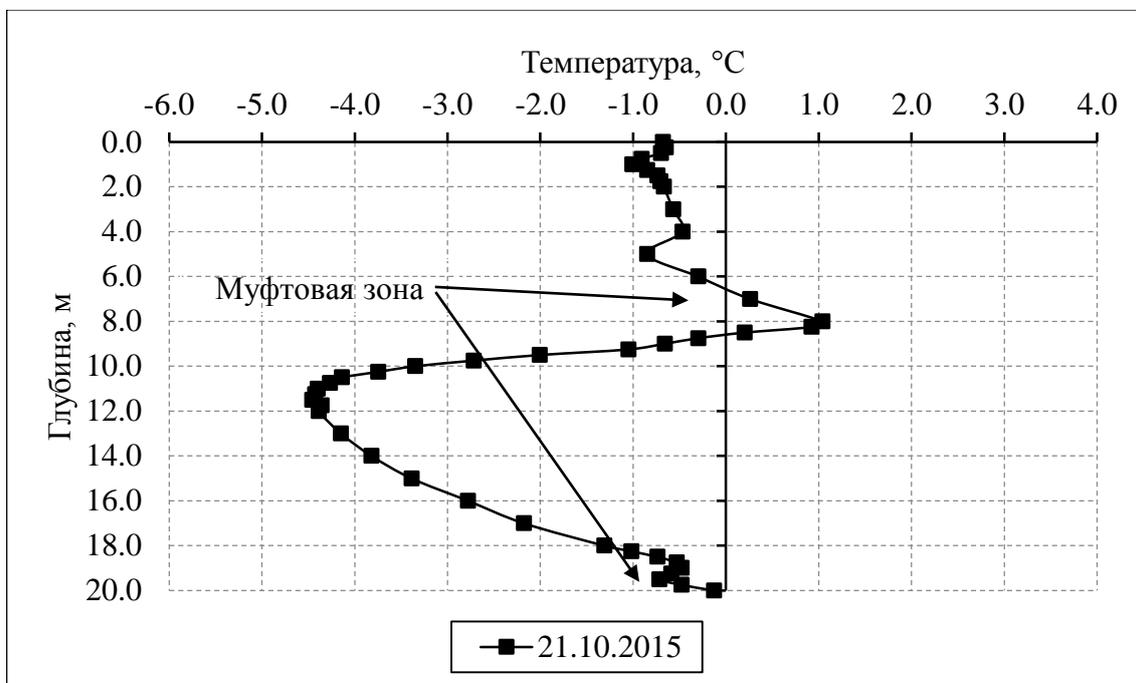


Рис. 2. Температура в трубке-сателлите ГС № 4603 БНГКМ

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что, хотя на большей части длины лифтовой колонны мерзлое состояние ММП обеспечивается, в зоне муфтового соединения фиксируется формирование крупного участка оттаивания. При длине муфтой зоны порядка 0,2 м размер области ее теплового влияния даже с учетом наличия изолирующего муфтового вкладыша достигает нескольких метров, что значительно превышает предварительные оценки.

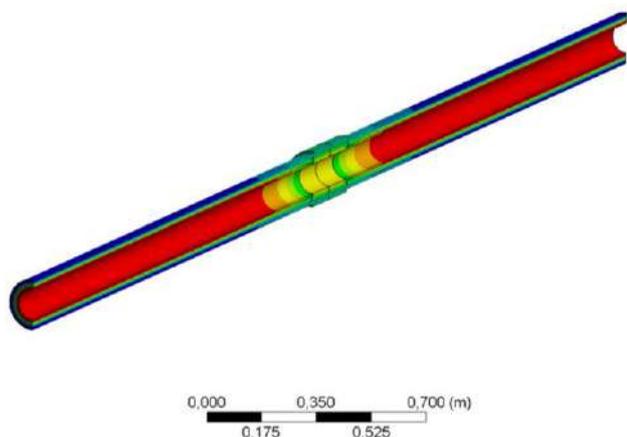


Рис. 3. Фрагмент расчетной модели

В целях интерпретации результатов промышленного мониторинга с помощью специализированного конечно-элементного программного комплекса выполнен численный анализ развития тепловых процессов в зоне муфтового соединения ТЛТ при взаимодействии скважины с ММП. Фрагмент расчетной модели приведен на рис. 3.

Теплотехнический расчет выполнен в стационарной постановке.

На внутренней трубе ТЛТ задана постоянная температура 30 °С, соответствующая устьевой температуре газа для продуктовых пластов ТП<sub>1-6</sub> БНГКМ. На внешней границе цементного кольца на контакте с ММП задана варьирующая по глубине температура грунтового массива. Коэффициент теплопроводности изоляции ТЛТ принят равным 0,008 Вт/м·°С.

В рамках теплотехнического моделирования рассмотрено 4 варианта конструкции муфтовой зоны ТЛТ.

1. Типовая конструкция муфтовой зоны, предполагающая наличие муфтового вкладыша из фторопласта и стальных сварных швов по торцам труб.

2. Вариант конструкции муфтовой зоны, предполагающий применение муфтового вкладыша из материала с теплопроводностью, равной теплопроводности вакуумной прослойки ТЛТ ( $\lambda=0,008$  Вт/м·°С).

3. Вариант конструкции муфтовой зоны, предполагающий отсутствие теплового потока через сварные швы по торцам труб.

4. В качестве эталонного варианта для тех же граничных условий выполнен расчет участка ТЛТ, расположенного вне зоны муфтового соединения.

По результатам моделирования (рис. 4) установлено, что основные теплотери в муфтовой зоне происходят не через муфтовый вкладыш, а через металл сварных швов по торцам труб. При этом происходит интенсивное распространение теплоты по наружной стенке внешней трубы ТЛТ в вертикальном направлении. Суммарная длина зоны теплового влияния муфты составляет около 4 м, что согласуется с экспериментальными данными.

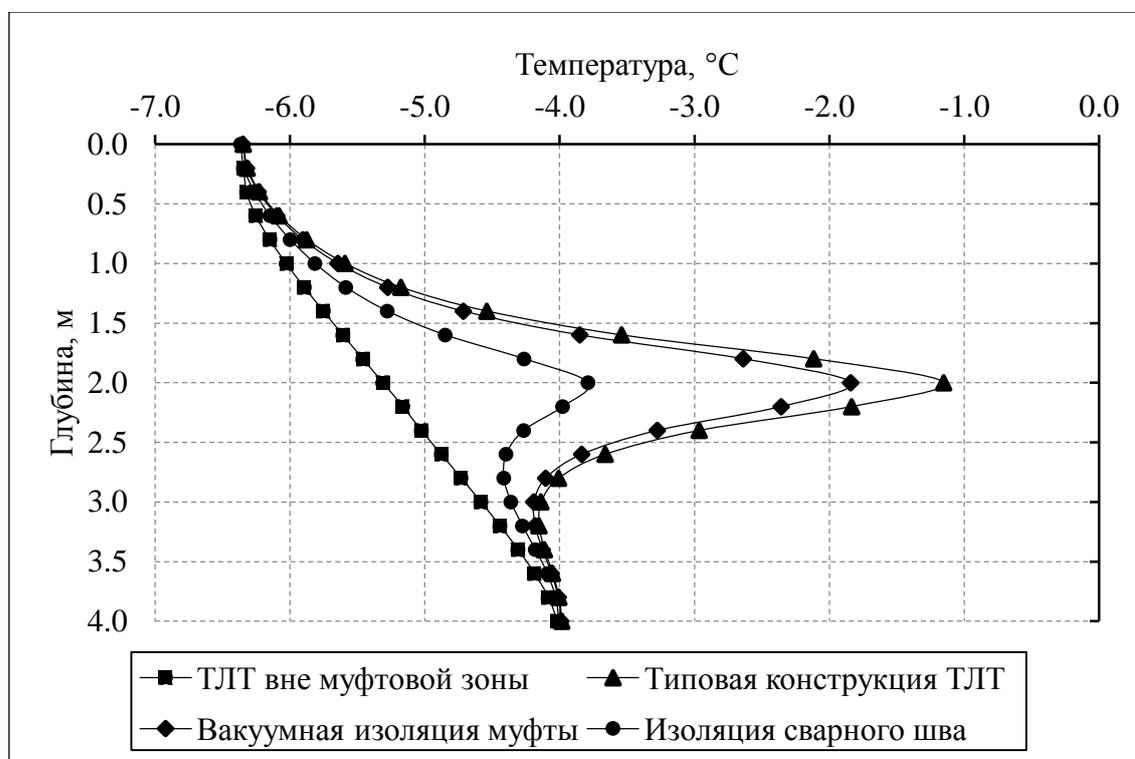


Рис. 4. Результаты теплотехнического моделирования. Распределение температуры по стенке внешней обсадной трубы для различных вариантов конструкции ТЛТ

Исключение теплового потока через сварные швы позволяет значительно приблизить форму температурной кривой к эталонной прямой, соответствующей участку ТЛТ вне муфтовой зоны. В то же время снижение коэффициента теплопроводности материала муфтового вкладыша оказывает незначительное влияние на суммарную величину теплопотерь через зону муфтового соединения.

Описанные работы по промышленному мониторингу и численному моделированию выполнены в рамках разработки методики определения коэффициента теплопроводности изоляции ТЛТ в промышленных условиях ввиду невозможности непосредственной регистрации значений данного параметра с помощью измерительной аппаратуры. Важным следствием полученных данных является невозможность достоверного определения величины коэффициента теплопроводности изоляции ТЛТ по указаниям СТО Газпром 2-3.2-174-2007 [2] вследствие неучета теплового потока в вертикальном направлении. Для корректного решения данную задачу необходимо решать как минимум в двухмерной постановке, что возможно только при использовании специализированного программного обеспечения.

Полученные данные будут учтены на следующем этапе работ по разработке методики экспресс-оценки коэффициента теплопроводности изоляции ТЛТ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов А.П. Управление геотехническими системами газового комплекса в криолитозоне: прогноз состояния и обеспечение надёжности: дис. ... д-ра тех. наук. - Тюмень, 2005. - 184 с.
2. СТО Газпром 2-3.2-174-2007. Технические требования к теплоизолированным лифтовым трубам. - Введ. 27.03.2008. - М.: ИРЦ Газпром, 2008. - 30 с.

© Д. И. Михальченко, 2016

## **ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Леонид Анатольевич Назаров*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

*Лариса Алексеевна Назарова*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: lanazarova@ngs.ru

*Антон Владимирович Панов*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)217-06-36, e-mail: anton-700@yandex.ru

*Нелли Александровна Мирошниченко*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Разработана и методом конечных элементов реализована детальная 3D геомеханическая модель Таштагольского железорудного месторождения, описывающая эволюцию напряженно-деформированного состояния в процессе отработки в период 1978–2014 гг. При моделировании учтены следующие факторы: взаимосвязь локальных и региональных полей напряжений, геолого-структурные и тектонические особенности залежи, рельеф местности и изменение конфигурации выработанного пространства. Полученные результаты предназначены для геомеханического обоснования технологии дальнейшей отработки и установления количественной связи между параметрами напряженного состояния и сейсмической активностью месторождения.

**Ключевые слова:** массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, объемная геомеханическая модель, метод конечных элементов, Таштагольское месторождение.

## **EVOLUTION OF STRESS–STRAIN STATE OF ROCK MASS IN TASHTAGOL IRON ORE MINING BASED ON 3D MODELING**

*Leonid A. Nazarov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Principal Scientific Researcher, tel. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

*Larisa A. Nazarova*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Doctor of Science, Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: lanazarova@ngs.ru

**Anton V. Panov**

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Junior Researcher, tel. (383)217-06-36, e-mail: anton-700@yandex.ru

**Nelli A. Miroshnichenko**

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Ph. D, Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Developed and implemented with the finite element method, the detailed 3D geomechanical model of Tashtagol iron ore deposit describes evolution of stress–strain state of rocks in the course of mining from 1978 to 2014. The modeling accounts for the following factors: interaction of local and regional stress fields; geological, structural and tectonic features of the deposit; terrain relief and change in geometry of mined-out voids. The results are intended for geomechanical evaluation of a geotechnology to be used further and for finding quantitative relationship between stress state parameters and seismic activity in the area.

**Key words:** rock mass, stress-strain state, 3D geomechanical model, finite-element method, Tashtagol deposit.

Геомеханическая модель является одним из основных этапов при обосновании схемы вскрытия и технологии отработки месторождений. Она также необходима для оценки текущего состояния породного массива и прогноза его изменения в ходе ведения горных работ. Промышленная эксплуатация Таштагольского железорудного месторождения (ТЖМ) началась в 1940-х гг. Несмотря на это, была предпринята единственная попытка создания его объемной геомеханической модели [1], где шаг дискретизации (составлявший в среднем 100 м) не позволял детально описать процесс отработки. К настоящему моменту горные работы ведутся уже на более глубоких горизонтах, резко возросла наведенная сейсмичность региона, вплоть до возникновения техногенных динамических событий [2], магнитуда которых сравнима с таковой для умеренных природных землетрясений. Указанные обстоятельства и стали побудительной причиной создания и исследования детальной модели ТЖМ, являющейся предметом настоящей статьи.

На ТЖМ разрабатывают сближенные рудные тела линзообразной формы субвертикального падения. Мощность рудной зоны изменяется от 4 до 100 м, длина по простиранию – до 600 м, по падению они прослеживаются на глубину до 1500 м. Вмещающий массив представлен сиенитами, скарнами, диоритами, сланцами, гранодиоритами, порфиритами и известняками. Рудные тела секутся дайками микросиенитпорфира и диабазы мощностью от нескольких сантиметров до 12 м и разрывными нарушениями мощностью от 5 до 30 м, по которым наблюдается смещение крыльев до 120 м [3]. Разработка запасов предусматривает разделение рудного тела на этажи высотой 70 м, которые делятся на панели шириной 13.5÷27 м и длиной, равной мощности рудного тела. Основная технология отработки – взрывание сближенных зарядов ВВ. В настоящее время очистные работы достигли отметки 760 м, вскрытие осуществляется на глубине свыше 900 м (гор. –350 м).

Для построения 3D геомеханической модели месторождения отсканированы копии производственных планов горных работ на горизонтах +70, 0, -70, ..., -490 м, а затем произведена их оцифровка в локальной декартовой системе координат с шагом около 25 м. Во введенной локальной системе координат начало координат находится на нулевом горизонте, ось  $Ox$  направлена вкост простирания рудных тел, ось  $Oy$  – по простиранию (азимут  $140^\circ$ ), ось  $Oz$  – вертикально вниз. Далее проводилась привязка данных оцифровки к географическим координатам для учета в модели рельефа местности. Рельеф снимался с карты М 1:50000; при необходимости применялась линейная интерполяция.

Моделируемая область имеет размеры  $2.5 \times 4 \times 1$  км по соответствующим осям координат и полностью содержит Таштагольский рудник. Верхняя граница области расположена на отметке +70 м, ниже минимальной отметки рельефа +120 м. В пределах расчетной области учтены данные о нарушениях сплошности; все они – крутопадающие, с углом наклона  $80-90^\circ$ .

Дискретизация расчетной области на конечные элементы ассоциировалась с геолого-структурными и тектоническими особенностями залежи. В соответствии с подходом, предложенным в [4], на первом этапе осуществлялось разбиение на четырехугольники горизонтальных сечений области с шагом по вертикальной оси 35 м (половина этажа отработки), а затем из 2D-элементов производилась компоновка 3D-сетки элементов-гексаэдров. Разломные нарушения моделировались контакт-элементами. На внутренних границах – контурах рудных тел и вдоль линий разломов – сетка сгущалась. В целом расчетная область содержит 95 тыс. элементов, средние размеры которых –  $25 \times 25 \times 35$  м (рис. 1).

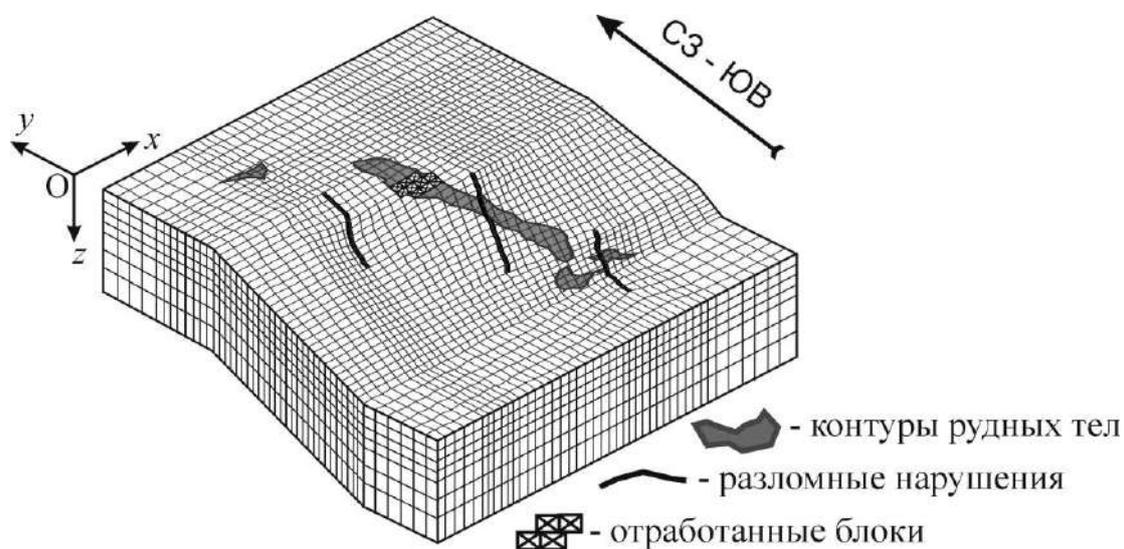


Рис. 1. Фрагмент конечноэлементной 3D-модели Таштагольского железорудного месторождения (верхняя плоскость – горизонт -210 м)

Физические свойства пород с учетом конфигурации выработанного пространства по состоянию на 1978, 1989, 1998, 2009 и 2014 гг. задавались анало-

гично [1], а горизонтальные напряжения в нетронутом массиве – по [5]. Реализация модели осуществлялась с использованием оригинального кода [1, 4].

Было рассчитано напряженно-деформированное состояние ГЖМ на всех перечисленных выше этапах отработки, но вследствие ограниченного объема статьи приводится лишь один пример, иллюстрирующий эволюцию поля напряжений: рис. 2 демонстрирует распределение компоненты  $\sigma_{yy}$  (по простиранию рудных тел) на горизонтах –140 м и –210 м.

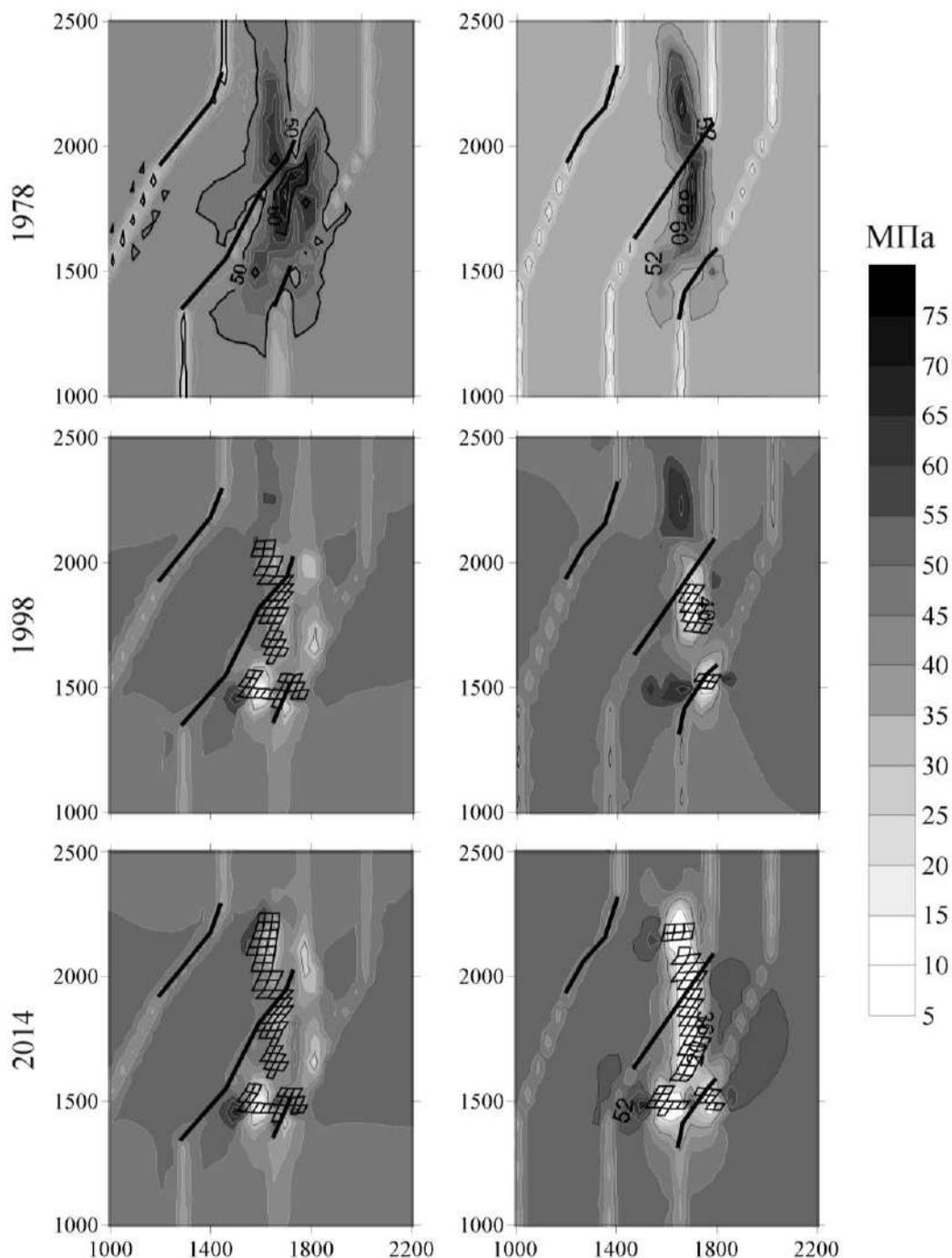


Рис. 2. Изолинии напряжения  $\sigma_{yy}$  на различных этапах отработки (столбец слева – горизонт –140 м, справа –210 м)

Здесь отчетливо виден процесс миграции зон повышенных напряжений: на ранних этапах отработки они располагаются перед фронтом горных работ, затем перемещаются на фланги выработанного пространства. Высокий уровень напряжений (по сравнению с литостатическими, составляющими на горизонте –210 м около 20 МПа) обусловлен взбросовым геодинамическим режимом природного поля напряжений (коэффициент бокового отпора в направлении у принят, согласно [3, 5, 6], равным 2.5).

Полученные результаты служат входными данными для совместного анализа эволюции детерминированных полей напряжений и деформаций и стохастической информации о техногенной сейсмичности, основанного на подходах, предложенных в [7] для природных и в [8] для антропогенных объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 15-05-06977).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Леонтьев А.В. Объемная геомеханическая модель Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. - 1998. - № 3. - С. 28-37.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенная сейсмичность Кузбасса // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы четвертой тектонофизической школы-семинара. - М.: ИФЗ, 2015. - Т. 1. - С.108-111.
3. Курлень М.В., Авзалов И.А., Еременко А.А., Квочин В.А. Геомеханические условия отработки Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. - 1990. - № 5. - С. 3-9.
4. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - № 1. - С. 91-101.
5. Шрепп Б.В., Нохрин А.М. Оценка напряженного состояния массива пород Таштагольского месторождения // Сб: Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния массива шахт и рудников. - Новосибирск, 1990. - С. 138-142.
6. Назарова Л.А. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // ФТПРПИ. - 1999. - № 1. - С. 28-36.
7. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. и др. Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989-1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. - 1999. - Т. 40. - № 3. - С. 373-386.
8. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ярославцев А.Ф., Мирошниченко Н.А., Васильева Е.В. Эволюция геомеханических полей и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. - 2011. - № 6. - С. 3-11.

© Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, А. В. Панов, Н. А. Мирошниченко, 2016

## **ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

### ***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, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

### ***Петр Валерьевич Пономарев***

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, тел. (952)916-79-62, e-mail: PonomarevPV@ipgg.sbras.ru

### ***Илья Олегович Шапаренко***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, лаборант, тел. (952)926-25-83, e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

В статье рассмотрены результаты исследования методом электротомографии на двух участках, расположенных в западной части Чуйской впадины Горного Алтая. Данные электротомографии подтверждают наличие разломного нарушения между разновысотными блоками фундамента, выявленными по данным ВЭЗ, и указывают на наличие разломных зон, ограничивающих долину р. Чаган по ее правому борту и в юго-западном замыкании. На втором участке в районе пос. Мухор-Тархата обнаружена приповерхностная протяженная низкоомная аномалия, соответствующая предполагаемой зоне разлома по данным ЗС.

**Ключевые слова:** вертикальное электрическое зондирование, электротомография, зондирование становлением поля, Чуйское землетрясение, геоэлектрическое строение в зонах разломов западной части Чуйской впадины.

## **GEOELECTRIC MODELS OF CHUYA BASIN FAULT STRUCTURES ACCORDING TO ERT DATA**

### ***Nina N. Nevedrova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Senior Researcher, tel. (913)890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

### ***Peter V. Ponomarev***

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, engineer, tel. (952)916-79-62, e-mail: PonomarevPV@ipgg.sbras.ru

### ***Ilya O. Shaparenko***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Laboratory, tel. (952)926-25-83, e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

The article describes the results of a study by ERT in two areas located in the western part of Chuya basin of the Altai Mountains. ERT data confirmed the presence of fault disturbances between foundation blocks identified according to VES, and indicate the presence of fault zones, limiting Chagan river valley on her right side and the south-west. In the second section near the village. Mukhor-Tarkhata extended low-impedance anomaly fault zone was detected.

**Key words:** vertical electric sounding, ERT, Chuya earthquake, TEM, seismically active zone, geoelectric structure of fault zones in the western part of Chuya basin.

Первый участок исследований расположен в 20 км от эпицентра Чуйского землетрясения 2003 г., в долине р. Чаган. Расположение пунктов ВЭЗ и профилей электротомографии показано на рис. 1.

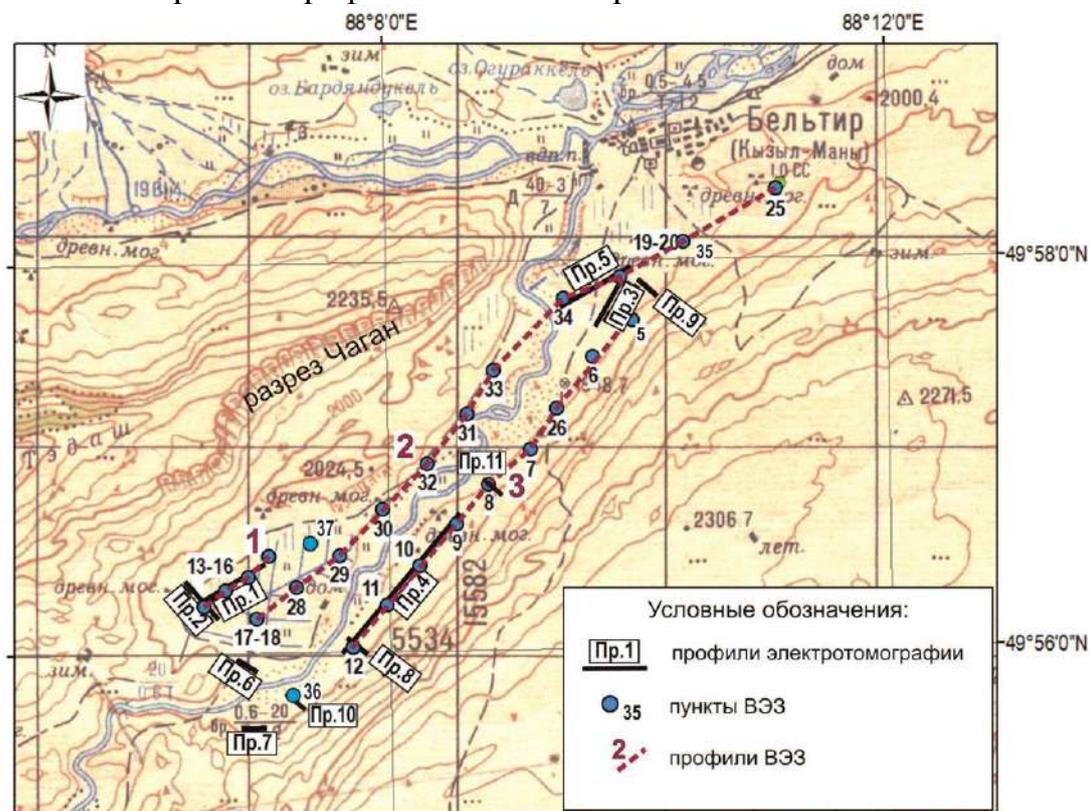


Рис. 1. Схема расположения пунктов ВЭЗ и профилей электротомографии в долине р. Чаган

Ранее по данным ВЭЗ построены глубинные геоэлектрические модели осадочной толщи, верхней части фундамента долины р. Чаган и выделены предполагаемые разломные структуры. Измерения методом электротомографии были выполнены на локальных участках с целью получения детальных приповерхностных характеристик выявленных разломных зон: положения и наклона сместителя, интервалов удельного сопротивления, характерных для этих структур. Фактически данные электротомографии подтверждают наличие разломов, верифицируя модели, полученные по данным ВЭЗ, а в ряде случаев позволяют ее обнаружить. Результаты двух методов хорошо согласуются, а комплексная интерпретация повышает общую информативность исследований.

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 м между электродами. Обработка данных электротомографии для участка долины р. Чаган проведена с использованием

программ двумерной инверсии ZondRes2d и Res2Dinv [5]. Профиль 5 электротомографии длиной в 800 м выполнен между пунктами ВЭЗ №№ 34 и 19-20. На разрезе, практически в его середине, хорошо выделяется субвертикальная зона с пониженным сопротивлением горных пород, разделяющая два более высокоомных блока. Ширина зоны составляет примерно 130 м (рис. 2).

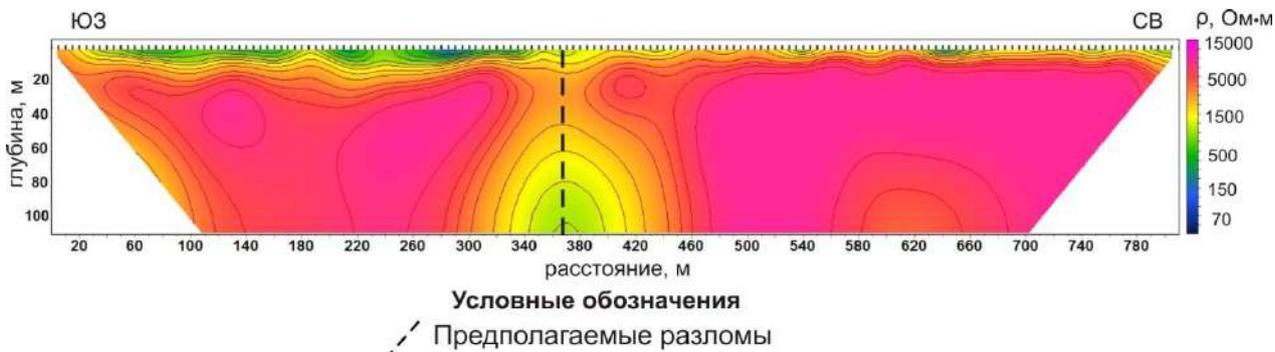


Рис. 2. Разрез по данным электротомографии по профилю 5 (северо-восточная часть долины р. Чаган)

Профили № 8 и 9 протяженностью 235 м выполнены по правому борту долины. Полученные геоэлектрические разрезы показали, что профили в разных местах пересекают проводящую субвертикальную зону, которую можно интерпретировать как разлом (рис. 3).

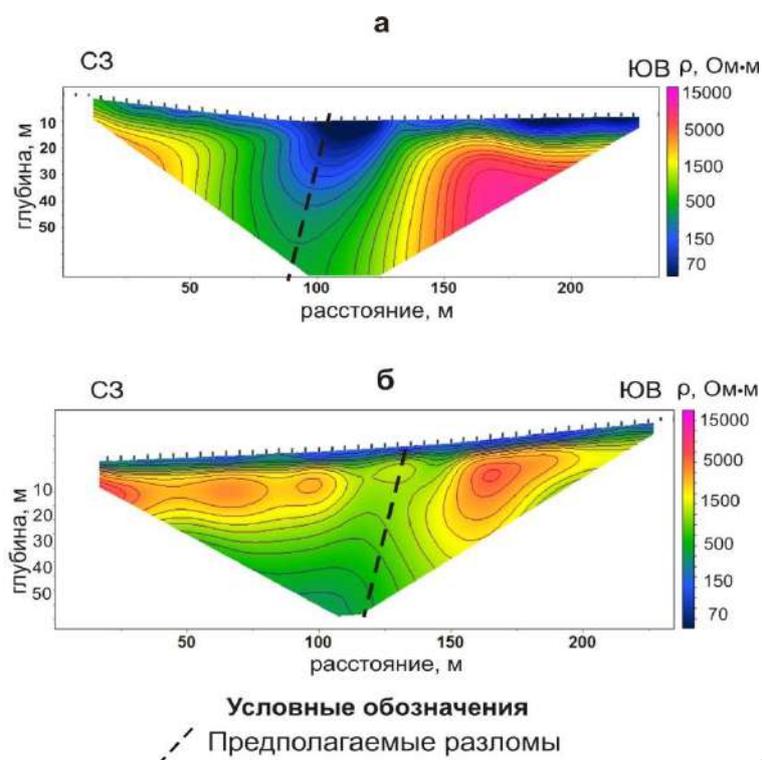


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии: а – по профилю 9, б – по профилю 8. Правый борт долины р. Чаган

Таким образом, электротомографические исследования по профилям 9 и 8 позволяют предположить, что правый борт долины р. Чаган имеет разломное ограничение.

Второй объект исследования расположен вблизи пос. Мухор-Тархата (рис. 4). Четыре параллельных профиля находятся над предполагаемой разломной зоной. Задачей исследования являлось обнаружение зоны разлома методом электротомографии.

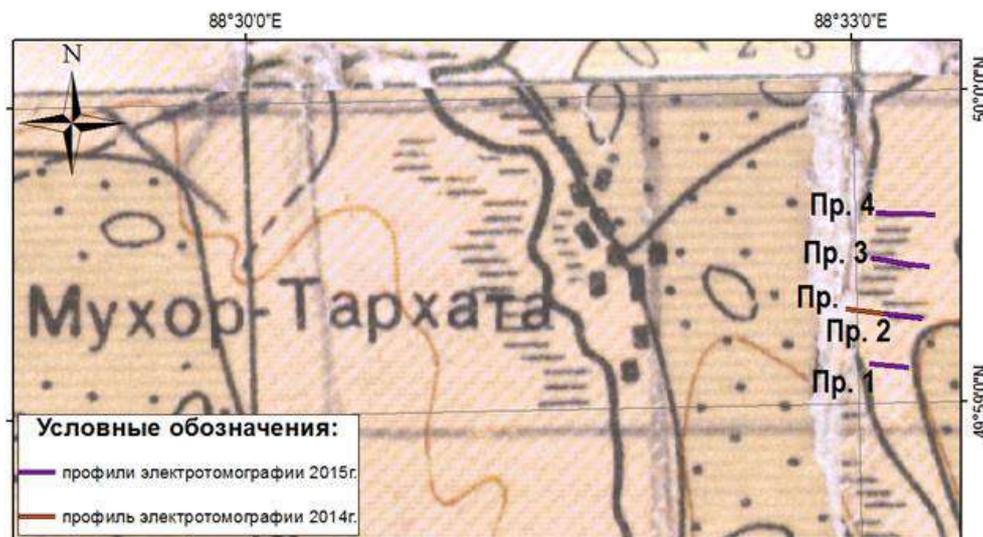


Рис. 4. Расположение профилей электротомографии в районе пос. Мухор-Тархата

По данным профильных измерений была построена псевдо 3D-модель с помощью программы ERTLab. Длина двух южных профилей составила 235 м, а длина двух северных – 355 м. Разная длина профилей обусловлена особенностями участка, частично заболоченного. Горизонтальный срез трехмерной модели показан на глубине 40 м (рис. 5). В плоскости среза четко прослеживается вытянутая зона пониженных сопротивлений шириной до 100 м. Согласно априорным геофизическим (метод ЗС) и геологическим данным, можно предположить, что эта низкоомная аномалия соответствует выходу протяженной разломной зоны к поверхности.

Таким образом, на двух разных участках Чуйской впадины данные электротомографии указывают на возможность прослеживания выявленных по данным ВЭЗ и ЗС разломных зон и в четвертичных приповерхностных отложениях. Понижение сопротивлений может быть следствием повышенной трещиноватости отложений в зоне влияния разломной зоны и/или ее обводненности.

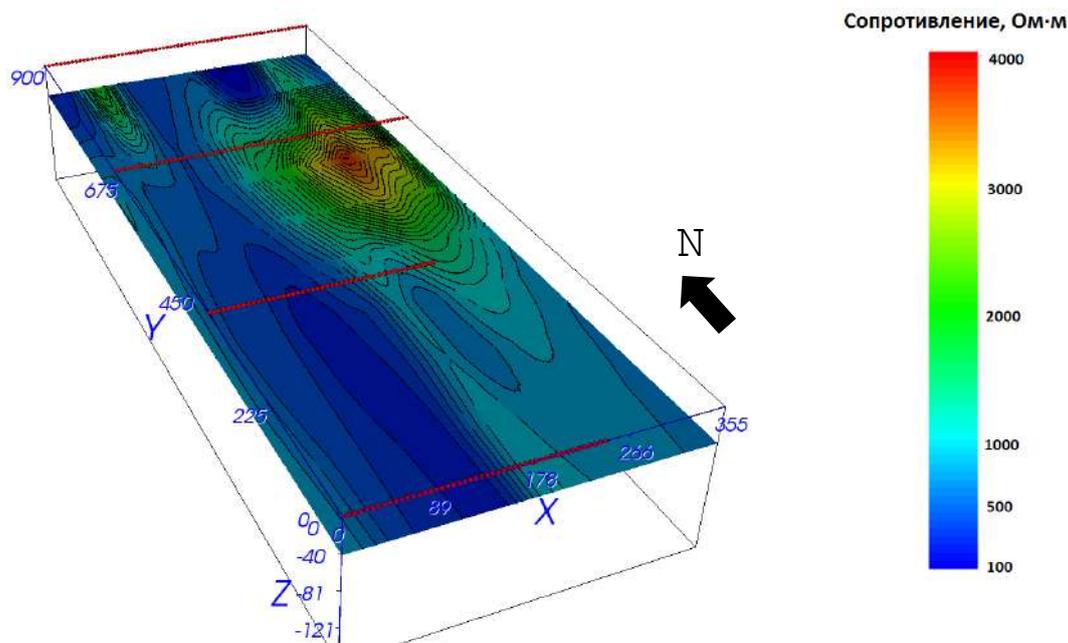


Рис. 5. 3D-модель участка Мухор-Тархата с зоной разлома. Срез по глубине 40 м

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девяткин Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника юго-восточного Алтая. - Москва: Наука, 1965. - 244 с.
2. Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Реконструкция глубинного строения Чуйской Впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. - 2001. - Т. 42. - № 9. - С. 1399-1416.
3. Неведрова, Н.Н, Пономарев П.В., Деев Е.В. Геоэлектрические исследования Чуйской впадины Горного Алтая для уточнения ее строения и четвертичной истории // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «Геобайкал 2010» (Иркутск, 5-20 августа 2010г.).
4. Лузгин Б.Н., Русанов Г.Г. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая // Геология и геофизика. - 1992. - Т. 4. - С. 23-27.
5. Zond – программы для геофизики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.zond-geo.ru>.

© Н. Н. Неведрова, П. В. Пономарев, И. О. Шапаренко, 2016

## **БЫСТРОЕ ДВУХТОЧЕЧНОЕ ТРАССИРОВАНИЕ ЛУЧЕЙ ДЛЯ 3D МЕЖСКВАЖИННОЙ ТОМОГРАФИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕННОСТИ СПЕКТРА ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА**

*Дмитрий Александрович Неклюдов*

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: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

*Максим Игоревич Протасов*

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; Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский туп., 4, тел. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

В работе рассматривается решение двухточечной задачи трассирования лучей для трехмерных сред методом изгиба. Рассматривается модифицированный функционал Ферма, обеспечивающий более устойчивое вычисление лучей и времен пробега вдоль них при наличии в среде резких контрастов. Модель среды описывается с помощью полиномов Чебышева, что позволяет получить весьма эффективный алгоритм минимизации на основе нелинейного метода сопряженных градиентов. Разработанный алгоритм предназначен для решения трехмерной задачи кинематической томографии межскважинного пространства.

**Ключевые слова:** двухточечное трассирование, кинематическая томография, метод изгиба, полиномы Чебышева.

## **FAST TWO-POINT RAY TRACING FOR THE PROPAGATION OF BAND-LIMITED SIGNALS ORIENTED FOR 3D CROSSWELL TOMOGRAPHY**

*Dmitry A. Neklyudov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Senior Research Scientist, tel. (383)330-27-96, e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

*Maxim I. Protasov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior Research Scientist; ICEMR RAS, 111020, Russia, Moscow, Kryukovsky 4, tel. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

In this paper we present an approach for two-point ray tracing in 3D medium using bending method. It is based on a modified Fermat's principle which can provide more reliable ray paths and traveltimes in complex medium. Model is parameterized with Chebyshev polynomials. This fact introduces algorithmic advantages for the ray tracing because travel times and derivatives can be calculated analytically. So nonlinear conjugate gradient method can be applied efficiently. The proposed approach is oriented for 3D crosswell traveltime tomography.

**Key words:** two-point ray tracing, ray bending, wave-tracing, Chebyshev polynomials.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи межскважинной томографии существенно трехмерны. Это связано с тем, что скважины, в которых происходит возбуждение и регистрация сигналов, не являются строго вертикальными, а существенно искривлены в глубине. Кроме того, при построении детальной модели межскважинного пространства зачастую привлекаются данные, полученные в нескольких скважинах, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Таким образом, возникает необходимость выполнять двухточечную трассировку лучей для весьма больших трехмерных моделей. Широко распространенный метод пристрелки зачастую не дает удовлетворительных результатов при наличии в среде резких контрастов, слоев, включений с резко меняющимися характеристиками. В 3D “пристрелка” оказывается весьма дорогостоящей в вычислительном плане. Альтернативой методу пристрелки может служить метод изгиба [1]. Он основывается на модификации кривой, изначально соединяющей пару источник-приемник таким образом, чтобы удовлетворить принципу Ферма, т. е. минимизировать время вдоль траектории пробега. На практике оказывается, что в 3D-задачах метод изгиба значительно эффективнее решает проблему двухточечного трассирования, чем метод пристрелки. В классической реализации метод изгиба не учитывает ограниченность спектра зондирующего сигнала, что зачастую приводит к нефизическому поведению построенных лучей и времен. В настоящей работе описывается подход, позволяющий отчасти разрешить данную проблему, не прибегая к чрезмерным вычислительным затратам.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИНОМОВ ЧЕБЫШЕВА

В настоящей работе мы полагаем, что трехмерная модель среды, описывающая межскважинное пространство, представляется в виде набора слоев, разделенных неплоскими поверхностями. В каждом слое задана функция «медленности» (величина обратная скорости)  $S_j(x, y)$ , которая зависит от латеральных координат  $x, y$ , но не зависит от глубины  $z$ .  $S_j(x, y)$  определяется через 2D чебышевские полиномы 3й степени:

$$S_j(x, y) = C_0 + C_1x + C_2y + C_3xy + C_4(2x^2 - 1) + C_5(2y^2 - 1) + C_6(2x^2 - 1)y + C_7(2y^2 - 1)x + C_8(4x^3 - 3x) + C_9(4y^3 - 3y), \quad (1)$$

где  $C_k$  – коэффициенты разложения, различные для каждого слоя. Каждая из поверхностей  $Z_j(x, y)$ , разделяющих слои, описываются полиномами Чебышева по аналогии с (1) со своими коэффициентами разложения  $C_k$ . Использование полиномов Чебышева для параметризации модели позволяет получить значительные вычислительные преимущества: времена пробега и их производные по параметрам, определяющим луч, вычисляются аналитически. При решении задачи 3D-томографии межскважинного пространства такое

представление модели позволяет существенно снизить число искомым параметров по сравнению со стандартным сеточным представлением модели.

## ДВУХТОЧЕЧНОЕ ТРАССИРОВАНИЕ ЛУЧА МЕТОДОМ ИЗГИБА

Мы полагаем, что в каждом слое луч представляет собой отрезок прямой, описываемый координатами точек пересечения с верхней и нижней поверхностями,  $(x_j, y_j, z_j)$ ,  $(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$ , где  $j$  – индекс слоя. Отметим, что  $z_j$  и  $z_{j+1}$  есть функции от  $(x_j, y_j)$  и  $(x_{j+1}, y_{j+1})$  через представление поверхностей полиномами Чебышева. Таким образом, для того чтобы построить луч, удовлетворяющий принципу Ферма, мы должны минимизировать целевой функционал  $T = \sum_{j=0}^N T_j(x_j, y_j; x_{j+1}, y_{j+1})$  по переменным  $(x_k, y_k)$  при фиксированном

положении источника и приемника. Чтобы применить метод сопряженных градиентов, необходимо уметь вычислять значение времени пробега вдоль текущей траектории, а также производные от времени по параметрам, определяющим траекторию (в нашем случае  $(x_k, y_k)$ ). Далее покажем, как получить аналитическое выражение для времени пробега и производных вдоль прямолинейного сегмента луча. Для этого необходимо вычислить криволинейный интеграл первого рода от полиномиальной функции (1) вдоль прямой. Рассмотрим один сегмент луча. Будем считать, что его начальная и конечная точки (пересечение с условно нижней и верхней поверхностями) имеют координаты  $(x_0, y_0, z_0)$  и  $(x_1, y_1, z_1)$ . Используя представление прямой в

параметрическом виде, получаем:  $T_j = \int_{Line} S_j(x, y) dl = \int_0^L S_j(x_0 + al, y_0 + bl) dl$ , здесь  $L$

обозначает общую длину сегмента,  $a$ ,  $b$  – косинусы направляющих углов,  $a = (x_1 - x_0)/L$ ;  $b = (y_1 - y_0)/L$ ;  $l$  – элемент длины вдоль прямой (независимый параметр).  $a$ ,  $b$  и  $L$  есть функции от координат точек пересечения. Таким образом, необходимо проинтегрировать полиномиальное выражение (1) после соответствующей подстановки  $x = x_0 + a \cdot l$ ,  $y = y_0 + b \cdot l$  по  $l$  в пределах от 0 до  $L$ . В итоге после ряда преобразований получается несложное аналитическое выражение для времени пробега вдоль прямолинейного сегмента как функция от координат точек  $(x_0, y_0)$  и  $(x_1, y_1)$ . Производные (а также вторые производные) от времени вычисляются дифференцированием полученных аналитических выражений (не приводятся здесь для краткости изложения). Общее время пробега вдоль искомого луча представляется как сумма времен пробега по каждому сегменту. Производная общего времени пробега по переменной  $x_j$  есть сумма двух слагаемых – производных времен пробега в двух смежных слоях,  $j$  и  $j+1$ :

$$\frac{dT}{dx_j} = \frac{dT_{j+1}}{dx_j} + \frac{dT_j}{dx_j}.$$

Имея аналитические выражения для производных времен пробега от координат точек пересечения с поверхностями, мы используем нелинейный

метод сопряженных градиентов для минимизации целевого функционала Ферма. Также можно использовать нелинейный метод Ньютона, что требует получения аналитических выражений для гессиана (матрицы вторых производных). Отметим, что гессиан представляет собой пятидиагональную матрицу. Для учета ограниченности спектра реального зондирующего сигнала мы адаптируем для 3D идею, предложенную в работе [2] для двумерной задачи. Суть подхода заключается в том, что вместо функционала Ферма рассматривается модифицированная целевая функция: ко времени пробега вдоль луча добавляется еще одно слагаемое, характеризующее длину луча:

$$\min T = \min \left[ \sum_{j=1}^N \frac{T_j}{T_{SR}} + \frac{\alpha}{2} \sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j}{L_{SR}} \right)^2 \right].$$

Здесь  $T_j$ ,  $L_j$  – время пробега и длина сегмента луча в  $j$ -ом слое,  $T_{SR}$ ,  $L_{SR}$  – время пробега вдоль прямой, соединяющей источник-приемник и ее длина. Положительная константа  $\alpha$  – регуляризирующая постоянная, которая определяет меру отклонения искомого, в общем случае искривляющегося, луча от прямой. Процедура минимизации модифицированного функционала практически аналогична той, что используется для функционала Ферма. Для вычисления регуляризирующего параметра  $\alpha$  мы используем выражение (18) из работы [2], адаптированное для трехмерного случая.

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Преимущества, которые дает предложенный подход, проиллюстрированы здесь на одном реалистичном численном примере. Трехмерная модель среды состоит из более тысячи тонких слоев, с переменной мощностью до 15 м. В тонкослоистых пачках встречаются слои с резкими скачками скоростей – случай крайне неблагоприятный для стандартных методов трассировки лучей. Две вертикальные скважины расположены на расстоянии 3000 м друг от друга. На рисунке (слева) представлено сечение 3D скоростной модели в плоскости скважин. Здесь продемонстрированы результаты двухточечной трассировки для одного источника. На рисунке приведено сравнение результатов двухточечной трассировки методом пристрелки с предложенным выше подходом. Как можно видеть, стандартная пристрелка дает неудовлетворительные времена в нижней части скважины – там, где лучи имеют направления, близкие к горизонтальному. В методе пристрелки лучи, попадая в высокоскоростную пачку слоев, образуют «дыры» (отмечена зеленым овалом), а также области с многократными вступлениями (отмечена синим). В то же время метод изгиба с модифицированным функционалом дает адекватные результаты. Численные эксперименты показывают, что он обеспечивает гораздо более регулярное покрытие модели лучами, чем стандартный метод изгиба.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм быстрой двухточечной трассировки лучей для трехмерных моделей на основе метода изгиба. Он основан на использовании модифицированного функционала Ферма, в который вводится дополнительное

слагаемое, регулирующее длину луча. Это позволяет в некоторой степени учитывать эффекты, связанные с ограниченностью спектра реальных зондирующих сигналов. Модель среды для трассировки представляется с помощью полиномов Чебышева, что дает заметные вычислительные преимущества, так как времена пробега и производные вычисляются аналитически. Численные примеры доказывают высокую эффективность представленного алгоритма при работе с достаточно большими трехмерными моделями сред.

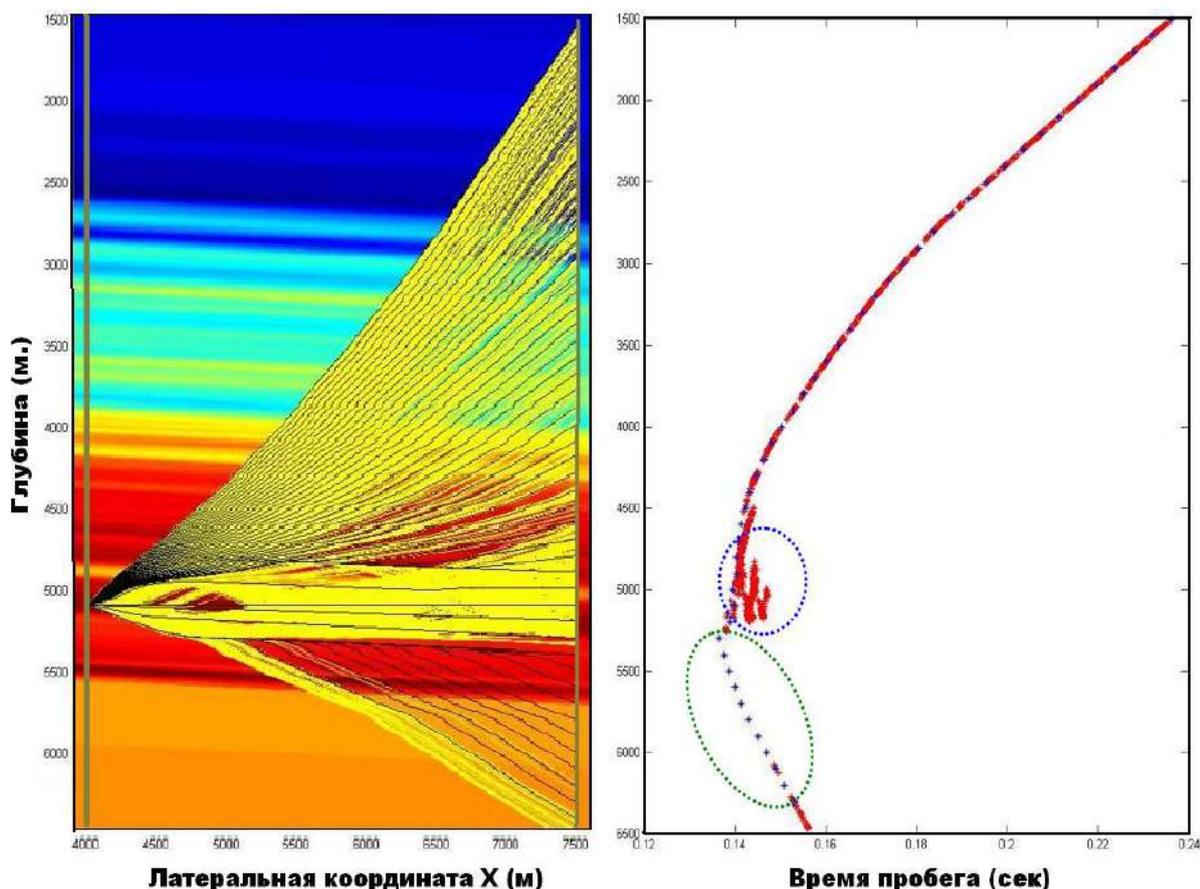


Рис. Лучи и времена в реалистичной модели. Слева лучи, полученные методом пристрелки (желтым) и представленным методом (черным). Справа времена пробега, полученные методом пристрелки (красным) и представленным методом (синим)

Исследования, описанные в данной работе, были поддержаны Российским Научным Фондом, грант №16-17-00029.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Julian, B.R., Gubbins D. Three-dimensional seismic ray tracing // Journal of Geophysical Research. - 1977. - Vol. 43. - P. 95-113.
2. Bube K.P., Washbourne J.K. Wave tracing: ray tracing for the propagation of band-limited signals: Part 1 – Theory // Geophysics. - 2008. - Vol. 73. - P. VE377-VE384.

© Д. А. Неклюдов, М. И. Протасов, 2016

## **ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КАРОТАЖНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЫ**

***Владимир Анатольевич Киндюк***

ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ», 190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Галерная, 5а, главный геолог, центр сопровождения бурения, тел. (812)449-30-91, e-mail: Vladimir.Kindyuk@gmail.com

***Галина Владимировна Нестерова***

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 электромагнитных полей, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

***Игорь Николаевич Ельцов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, заместитель директора, тел. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Проведена интерпретация практических каротажных и синтетических диаграмм на основе совместной электрогидродинамической и геомеханической модели пласта, разработанной ранее. Мультидисциплинарный подход к моделированию процесса проникновения фильтрата бурового раствора в пласт позволяет учесть геомеханические свойства пород при интерпретации данных ГИС и тем самым снизить погрешность определения фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора.

**Ключевые слова:** каротаж, удельное электрическое сопротивление, коэффициент бокового отпора, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование.

## **LOGGING DATA INVERSION USING COUPLED ELECTROHYDRODYNAMIC AND GEOMECHANICAL MODEL OF BOREHOLE ENVIRONMENT**

***Vladimir A. Kindyuk***

ООО «LLC Gazpromneft NTZ», 190000, Russia, St. Petersburg, Galernaya Str. 5a, Chief Specialist, Drilling Support Center, tel. (812)449-30-91, e-mail: Vladimir.Kindyuk@gmail.com

***Galina V. Nesterova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior Scientist of the Laboratory of electromagnetic fields, tel. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.nsc.ru

***Igor N. Yeltsov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Associate Professor, Deputy director on scientific work, tel. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

Well-log data as well as theoretical ones were interpreted using coupled electrohydrodynamic and geomechanical model of borehole environment. Multiphysics simulation of processes near borehole improves formation evaluation obtained by interpretation of the data of geophysical well logging.

**Key words:** logging, resistivity, lateral pressure factor, stress-strain state, numerical simulation.

При бурении скважины происходит изменение фильтрационно-емкостных свойств пород вблизи скважины, связанное как с уплотнением породы, так и с ее разуплотнением [1, 7-12]. Все это влияет на проникновение фильтрата бурового раствора в пласт, а следовательно, и на результаты геофизических скважинных измерений. Игнорируя изменение напряженно-деформированного состояния среды, можно некорректно проинтерпретировать данные геофизических (ГИС) и гидродинамических исследований скважины.

Схематически процесс интерпретации представлен на рис. 1 и представляет собой гидроэлектрическую инверсию с учетом геомеханических свойств породы.

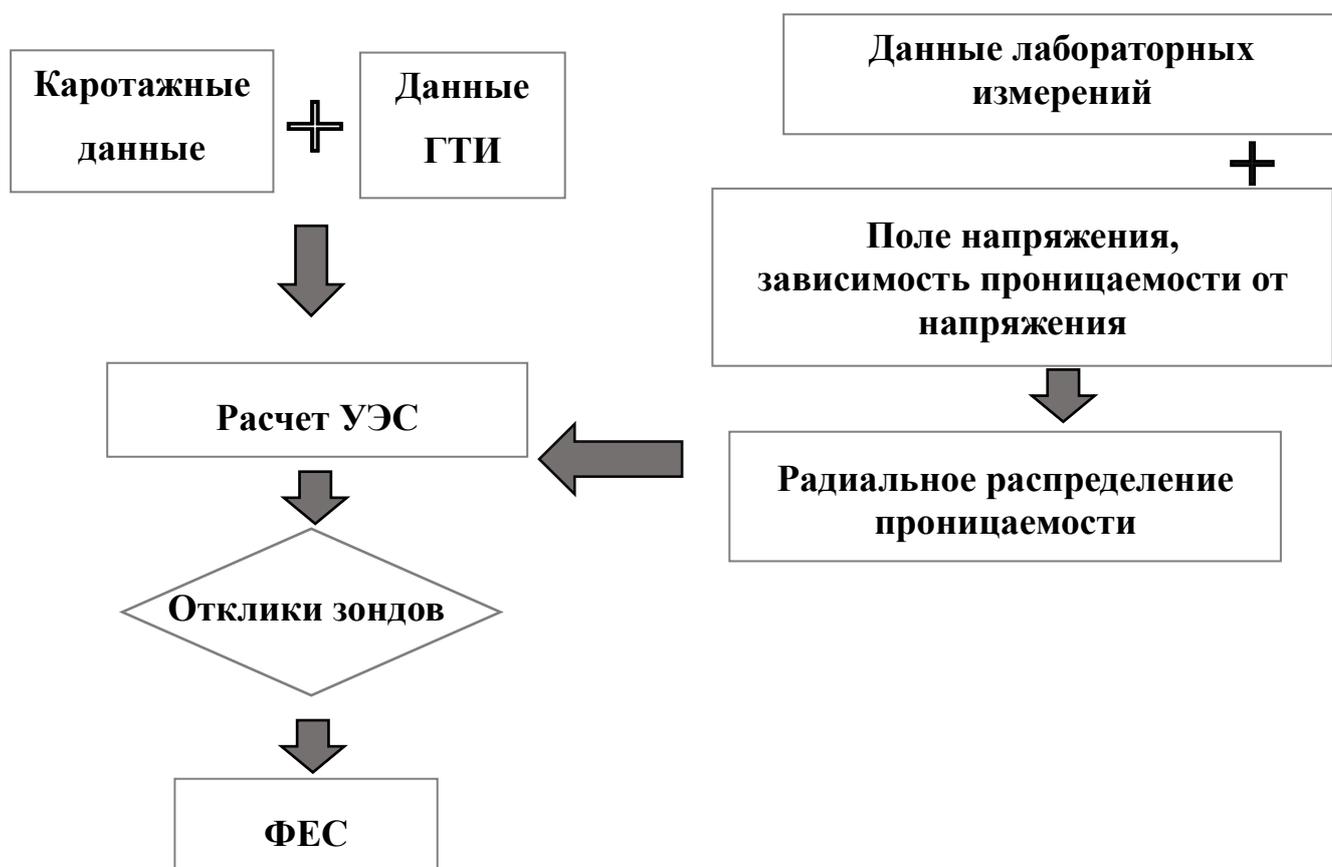


Рис. 1. Схема гидроэлектрической инверсии каротажных данных с учетом геомеханических свойств пород

Авторами был проведен анализ комплекса данных для двух объектов Западной Сибири (скважины Когалымского месторождения и Новосибирской области), по которым сделана совместная гидродинамическая интерпретация, учитывающая геомеханические свойства пород коллектора. На реальных данных и синтетических примерах был проведен анализ необходимости учета

геомеханических процессов при интерпретации данных ГИС и оценке фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта.

При интерпретации данных использовались программный комплекс моделирования фильтрации и солепереноса в условиях изменения напряженно-деформированного состояния среды [2-5], а также система VikizGydra, разработанная В.А. Киндюком (рис. 2).

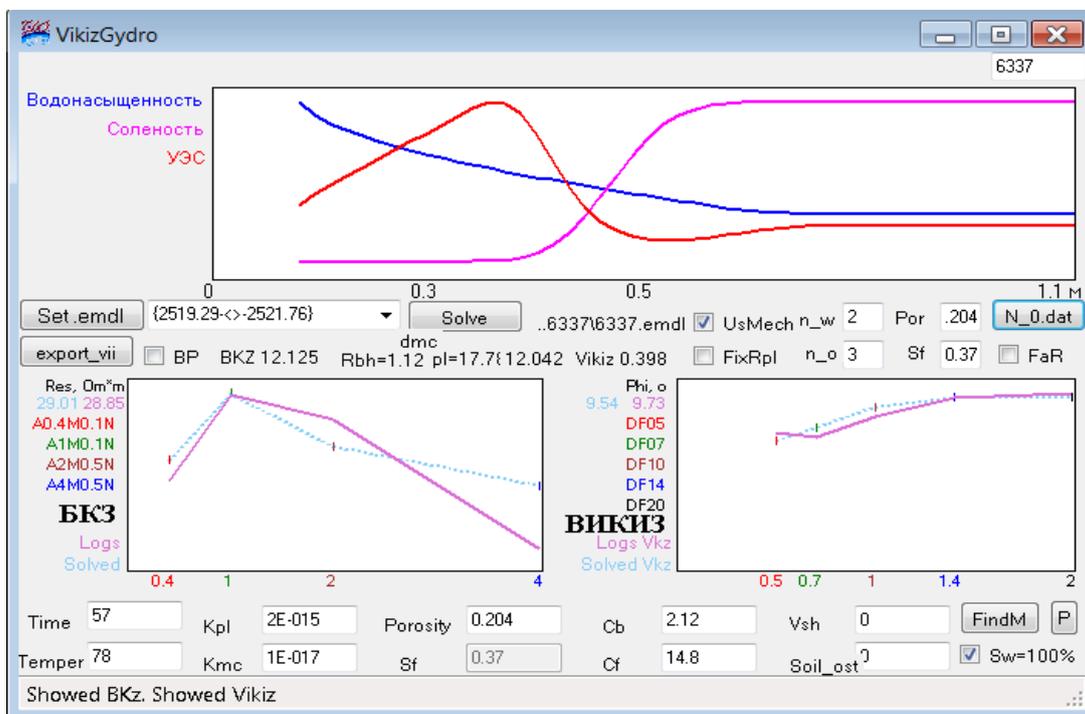


Рис. 2. Окно подбора параметров единой электрогидродинамической модели прослоя коллектора (Когалым) в системе VikizGydra

Сравнение профилей УЭС для одного из прослоев изучаемых коллекторов представлено на рис. 3, из которого видно, что при учете геомеханических свойств породы при моделировании радиальное распределение УЭС сдвигается в сторону стенки скважины.

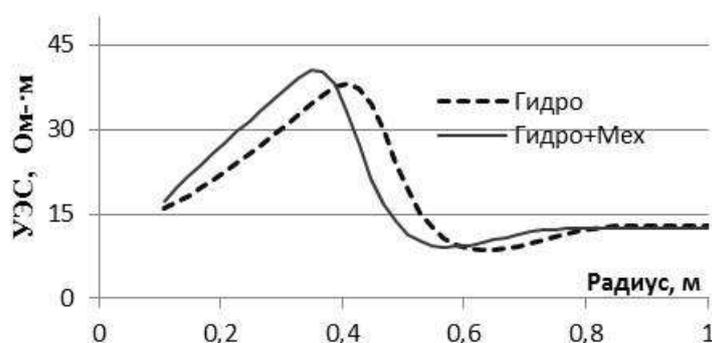


Рис. 3. Радиальные профили УЭС, полученные без учета геомеханических параметров пород (синяя линия) и с их учетом (черная линия) для одного из коллекторов Когалымского месторождения

Для нескольких образцов из БД петрофизических и геомеханических свойств пород PetroMechBD [6] были проведены 2 варианта инверсии синтетических диаграмм: с учетом (вариант 1) и без учета (вариант 2) геомеханических свойств породы. В таблице указаны параметры одного из таких образцов.

Таблица

Параметры коллектора и результаты оценки

Свойства коллектора и вмещающих пород	Вариант 1	Вариант 2
Коэффициент бокового отпора, ед.	0.4	Не учитывались
Сцепления пород скелета коллектора, МПа	78.35	
Угол внутреннего трения пород скелета коллектора, град.	30	
Проницаемость коллектора, мД	15	2.7
Начальная нефтенасыщенность коллектора, %	66	66
Заданная пористость коллектора, %	22	22

В результате выполненных оценок удалось количественно описать влияние геомеханических свойств на результат гидродинамического моделирования.

Наиболее чувствительным параметром модели оказалась проницаемость пласта, ее значение изменяется в пять и более раз. Значения нефтенасыщенности и пористости отличаются на 1-2 %.

Реализованный мультидисциплинарный подход к моделированию процесса проникновения фильтрата бурового раствора в пористую среду в окрестности скважины позволяет определить случаи, требующие учета геомеханических свойств пород при интерпретации данных ГИС, учесть эти свойства при оценке петрофизических свойств коллектора на основе данных электромагнитного каротажа и тем самым снизить погрешность определения ФЕС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуфранов М.Г. О динамике изменения свойств породы в прискважинной области // Каротажник. - 2000. - № 77. - С. 75-79.
2. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. - 2012. - Т. 445. - № 6. - С. 671-674.
3. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. - 2014. - Т. 55. - № 5-6. - С. 978-990.
4. Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование гидродинамических процессов в напряженно-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014: Сб. статей. - М.: «ЕАГЕ Геомодель», 2014. - С. 327-344.

5. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. ГЕНМ / Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. - № 2012619496 от 19.10.2012.
6. Свидетельство о гос. регистрации базы данных PetroMechBD / Ельцов И.Н., Голиков Н.А., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В. // Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. - № 2015620912 от 11.07.2015 года.
7. Стефанов Ю.П. Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локального сдвига // Физическая мезомеханика. - 2010. - № 13. - С. 44-52.
8. Ярмахов И.Г, Попов С.Б. Комплексный метод гидродинамики околоскважинного пространства и индукционного (дизлектрического) каротажа при изучении нефтегазовых скважин // Каротажник. - 2003. - № 10. - С. 63-83.
9. Chin L.Y., Rajagopal R., Thomas L.K. Fully coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability // SPE Journal. - 2000. - Vol. 5. - N 1. - P. 32-45.
10. Ita, J., Malekzadeh F. A True poroelastic up and downscaling scheme for multi-scale coupled simulation // SPE RS Symposium. - Texas, 2015. - P. MS1-MS12.
11. Jalali M.R., Dusseault M.R. Coupling Geomechanics and Transport in Naturally Fractured Reservoirs // Int. J. Min & Geo-Eng. (IJMGE). - Vol. 46. - N. 1. - P. 1-26.
12. Wang X., Chalaturnyk R., Huang H., Leung J. Experimental study on geomechanical dilation during injection // SPE Canada heavy oil technical conference. - Calgary: SPE, 2015. - P. MS1-MS17.

© В. А. Киндюк, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, 2016

## **ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ ОТРАЖАЮЩЕЙ ГРАНИЦЫ НА AVO-ОТКЛИК ЗАКРИТИЧЕСКИХ РР ОТРАЖЕНИЙ И ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ**

***Татьяна Викторовна Нефедкина***

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)330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

***Руслан Игоревич Вылегжанин***

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистр, аспирант, тел. (903)902-71-31, e-mail: rvilegzhanin@gmail.com

***Екатерина Жимбеевна Ракшаева***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, магистр, инженер, тел. (913)771-24-43, e-mail: rcatherine89@gmail.com

***Павел Александрович Лыхин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, магистр, аспирант, тел. (923)111-28-01, e-mail: Pavel.lykhin@gmail.com

***Аркадий Маркович Айзенберг***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-57, e-mail: AizenbergAM@ipgg.sbras.ru

В статье исследуется влияние кривизны отражающей границы на 3D упругое отраженное волновое поле, рассчитанное методом конечных разностей, в широко-угловом диапазоне наблюдений. Используется новый подход к AVO-инверсии на больших удалениях от источника, основанный на эффективных коэффициентах отражения (ЭКО). Показано, что кривизна границы по-разному влияет на AVO-отклик и его теоретическое описание в виде ЭКО разных версий, что отражается на точности результатов AVO-инверсии.

**Ключевые слова:** AVO-инверсия, эффективные коэффициенты отражения, криволинейная граница, астигматизм волновых фронтов, околокритические и закритические удаления.

## **THE EFFECT OF REFLECTING INTERFACE CURVATURE ON AVO RESPONSE OF POST-CRITICAL PP REFLECTIONS AND ITS THEORETICAL DESCRIPTION**

***Tatyana V. Nefedkina***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior Science Researcher, tel. (383)330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

***Ruslan I. Vilegzhanin***

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, master's degree, post-graduate student, tel. (903)902-71-31, e-mail: rvilegzhanin@gmail.com

**Ekaterina Z. Rakshaeva**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Master's degree, engineer, tel. (913)771-24-43, e-mail: rcatherine89@gmail.com

**Pavel A. Lykhin**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Master's degree, post-graduate student, tel. (923)111-28-01, e-mail: Pavel.lykhin@gmail.com

**Arkady M. Aizenberg**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Science Researcher, tel. (383)335-64-57, e-mail: AizenbergAM@ipgg.sbras.ru

In this paper, we investigate the influence of interface curvature on the 3D elastic reflected wavefield calculated by finite difference method for wide-angle survey. A new approach is used to long-offset AVO inversion, based on effective reflection coefficients (ERCs). We show that interface curvature effects on the AVO response and ERCs various versions differently, that echoes on long-offset AVO inversion accuracy.

**Key words:** AVO inversion, effective reflection coefficients, curved interface, wavefront astigmatism, near- and post-critical offsets.

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционная AVO-инверсия широко использует линеаризованные плоско-волновые коэффициенты отражения (ПВКО). Их применение ограничено относительно плоскими границами, слабыми контрастами параметров и умеренными углами падения. Мы предложили использовать в AVO-инверсии эффективные коэффициенты отражения (ЭКО), которые обобщают ПВКО для криволинейных границ, неплоских волн и сейсмических частот. В нашей предыдущей работе [5] тестирование алгоритмов AVO-инверсии проводилось на синтетических данных, полученных методом наложения концевых волн (МНКВ) [4], использующим ЭКО. В настоящей работе моделирование волновых полей проводится независимым от ЭКО методом конечных разностей. Анализируется зависимость особенностей волновых полей и поведения различных версий ЭКО от кривизны границы, проводится сравнение с аналогичными результатами для сферического коэффициента отражения (СфКО).

## ЭФФЕКТИВНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ

В сейсмической полосе частот отраженная  $P$ -волна может быть приближенно описана в форме похожей на геометрическую сейсмику [3]:

$$\mathbf{u}_{PP}(\mathbf{x}, \omega) \cong \chi_{PP}[\theta, k r^*(\mathbf{x})] i \frac{S(\omega)}{V_{P1}} \frac{\mathbf{e}_{PP}(\tilde{\mathbf{s}})}{\sqrt{J_{PP}(\mathbf{x})}} e^{ik[l_1(\tilde{\mathbf{s}})+l_2(\tilde{\mathbf{s}}, \mathbf{x})]},$$

где  $\sqrt{J_{PP}(x)}$  есть геометрическое расхождение,  $k = \omega/V_{P1}$  и  $V_{P1}$  – волновое число и скорость продольной волны в покрывающей среде соответственно,  $S(\omega)$  – спектр волнового импульса,  $\mathbf{e}_{PP}(\tilde{s})$  – вектор поляризации отраженной Р-волны,  $l_1(\tilde{s})$  и  $l_2(\tilde{s}, x)$  – расстояния от источника до точки отражения и от точки отражения до приемника соответственно. Здесь  $\chi_{PP}[\theta, k r^*(x)]$  – это эффективный коэффициент отражения Р-волны (ЭКО) в приемнике X. Он зависит от угла падения (отражения)  $\theta$  и безразмерного параметра  $k r^*(x)$ , где  $r^*(x)$  – кажущийся радиус кривизны волнового фронта в приемнике. В случае отражения сферической волны, генерируемой точечным источником, от плоской границы ЭКО в приемнике редуцируется к так называемому сферическому коэффициенту отражения (СфКО) [6]. Впервые действие кривизны границы на АВО-инверсию продольных волн на больших удалениях от источника было исследовано в работе [5]. В ней использовалась первая версия ЭКО, в которой параметр  $r^*(x)$  был определен через среднюю кривизну границы. В этой работе было показано, что использование ЭКО-1 в АВО-инверсии дает хорошие результаты в случае отражений от слабо криволинейных границ изометрической формы. В работе [2] была предложена модифицированная версия ЭКО (МодЭКО)  $\chi(\theta^*, k r^*)$ , где  $\theta^*$  и  $r^*$  – кажущийся угол падения и кажущийся радиус некоторой сферической волны, падающей на плоскость, касательную к границе в точке отражения. Эта версия ЭКО учитывает астигматизм (разницу главных кривизн) волновых фронтов, возникающий при отражении от границ сложной формы.

## МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Для моделирования волновых полей была выбрана граница гауссовой формы между двумя однородными упругими средами (рис. 1). Уравнение границы  $z = -0.7 + 0.2 \exp(-Ax^2 - By^2)$ , где  $A$  и  $B$  – параметры крутизны. В нашем случае  $A=1-2 \text{ км}^{-2}$ ,  $B=0 \text{ км}^{-2}$ . Скорости в верхней и нижней средах  $V_{P1}=2.0 \text{ км/с}$ ,  $V_{S1}=1.1 \text{ км/с}$  и  $V_{P2}=2.8 \text{ км/с}$ ,  $V_{S2}=1.6 \text{ км/с}$  соответственно. Плотности верхней и нижней сред  $\rho_1=1.8 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_2=2.1 \text{ г/см}^3$ . Мы рассматриваем сейсмограмму ОСТ для точки, находящейся на вершине антиклинальной границы. Источники и приемники размещены вдоль профиля, расположенного вкрест простирания границы на расстоянии 0.5 км от касательной плоскости в точке отражения. Шаг между источниками/приемниками – 100 м. Расстояние источник–приемник изменяется от 0 до 2.2 км и покрывает докритические, околокритические и закритические удаления соответственно. Главная кривизна границы в точке отражения в лучевой плоскости варьировалась от  $D_{11} = -0.4 \text{ км}^{-1}$  (соответствует  $A=1$ ) до  $D_{11} = -0.8 \text{ км}^{-1}$  (соответствует  $A=2$ );  $D_{22} = 0 \text{ км}^{-1}$ . Критический угол  $\theta = 45.58^\circ$ .

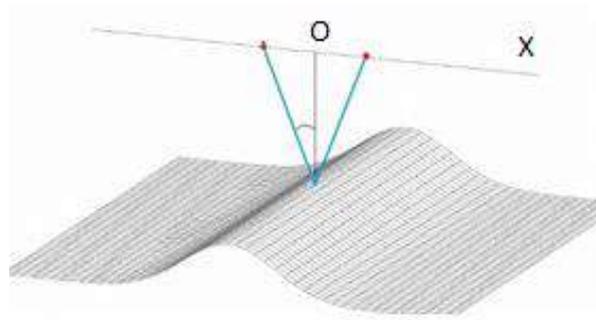


Рис. 1. Модель среды

## СИНТЕТИЧЕСКОЕ ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ

Моделирование упругого 3D волнового поля проведено методом конечных разностей по программе Sofi3D. Падающая сферическая  $P$ -волна задавалась импульсом Риккера с доминантной частотой 32 Гц. Сейсмограмма ОСТ формировалась из сейсмограмм ОТВ выборкой симметричных с источником трасс относительно общей точки отражения. В значения амплитуд отраженной волны введена поправка за геометрическое расхождение ее фронта с учетом кривизны границы по Червени [7]. На рис. 2 показаны AVO-отклики, полученные для двух разных кривизн отражающей границы, и теоретическое описание отражения на основе различных версий ЭКО. Для сравнения приведен также ПВКО.

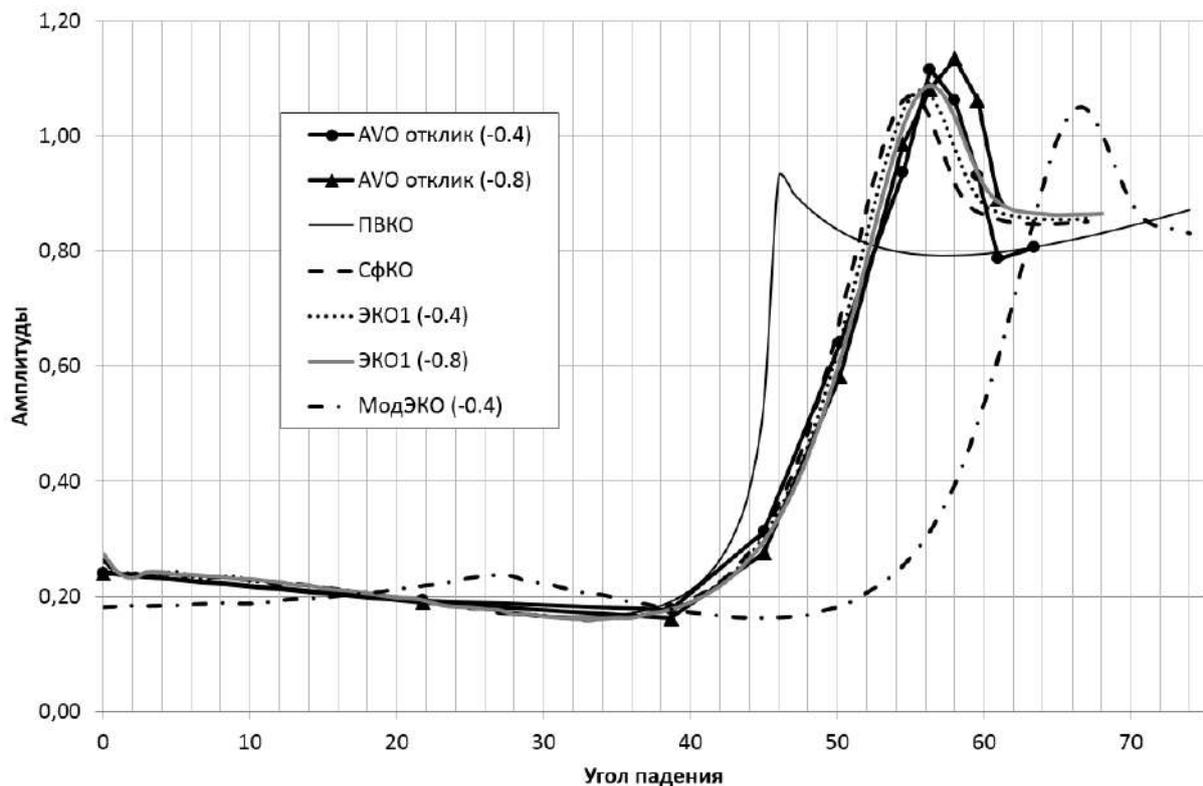


Рис 2. Сравнение AVO-откликов с модулями ЭКО

Мы видим, что с увеличением кривизны границы в два раза с (-0.4) до (-0.8) закритический максимум АВО-отклика смещается в сторону больших углов падения с  $\theta = 56,3^\circ$  на  $\theta = 58^\circ$ . В докритической области различие между кривыми АВО-откликов несущественно. Модули ЭКО-1 для разных кривизн границы мало различаются между собой и неплохо описывают АВО-отклик (для  $D_{11} = -0.4 \text{ км}^{-1}$ ) как на докритических, так и на закритических удалениях. Закритические амплитудные максимумы этих коэффициентов наблюдаются на углах падения  $\theta = 55,9 - 56,3^\circ$  и практически совпадают по своему местоположению с максимумом АВО-отклика. Максимум СфКО сдвинут в сторону меньших удалений и соответствует углу падения  $\theta = 55^\circ$ . МодЭКО существенно зависит от кривизны границы. Амплитудный максимум МодЭКО (для  $D_{11} = -0.4 \text{ км}^{-1}$ ) значительно сдвинут в сторону увеличения углов падения и соответствует  $\theta = 66,5^\circ$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ АВО-ИНВЕРСИИ

Нелинейная АВО-инверсия выполнена оптимизационным методом Нелдера-Мида. Известными параметрами модели были: кривизна границы ( $D_{11} = -0.4$ ), скорости и плотность в верхней среде ( $V_{p1}, V_{s1}, \rho_1$ ). Известные параметры – параметры второго слоя: скорости ( $V_{p2}, V_{s2}$ ) и плотность ( $\rho_2$ ). Начальное приближение неизвестных параметров задавалось с погрешностью 15 %. Мы выполнили АВО-инверсию для трех различных АВО-функций, основанных на ЭКО-1, СфЭКО и ПВКО. Поскольку МодЭКО плохо описывает АВО-отклик, инверсия с ним не выполнялась. Оценки параметров и их относительные погрешности, полученные в результате АВО-инверсии, приведены в таблице.

*Таблица*

Оценки параметров из АВО-инверсии

	$V_{p2}$ (км/с)	$\Delta V_{p2}$ (%)	$V_{s2}$ (км/с)	$\Delta V_{s2}$ (%)	$\rho_2$ (г/см <sup>3</sup> )	$\Delta \rho_2$ (%)
ЭКО-1	2,9	3,6	1,67	4,2	2,05	-2,4
СфКО	3,00	7,1	1,74	9,1	1,87	-11,0
ПВКО	3,21	14,6	1,89	18,2	2,40	14,3

Как видно из таблицы, наибольшую точность АВО-инверсии обеспечивает ЭКО-1, учитывающий кривизну границы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективный коэффициент ЭКО-1 достаточно корректно описывает околокритические и закритические отражения при слабых и средних кривизнах границ и повышает точность АВО-инверсии на больших удалениях от источника по сравнению с ПВКО. Несмотря на то что тестирование МодЭКО

в акустической среде, проведенное в работе [1], показало очень хорошие результаты, современная версия МодЭКО для 3D упругой среды не может быть использована в AVO-инверсии. Необходимо продолжить поиски наилучших аппроксимаций для МодЭКО с целью учета астигматизма волновых полей, возникающего при отражении от границ сложной формы и большой кривизны.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нефедкина Т.В., Айзенберг А.М., Ракшаева Е.Ж., Вылегжанин Р.И., Лыхин П.А. Использование эффективных коэффициентов отражения в AVO инверсии PP отражений на больших удалениях от источника // Технологии сейсморазведки. - 2015. - № 3. - С. 5-9.
2. Ракшаева Е.Ж., Нефедкина Т.В., Айзенберг А.М. Модифицированный эффективный коэффициент отражения для AVO инверсии закритических PP отражений от криволинейных границ // 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. – 126–131.
3. Ayzenberg M., Tsvankin I., Aizenberg A.M., and Ursin B. Effective reflection coefficients for curved interfaces in transversally isotropic media // Geophysics. - 2009. - Vol. 74. - P. WB33-WB53.
4. Klem-Musatov K., Aizenberg A.M., Pajchel J., Helle H.B. Edge and tip diffractions: Theory and applications in seismic prospecting // Society of Exploration Geophysics, 2008.
5. Skopintseva L.V., Aizenberg A.M., Ayzenberg M.A., Landrø M., Nefedkina T.V. The effect of interface curvature on AVO inversion of near-critical and postcritical PP-reflections // Geophysics. - 2012. - Vol. 77. - P. N1-N16.
6. Ursenbach C.P., Haase A.B., Downton J.E. An efficient method for AVO modeling of reflected spherical waves // Journal of Seismic Exploration. - 2007. - Vol. 16. - P. 79-104.
7. Červený V. Seismic ray theory. - Cambridge University Press, 2001.

© Т. В. Нефедкина, Р. И. Вылегжанин, Е. Ж. Ракшаева,  
П. А. Лыхин, А. М. Айзенберг, 2016

## **ОПЫТ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С ПАССИВНЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НА СИЛЬНО ОБВОДНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ТЕВРИЗСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

### ***Михаил Николаевич Балдин***

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 полевых, аналитических и измерительных технологий, тел. (383) 363-80-25, e-mail: BaldinMN@ipgg.sbras.ru

### ***Андрей Юрьевич Белоносов***

Западно-Сибирский филиал ИНГГ, 625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 56, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (345-2)68-87-99, e-mail: BelonosovAY@ipgg.sbras.ru

### ***Михаил Викторович Прямов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер 2-й категории лаборатории полевых, аналитических и измерительных технологий, тел. (383)363-80-25, e-mail: PryamovMV@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: GruznovVM@ipgg.sbras.ru

Приведены результаты геохимической поверхностной съемки по ароматическим углеводородам C<sub>6</sub>-C<sub>8</sub> с использованием заглубляемых пассивных концентраторов при сильной обводненности разведываемой территории. Анализ проб осуществлялся в полевых условиях.

**Ключевые слова:** пассивные концентраторы, геохимическая съемка, поиск залежей углеводородов.

## **EXPERIENCE IN GEOCHEMICAL PROSPECTING WITH PASSIVE CONCENTRATORS IN THE HEAVILY WATERED TERRITORY OF TEVRIZSKY GAS CONDENSATE RESERVOIR**

### ***Michael N. Baldin***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior Scientist of the laboratory of field, analytical and instrument technologies, tel. (383)363-80-25, e-mail: BaldinMN@ipgg.sbras.ru

### ***Andrew Yu. Belonosov***

West-Siberian affiliate of IPGG SB RAS, 625000, Russia, Tyumen, Voevodsky Str. 56, Ph. D., Senior Scientists, tel. (345-2)68-87-99, e-mail: BelonosovAY@ipgg.sbras.ru

**Michael V. Pryamov**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Second rank engineer of the laboratory of field, analytical and instrument technologies, tel. (383)363-80-25, e-mail: PryamovMV@ipgg.sbras.ru

**Vladimir M. Gruznov**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, deputy director on scientific work, tel. (383)333-27-11, e-mail: GruznovVM @ipgg.sbras.ru

Results of geochemical surface prospecting for aromatic C<sub>6</sub>–C<sub>8</sub> hydrocarbons with bury passive concentrators under heavy watering to scout the territory and field sample analysis are given. Analysis of samples was carried out in field conditions.

**Key words:** passive concentrators, geochemical prospecting, search for hydrocarbon fields.

Использовался полевой газохроматографический комплекс для геохимической съемки [1] с портативным газовым хроматографом ЭХО-В-ФИД и пассивными концентраторами для регистрации ароматических углеводородов C<sub>6</sub>-C<sub>8</sub> (бензола, толуола, этилбензола, ксилолов). Пороги определения концентрации ароматических соединений с использованием концентраторов составляют 0,032 ppb по бензолу, 0,019 ppb по толуолу и 0,004 ppb по пара-ксилолу.

Цель работы – проверка возможности выявления аномалий ароматических углеводородов над залежью нефти и газа при обводнении территории залежи. Залежь находится на севере Омской области, на площади Тевризского газоконденсатного месторождения (ГКМ).

Состав комплекса: портативный газовый хроматограф ЭХО-В-ФИД с воздухом в качестве газа-носителя, пассивные концентраторы, стеклянные контейнеры с концентраторами, закрываемые проницаемой для газов мембраной и не пропускающей воду и частицы грунта.

Тевризское ГКМ приурочено к вытянутому линейному куполовидному поднятию северо-западного простирания, длиной 18 км и шириной 5 км. Состоит из 5 антиклинальных структур: 2 крупных (северо-западная и юго-восточная) и 3 мелких. На крупных структурах пробурено 6 скважин (по 3 на каждой).

Съемка проводилась на юго-восточной структуре по двум крестообразным профилям (на карте в центре). Точка профиля 1.12 расположена в центре треугольника, в вершинах которого находятся 3 скважины, 2 из которых действующие (добыча газа и конденсата). Расстояние от точки 1.12 до скважин в интервале 50-80 м.

В каждой точке наблюдения через 100 м по профилям устанавливалось по 3 концентратора на глубину 0,5 м. На меридиональном профиле (с севера на юг) из-за высокой обводненности территории было организовано только 12 пикетов наблюдения. Пикеты 1-1 ÷ 1-12 (рис. 1). На широтном профиле (с запада на восток) по аналогичной причине организовано 13 пикетов (рис. 1).

Время экспозиции концентраторов – 20-24 часа. Демонтаж концентраторов осуществлялся за 3-3.5 часа, анализ проб – в течение 4.5-5 часов. Следует

отметить, что в период между установкой и демонтажем концентраторов на территории съемки шел дождь и на момент демонтажа большинство шурфов с концентраторами были залиты водой. Результаты анализа проб приведены на рис. 2. В каждой точке наблюдения результат усреднен по трем измерениям. Относительное среднеквадратичное отклонение от среднего значения составляет не более 10 %.

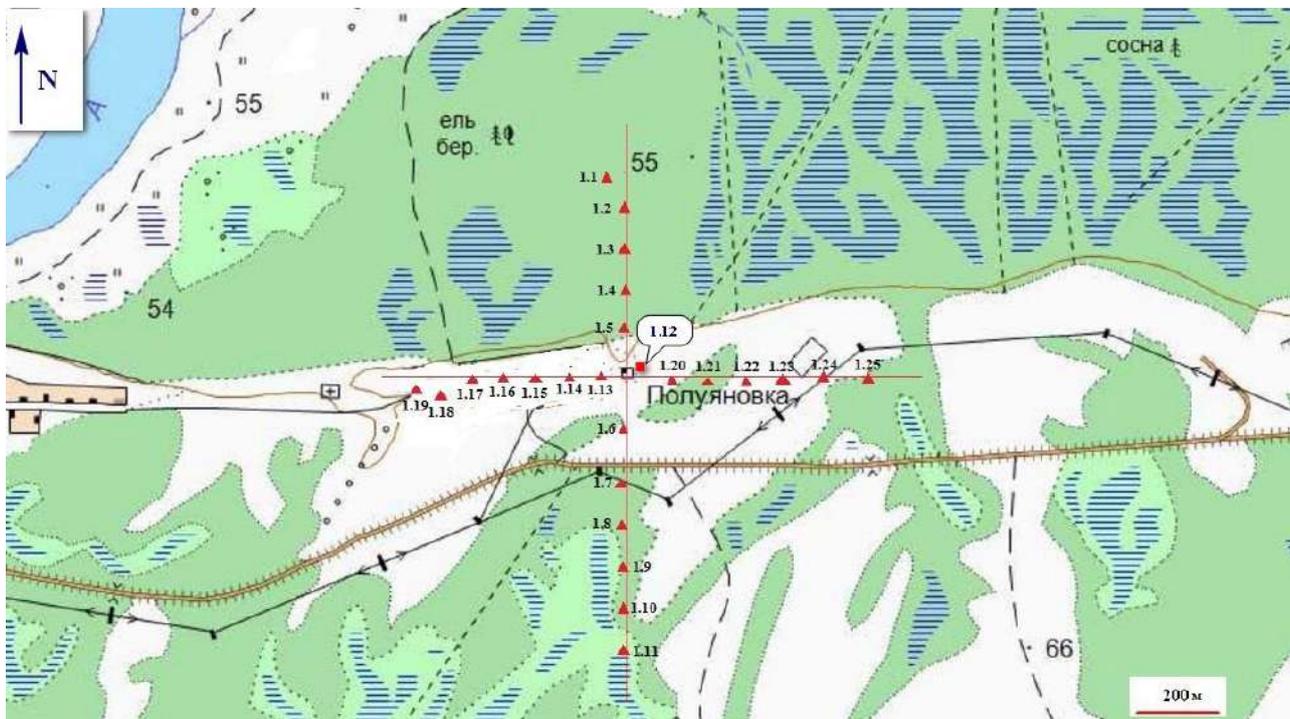


Рис. 1. Расположение профилей наблюдения. В центре карты два крестообразных профиля объекта 1: широтный (с запада на восток) и меридиональный

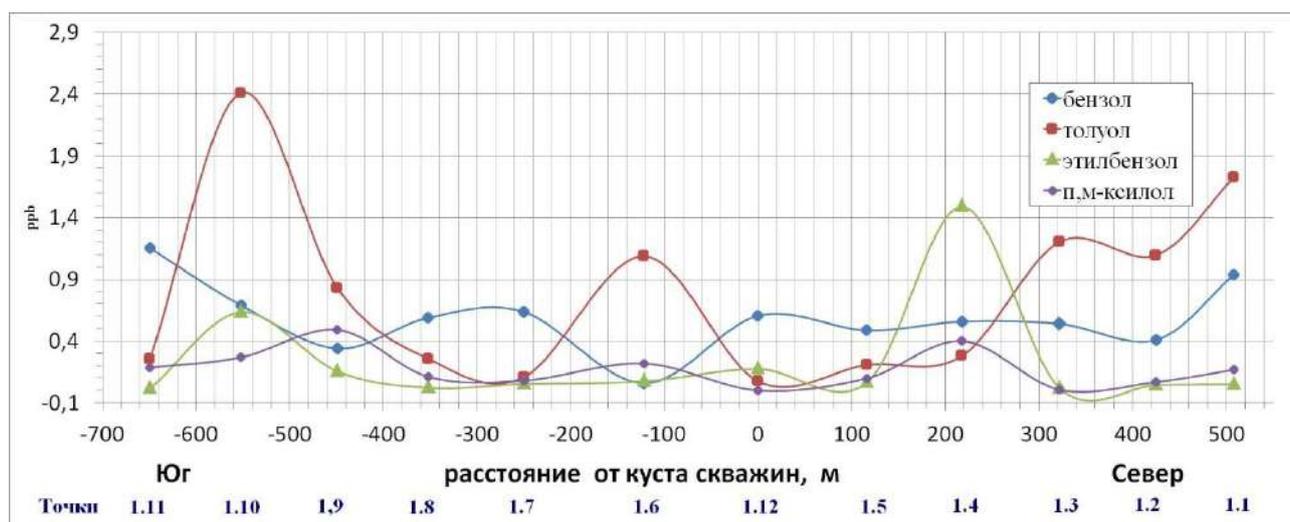


Рис. 2. Значения концентраций ароматических углеводородов в пробах вдоль меридионального профиля с севера на юг

Концентрации ароматических бензола, толуола, этилбензола, п-, м-ксилола лежат в диапазоне от долей ppb до нескольких ppb (рис. 2). За фоновый уровень концентраций веществ были приняты концентрации в точке 1.12, расположенной на вершине антиклинальной структуры куполовидного поднятия северо-западного простирания: 0,25 ppb для толуола, этилбензола и ксилолов, 0,6 ppb для бензола.

Очевидно, что из-за наличия большого количества поверхностной воды по профилю во время экспозиции концентраторов происходило частичное пространственное усреднение концентраций углеводородов, мигрирующих из залежи, этим можно объяснить сравнительно невысокий контраст углеводородов по профилю. Точка 1.6 в центре на меридиональном профиле была вблизи дороги, этим может быть вызван аномальный пик толуола. Повышенные по сравнению с фоном концентрации этилбензола и толуола зафиксированы на склонах юго-восточной структуры (ближе к ее подошве), что характерно для распределения аренов над нефтегазоносными структурами.

Выводы по результатам съемки.

1. На склонах юго-восточной структуры (ближе к ее подошве) зафиксированы повышенные по сравнению с фоновыми концентрации этилбензола и толуола, что характерно для распределений аренов над нефтегазоносными структурами.

2. Сильная обводненность местности во время съемки в целом не препятствует выявлению особенностей распределения аренов над залежами.

3. Используемые полупроницаемые мембраны обеспечивают защиту концентраторов от воды.

4. Проведение аналогичной съемки в сухую погоду с увеличением размеров профилей может существенно повысить геологическую информативность измеряемых углеводородных компонент и подтвердить наличие на этой площади мелко-тектонического глубинного строения, в том числе наличие одного из разломов.

#### 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.

© М. Н. Балдин, А. Ю. Белоносов, М. В. Прямов, В. М. Грузнов, 2016

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ «АТОМНОГО» ОЗЕРА (СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН)**

### *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, 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, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

### *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

### *Виталий Владимирович Романенко*

Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ, 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, начальник группы полевых исследований, e-mail: Romanenko@nnc.kz

### *Сергей Борисович Субботин*

Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ, 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, начальник лаборатории исследования опасных природно-техногенных процессов, тел. (722)512-34-13, e-mail: Subbotin@nnc.kz

Представлены результаты первых температурных исследований «Атомного» озера на территории Семипалатинского испытательного полигона. Установлен слой сезонного влияния и относительно стабильная область, выявлены особенности распределения температурного градиента, в частности, изменение его знака и интервал, где наблюдается минимальная температура.

**Ключевые слова:** подземные ядерные испытания, температурный режим, «Атомное» озеро.

## **TEMPERATURE REGIME OF «ATOMIC LAKE» (SEMIPALATINS TEST SITE)**

### *Dmitry E. Ayunov*

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

***Sergey A. Kazantsev***

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

***Vitaly V. Romanenko***

Institute of Radiation Safety and Ecology NNC, 071100, Kazakhstan, Kurchatov, Krasnoarmeyskaya Srt. 2, Head of Field Group, e-mail: Romanenko@nnc.kz

***Sergey B. Subbotin***

Institute of Radiation Safety and Ecology NNC, 071100, Kazakhstan, Kurchatov, Krasnoarmeyskaya Srt. 2, Head of the Laboratory of dangerous nature and technogenic processes, tel. (722)512-34-13, e-mail: Subbotin@nnc.kz

The results of the first studies of the temperature «Atomic» lake in the territory of Semipalatinsk Test Site. A layer of a seasonal influences and a relatively stable zone are established. The distribution features of the temperature gradient, in particular, changing of its sign and a minimum temperature interval are identified.

**Key words:** underground nuclear testing, temperature regime, «Atomic» lake.

15 января 1965 г. на территории Семипалатинского полигона в месте слияния рек Чаган и Ащи-Су (100 км от г. Семипалатинск) был осуществлен первый в СССР мирный подземный ядерный взрыв [1]. Его целью было создание в сухих казахских степях водохранилища. В результате этого взрыва на месте воронки образовано искусственное озеро, которое впоследствии получило название «Атомное». Снаряд был заложен в скважине на глубине 178 м в углисто-глинистых сланцах нижнекаменноугольного возраста. На месте взрыва образовалась круглая воронка диаметром около 400 м и глубиной до 100 м. После взрыва долину реки Чаган соединили с воронкой каналом для пропуска талых вод. Тем самым были созданы условия для образования «Атомного озера» (рис. 1). Воронка была заполнена водой в первый же весенний паводок 1965 г. За прошедшие 50 лет в результате оползневых процессов глубина центральной части озера уменьшилась примерно на 15-17 м. Соответственно, уменьшился и объем воронки. С момента образования озера происходило его постепенное засоление. Только за три года после взрыва содержание солей в воде водохранилища увеличилось по сравнению с первым годом (1,3 г/л) в 6 раз. В настоящее время сотрудниками Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ (г. Курчатов) зафиксированы значительные сезонные изменения содержания трития в воде озера. Возможно, эти изменения связаны с сезонными вариациями температуры воды на разных уровнях. Для изучения этих вариаций авторами были выполнены специальные исследования, результаты которых представлены в данной статье. Необходимо отметить, что до наших работ температурный режим озера не изучался (по крайней мере, нам не удалось найти такой информации в открытых источниках). Можно только высказать некоторые соображения о факторах, формировавших распределение температуры на начальном этапе. Судя по

проведенному нами позднее термокаротажу в наблюдательных скважинах Семипалатинского полигона [2], температура горных пород в районе взрыва не превышала 6-7 °С. До заполнения водой 1,5-2 зимних месяца стенки воронки охлаждались, а может, и успели промерзнуть. Весной воронка заполнилась талой водой с температурой порядка 0-3 °С. Впоследствии каждый год в воронку поступала весной порция холодной (плотной) воды.

Измерения температуры (Т) водной толщи «Атомного» озера продолжались более двух лет (2013-2015 гг.). В этот период был проведен термокаротаж водной толщи с лодки в разных пунктах акватории и выполнены длительные измерения температуры вдоль придонного профиля.

### ТЕРМОКАРОТАЖ ВОДНОЙ ТОЛЩИ

Для измерений температуры использовался скважинный термометр с термисторным датчиком. Инструментальная точность оценки Т составляла 0,02-0,03 °С. Измерения проводились с лодки через 2-2.5 м в интервале глубин 10-85 м, начиная со дна. Всего на озеро совершено три поездки в 2013 и 2014 гг., во время которых изучено распределение Т в 30 пунктах акватории (рис. 1).



Рис. 1. «Атомное» озеро. Отмечены пункты термокаротажа водной толщи в июле, октябре 2013 г. и в июне 2014 г. (точки) и станция мониторинга температуры придонной воды (красная точка – расположение измерителя, синяя линия – расположение термокосы)

По результатам измерений составлен температурный разрез водного слоя, представленный на рис. 2. Значительные колебания температуры зафиксированы только в пределах верхней части водного слоя (примерно до 30 м). Они, скорее всего, вызваны сезонными изменениями Т водной поверхности и ветроволновым перемешиванием. На больших глубинах разновременные температурные измерения привели в целом к одинаковым результатам. Установлено, что в интервале 20-40 м температура воды постепенно

уменьшается с глубиной. Минимальное значение  $T$  порядка  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  зафиксировано на глубине 40 м. Глубже температура повсеместно нарастает, достигая максимальных значений ( $\sim 3\text{-}3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на глубинах 80-85 м. В этом слое отчетливо фиксируются два интервала (40-60 и 60-85 м), отличающихся по темпу увеличения  $T$ . В первом интервале температура увеличивается медленно, геотермический градиент здесь составляет всего  $10\text{ мК/м}$ . В придонном слое (60-85 м) геотермический градиент возрастает до  $70\text{ мК/м}$ . Такой градиент может быть причиной конвективного перемешивания водных слоев, о чем, в частности, может свидетельствовать и значительный разброс ( $\sim 0,1\text{-}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) одновременных значений  $T$ . Наиболее высокая стабильность температуры ( $\sim 0,05\text{-}0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), причем при разной направленности ее изменения, наблюдается выше в слое 30-60 м. Сопоставление измерений температуры на одинаковых глубинах в водной толще и на дне показало их хорошее соответствие (рис. 2). Создается ощущение, что изотермы в озере занимают горизонтальное положение. Это наблюдение было использовано нами при организации станции температурного мониторинга.

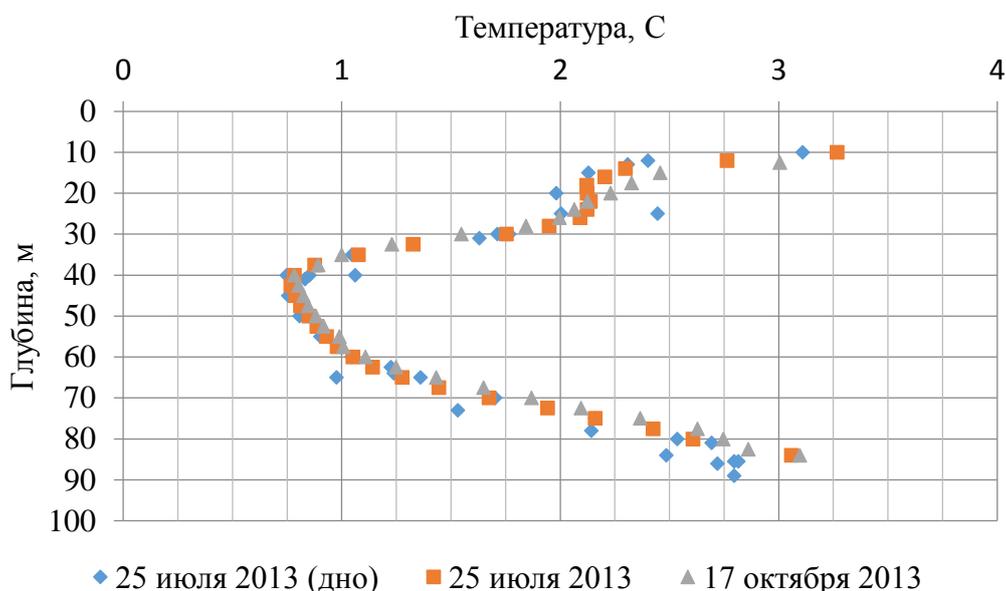


Рис. 2. Температурные разрезы и температура дна «Атомного» озера

### ТЕМПЕРАТУРНЫЙ МОНИТОРИНГ

Для проведения более детальных наблюдения за изменениями температуры водной толщи во времени на южном берегу озера была организована станция температурного мониторинга (рис. 1), включающая измерительную косу и автономный измеритель. В качестве несущего и соединительного провода измерительной косы использован трехжильный провод КГ ХЛ  $3\times 0,75$ , на котором были распаяны через  $10\text{ м}$  цифровые датчики температуры DS18B20 (всего  $17$  датчиков). Длина измерительная косы –  $170\text{ м}$ . Инструментальная точность измерений  $T$  цифровыми датчиками  $\sim 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Все датчики подключены параллельно. Герметизация датчиков осуществлялась

с помощью термоусаживаемой трубки с клеевым слоем. В качестве измерителя использована автономная станция температурного мониторинга (АСМТ), разработанная в ИНГГ СО РАН [3]. Аппаратура обеспечивает измерение, сбор, хранение данных с цифровых и аналоговых датчиков температуры. АСМТ работает в диапазоне температур от  $-20$  до  $+40$  °С, обслуживает до 30 измерительных каналов, может работать в автономном режиме до 6 мес., период измерений может изменяться от 20 с до 24 часов.

Аппаратура была установлена на озере в июне 2014 г. Первоначально планировалось разместить косу вертикально в центральной, наиболее глубокой, части озера. Однако на данном этапе пришлось ограничиться установкой термокосы на дне перпендикулярно к берегу (рис. 1). Угол склона в этом месте озера составляет примерно  $40^{\circ}$ . Ранее было показано (рис. 2), что значения  $T$  дна и воды, измеренные на одной глубине, удовлетворительно совпадают. Измеритель размещался на берегу на высоте около 1.5 метров над уровнем воды. Станция проработала до марта 2015 г., когда она была затоплена во время паводка и обвала склона.

Результаты мониторинга представлены на рис. 3, характеризующем распределения  $T$  в водной толще «Атомного» озера во времени с июня 2014 г. по март 2015 г.

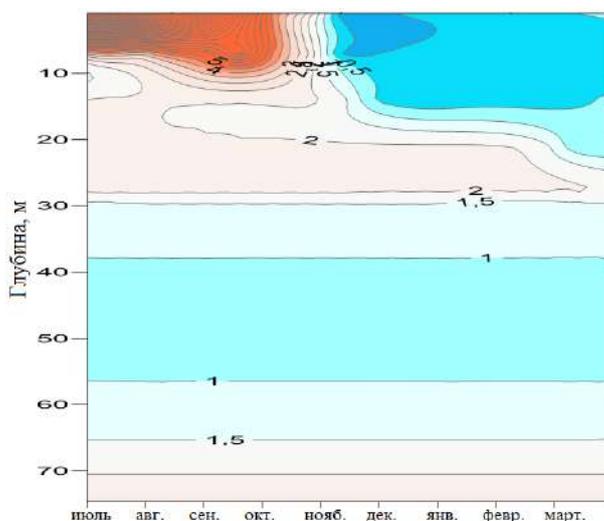


Рис. 3. Динамика температурного разреза водной толщи «Атомного» озера во времени с июня 2014 г. по март 2015 г.

Результаты мониторинга в целом подтвердили описанные выше особенности распределения температуры в «Атомном» озере.

Наиболее важным результатом выполненных исследований является выявление устойчивой температурной стратификации, установившейся в водной толще озера за прошедшие 50 лет. Установлено наличие слоев воды с относительно стабильным температурным режимом, слоев с различным температурным градиентом, вероятно, связанных с неизвестными пока

процессами. Очевидно, что для изучения причин стратификации необходимо выполнить исследования минерализации воды на разных глубинах, роли талых и подземных вод, сезонных и многолетних вариаций температуры и др.

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ Лаборатории естественных геофизических полей ИНГГ СО РАН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ядерные испытания СССР: современное радиоэкологическое состояние полигонов / Кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачёва. - М: Изд. АТ, 2002. - 639 с.

2. Дучков А.Д., Аюнов Д.Е., Пермяков М.Е., Соколова Л.С., Субботин С.Б., Романенко Мониторинг температуры в наблюдательных скважинах Семипалатинского испытательного полигона // Инновационные технологии сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами: Материалы междунар. конф., 18-19 сентября 2012 г. - Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2012. – С. 277-284.

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.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев, В. В. Романенко, С. Б. Субботин, 2016

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГИС В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗАЛЕГАЮЩИХ ПЛАСТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

*Дмитрий Владимирович Борисов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант отделения геофизики, тел. (999)-451-84-64, e-mail: dimbo2007@yandex.ru

Выполнена визуализация пластов территории на примере восточной части Курганской области. Были проведены генерализация пластов по известным пробуренным скважинам и интерполяция по методу кригинга полученных данных в ГИС для 3D-визуализации пластов. Данная работа позволяет выделить перспективные участки нефтегазоносности по структурным признакам для их дальнейшего детального изучения.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, 3D-визуализация пластов, оценка перспектив нефтегазоносности, интерполяция, кригинг.

## **APPLICATION OF GIS IN THE TASKS OF IMAGING OVERLYING SEAMS TO DETERMINE PROMISING PETROLEUM TERRITORIES**

*Dmitrii V. Borisov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, postgraduate of geophysics department, tel. (999)451-84-64, e-mail: dimbo2007@yandex.ru

The territory seam visualization was done as an example of Eastern part of the Kurgan region. The generalization of the seams of known drilled wells and interpolation of the acquired data in the GIS for 3D-visualization of the seams were performed. This work allows select perspective areas of petroleum potential with structural features for further detailed studying.

**Key words:** geographic information systems, 3D-visualization of seams, assessment of petroleum potential, interpolation, kriging.

На сегодняшний день компьютерные технологии практически полностью интегрировались в научную жизнь, и теперь они помогают решать, в частности, общие вопросы по выделению перспективных нефтегазоносных участков для их дальнейшего изучения и уточнения зоны накопления углеводородов. Большую роль в решении таких задач могут играть геоинформационные системы (ГИС). Они позволяют создавать не только цифровые модели рельефа, но и обобщенное расположение пластов под интересующими участками. Этого можно добиться с помощью интерполяции – процесса создания непрерывной (или прогнозируемой) поверхности по значениям, измеренным в опорных точках.

Измерение высоты, глубины, величины или концентрации для наблюдаемых объектов и явлений в каждой точке исследуемой территории, как правило, затруднительно или очень дорого. Вместо этого можно измерить показатели в распределенных по поверхности опорных точках и спрогнозировать значения, которые могут быть присвоены всем остальным местоположениям. Входные точки могут быть расположены либо по регулярной сетке, либо случайным образом.

Непрерывное представление поверхности для набора цифровых данных отражает некоторые измерения, например, высоты, концентрации или количества чего-либо (например, высоты поверхности, загрязнения или уровня шума). Инструменты интерполяции поверхности на основании измерений в опорных точках прогнозируют значения для всех местоположений в выходном наборе цифровых данных, в зависимости от того, выполнялось в этой точке измерение или нет. Существует целый ряд интерполяционных способов получить для каждой точки прогнозируемое значение. Каждый метод прогнозирует значения с использованием различных вычислений. В данной работе был использован метод кригинга [1].

Кригинг – это геостатистический метод, который позволяет строить предполагаемую поверхность из набора точек с z-значениями. Такие геостатистические методы основываются на модели случайной функции, включающей анализ автокорреляции (статистических отношений между измеренными точками). В результате этого геостатистические методы не только имеют возможность создавать поверхность прогнозируемых значений, но также предоставляют некоторые измерения достоверности или точности прогнозируемых значений.

При кригинге предполагается, что расстояние или направление между опорными точками отражает пространственную корреляцию, которая может использоваться для объяснения изменения на поверхности. Кригинг использует математическую функцию для определенного количества точек или всех точек в пределах заданного радиуса, чтобы определить выходное значение для всех направлений. Кригинг лучше всего подходит, если известно, что есть пространственно коррелированное расстояние или направленное смещение в данных. Он обычно используется в почвоведении и геологии.

Кригинг аналогичен методу обратно взвешенных расстояний (ОВР) в том, что он взвешивает окружающие измеряемые значения, чтобы получить предсказание для неизмеренного местоположения. Основная формула для этих двух инструментов интерполяции формируется как взвешенная сумма данных [2]:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i),$$

где  $Z(S_i)$  – измеряемое значение в местоположении  $i$ ;

$\lambda_i$  – неизвестный вес для измеряемого значения в местоположении  $i$ ;

$S_0$  – местоположение прогноза;

$N$  – количество измеряемых значений.

Практическая работа выполнялась при помощи программного обеспечения ArcGIS 10.2 и модуля GeoStatistical Analyst. Первоначальной задачей в работе являлось получение 3D-модели местности территории. Вторым этапом работы являлось нанесение буровых скважин на 2D-модель рельефа местности и обработка информации о них. В обработку информации входило изучение стратиграфических колонок и описаний керна (таблица). После заполнения информации о скважинах был исследован метод кригинга для отрисовки пластов. Ниже приведено отображение куполообразной структуры в палео-

зойской системе (рис. 1), что свидетельствует о большой вероятности наличия положительной структуры для нахождения там углеводородов [3].

*Таблица*

Генерализированные глубинные характеристики скважин

Название скважины	Нижняя глубина кайнозойской группы, м	Нижняя глубина меловой системы, м	Нижняя глубина юрской системы, м	Нижняя глубины триасовой системы, м	Нижняя глубина палеозойской группы, м
Воскресенская №1	160	360	650	1000	2415
Северо-Кошелевская №1	120	380	520	900	952
Западно-Петуховская №1	160	350	640	1000	2355
Дмитриевская №1	60	210	400	820	2700
Михайловская №1	170	390	670	1100	1201
Варгашинская №10	80	160	350	740	1500
Курганская №1	40	180	320	700	1150
Курганская №4	150	400	650	890	1100
Дубровенская №1	150	330	480	600	855
Песчаная №1	120	250	350	591	740
Речновская №1	100	200	400	623	765
Палотинская №1	100	220	340	790	850
Кругловская №1	100	260	460	700	787
Западно-Петуховская №2	140	290	390	770	1450
Медведевская №1	150	320	500	880	1150
Чистовская №1	150	280	420	800	910
Дуванкульская № 4	50	180	370	578	1000
Дуванкульская № 5	100	180	260	660	2800
Дуванкульская № 6	110	280	430	690	1209
Алабугская №1	130	160	300	600	2800
Косолаповская №1	60	160	300	500	1300

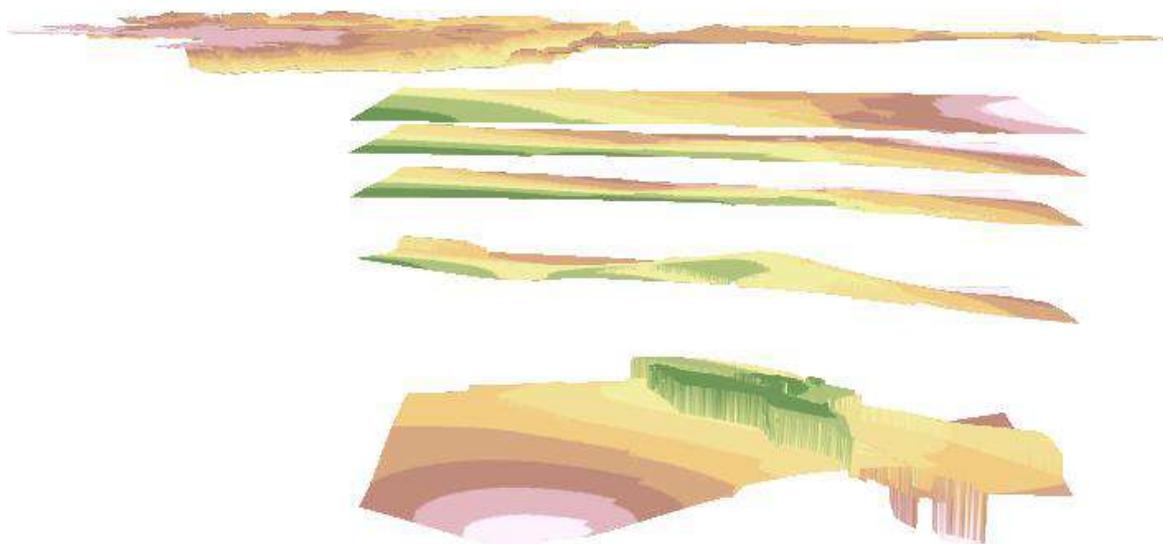


Рис. 1. 3D-модель рельефа Курганской области с интерполированными по методу кригинга пластами

Итогом работы стало получение перспективных участков, которые требуют дальнейшего, более детального изучения. Объяснение того, что в попавших на перспективные участки скважинах (рис. 2) не обнаружили углеводороды, заключается в том, что они недостаточно глубоки (три из них – Дубровенская №1, Песчаная №1, Речновская №1 – менее или около 1000 м, одна из них – Варгашинская №10 – около 1500 м), так как строение пластов под Курганской областью указывает на наличие углеводородов в палеозойском фундаменте [4].

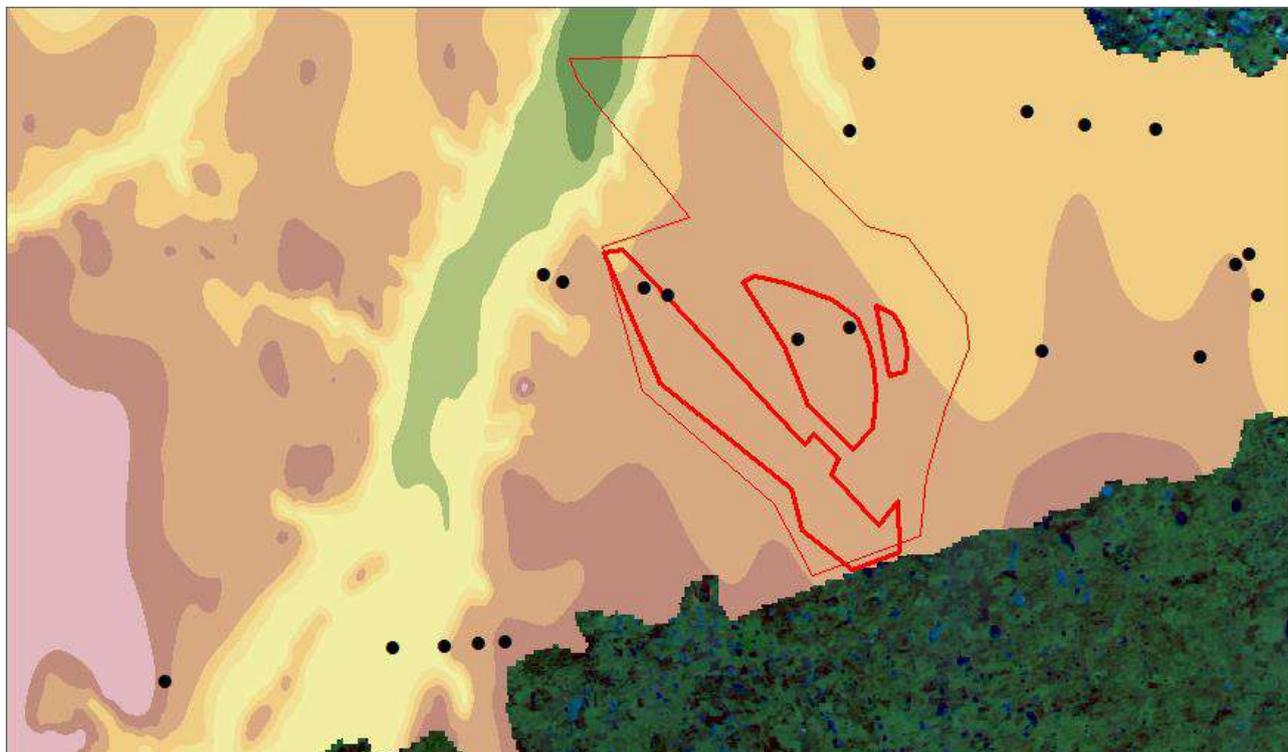


Рис. 2. 2D-модель рельефа местности со скважинами и выделенными перспективными участками, расположенная на космическом снимке. Тонкой линией обозначен общий перспективный участок, толстой линией – наиболее перспективные участки

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ArcGIS™ 3D Analyst™: Using\_Geostatistical\_Analyst ESRI 380 New York St. [Текст]. - Badlands, 2002. - 307 с.
2. Chil`es J.-P., Delfiner P. Geostatistics: modeling spatial uncertainty. - New-York: John Wiley & Sons, 1999. - 695 p.
3. Зими́на С.В., Пульки́на Н.Э. Геологические основы разработки нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособие - Томск: Изд-во ТПУ, 2004. - 176 с.
4. Белоносов А.Ю., Каленицкий А.И. Верификация материалов дистанционного зондирования Земли для оценки нефтегазоносности малоизученных и малоперспективных территорий (на примере Курганской области) // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 70–78.

© Д. В. Борисов, 2016

## **ПРИМЕНЕНИЕ СКВАЖИННОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УПЛОТНЕНИЯ И ПРОСЕДАНИЯ РЕЗЕРВУАРА**

*Александр Николаевич Василевский*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN @ipgg.sbras.ru; Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Alexandr.Vasilevskiy@bakerhughes.com

*Олег Борисович Боcharов*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

*Карл Монро Эдвардс*

Baker Hughes, Хьюстонский технологический центр, 77073-5114, США, Техас, Хьюстон, старший научный сотрудник, тел. +1 713-879-4031, e-mail: carl.edwards@bakerhughes.com

Определение уплотнения коллектора осуществляется, как правило, с помощью радиоактивных маркеров, закрепляемых в продуктивном пласте. Однако применение этого метода связано с проблемами безопасности и охраны окружающей среды. В статье анализируются возможности скважинной гравirazведки для решения этой задачи. Рассмотрены упрощенные геомеханические модели уплотнения/проседания резервуара и рассчитаны возможные гравиметрические эффекты этого процесса. Определены пределы применимости метода.

**Ключевые слова:** скважинная гравirazведка, уплотнение коллектора, поверхностное оседание, геомеханика.

## **APPLICATION OF THE BOREHOLE GRAVITY METHOD TO ESTIMATE COMPACTION AND SUBSIDENCE**

*Alexandr N. Vasilevskiy*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Scientist, tel. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN @ipgg.sbras.ru; Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Alexandr.Vasilevskiy@bakerhughes.com

*Oleg B. Bocharov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, Group manager, tel. (383)332-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

*Carl M. Edwards*

Baker Hughes, Houston Technology Center, United States, 77073-5114, Texas, Houston, 2001 Rankin Road, Senior Scientist, tel. +1 713-879-4031, e-mail: carl.edwards@bakerhughes.com.

The compaction measuring in producing reservoirs, as a rule, consists in inserting radioactive markers into the formation. There are several environmental and safety concerns associated with this method. We analyze the possibilities of the borehole gravity measurements for estimating compaction and subsidence to mitigate these negative concerns. The paper discusses the proposed method in detail including simplifying assumptions. An attempt was made to estimate the regimes when applicable.

**Key words:** borehole gravity, reservoir compaction, surface subsidence, geomechanics.

Проблема проседания дневной поверхности и сжатия коллектора нефтегазового резервуара в результате эксплуатации месторождения и откачки газа относится к разряду исключительно важных. Это связано как с проблемами геоэкологии, так и с вопросами эксплуатации месторождений. Использование радиоактивных маркеров, устанавливаемых в пласт, обеспечивает высокую точность прямых измерений сжатия коллектора [4, 8], но сопряжено с рядом проблем. Радиоактивные метки требуют высокой аккуратности на поверхности, а установленные в скважину могут быть разрушены с течением времени, создавая радиоактивное заражение продуктивного пласта и добываемого углеводорода. Использование гравиметрического метода для измерения уплотнения резервуара было предложено давно [6], но не получило широкого распространения из-за недостаточно высокой точности скважинной гравиметрической аппаратуры. Исследования влияния процессов проседания/уплотнения на гравитационное поле, наблюдаемое на поверхности, с помощью упрощенных геомеханических моделей [5, 10] показали, что ожидаемая амплитуда изменения гравитационного поля, измеренного до и после сжатия резервуара, может широко варьироваться. В моделях Гииртсма [5] амплитуда разностного гравиметрического сигнала не превышает 2-4  $\mu\text{Гл}$ , что измерить достаточно трудно на практике. В моделях с жестким подстилающим фундаментом сигнал может достигать 20-40  $\mu\text{Гл}$ . Последнее не противоречит реальным полевым наблюдениям [3, 7, 9].

Использование скважинных гравиметров, способных проводить измерения гравитационного поля непосредственно в резервуаре, существенным образом может расширить возможности гравиметрического метода в этом аспекте. Во-первых, измеритель поля приближается к источнику, во-вторых, можно легко разделить эффекты вышележащих пород, которые деформируются (разуплотняются) при сжатии резервуара и могут существенно уменьшать гравиметрический сигнал от резервуара, измеряемый на поверхности.

Мы рассмотрели случай газового резервуара (рис.1), в котором происходит откачка газа с понижением давления в пласте. При этом происходит вертикальная деформация резервуара (сжатие) при условии пренебрежимо малой горизонтальной деформации. Мы предполагали, что изменение пористости пород коллектора сопряжено только с изменением мощности пласта.

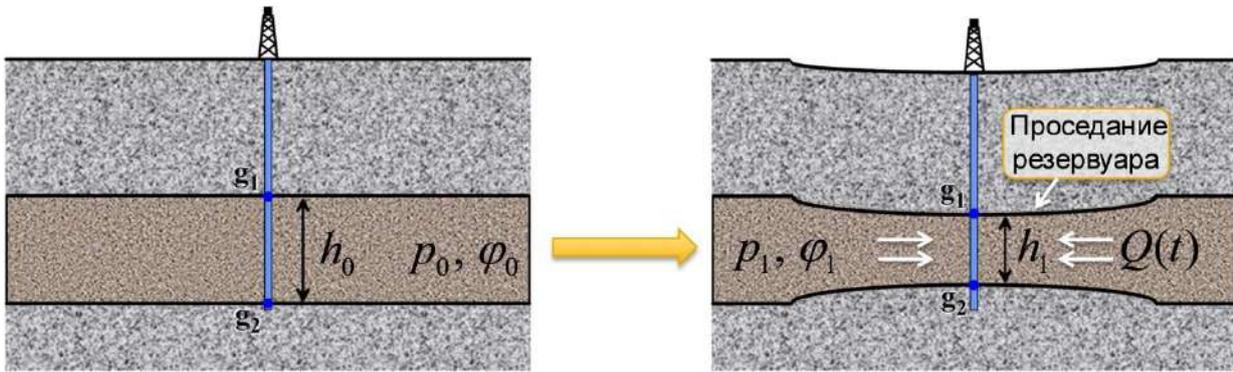


Рис. 1. Сжатие резервуара: вертикальный разрез резервуара,  $h, p, \varphi$  – мощность, давление и пористость резервуара соответственно.  $g_1$  и  $g_2$  – пример положения точек измерения гравитационного поля

Для расчета поведение резервуара в процессе извлечения газа мы использовали уравнения ламинарного течения газа [2]:

$$\frac{\partial(m\rho(p))}{\partial t} + \text{div}(\rho(p)\vec{V}) = 0, \quad (1)$$

здесь скорость фильтрации  $\vec{V}$  определяется законом Дарси:

$$\vec{V} = -\frac{k_f}{\mu}(\nabla p - \rho(p)\vec{g}), \quad (2)$$

где  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения. Уравнения (1-2) замыкаются уравнениями состояния для газа и формации [1]:

$$\rho = \rho_o \exp a_p(p - p_o), m = m_o \exp a_m(p - p_o), k_f = k_o \exp a_k(p - p_o), \mu = \mu_o \exp a_\mu(p - p_o) \quad (3)$$

где:  $a_p, a_m, a_k, a_\mu$  – коэффициенты сжимаемости. Экспериментальные данные [1] дают диапазоны их изменения:  $a_p \in [0; 5 \cdot 10^{-3}] \text{ ат}^{-1}$ ,  $a_m \in [0; 2 \cdot 10^{-3}] \text{ ат}^{-1}$ ,  $a_k \in [0; 10^{-3}] \text{ ат}^{-1}$ ,  $a_\mu \in [0; 11] \cdot 10^{-4} \text{ ат}^{-1}$

Более того,  $a_k \approx 10^2 a_m$  для одной формации, и, как правило,  $a_p < a_\mu \ll a_k$ ,  $a_m \ll a_k$ . Была использована осесимметричная модель и предполагалось, что ось симметрии проходит по вертикальной скважине, через которую осуществляется откачка газа. После определения распределения давления можно определить распределение плотности газа  $\rho = \rho(r, z, t)$ , изменения пористости и плотности формации  $\Delta \rho_f$  в любой точке. Для анализа пространственного распределения уплотнения продуктивного слоя введем коэффициент проседания:

$$C_s = (H_0 - H(r, t)) / H_0 = m_o(1 - m(r, t) / m_o),$$

где  $H_0 = \text{const}$  – начальная мощность продуктивного слоя. В нашем случае максимальное уплотнение и проседание достигается при  $r = r_b$ :

$$C_s = m_o(1 - \exp(-a_m|\Delta p|))$$

Для моделирования мы использовали параметры с месторождения «Abqaiq», Саудовская Аравия: пластовое давление  $p_0 = 218 \text{ атм}$  ( $3200 \text{ psi}$ ),  $|\Delta p| \approx 40 \text{ атм}$  – рабочая депрессия на скважине, пористость  $\varphi_0 = 20\%$ , плотность газа  $\rho_g = 0.141 \text{ г/см}^3$  и мощность  $H_0 = 100 \text{ м}$ .

Для упрощения анализа предполагалось, что гравиметрические измерения проводились в той же добывающей скважине.

На рисунке 2 показаны результаты расчетов изменения гравитационного поля в скважине для продолжительности эксплуатации 10 лет. Изменения гравитационного поля были рассчитаны для двух вариантов плотности вмещающих пород (окружающих пород, лежащих вне продуктивного пласта): для повышенной плотности ( $2.4 \text{ г/см}^3$ , сплошная кривая на рис. 2, д) и для плотности вмещающих пород, равной плотности пород резервуара до начала эксплуатации ( $2.228 \text{ г/см}^3$ , пунктирная кривая на рис. 2, д). Из графиков видно, что влияние плотности вмещающих пород невелико и не превышает  $3 \text{ мГл}$ . Различие в изменениях гравитационного поля обусловлено деформированием резервуара. Малая величина различия говорит о слабом влиянии геометрии резервуара при умеренных (до 1 м) его деформациях.

Основной результат моделирования – определение возможной амплитуды изменения гравитационного поля. Как видим, для 10 лет эксплуатации она может составлять  $\pm 19.4 \text{ мГл}$ , что означает полную амплитуду изменения гравитационного поля вдоль скважины  $\sim 39 \text{ мГл}$ . Это изменение может быть уверенно зарегистрировано современными скважинными гравиметрами при повторных измерениях, поскольку паспортная повторяемость измерений для режима гравиметрического мониторинга не хуже  $7 \text{ мГл}$ .

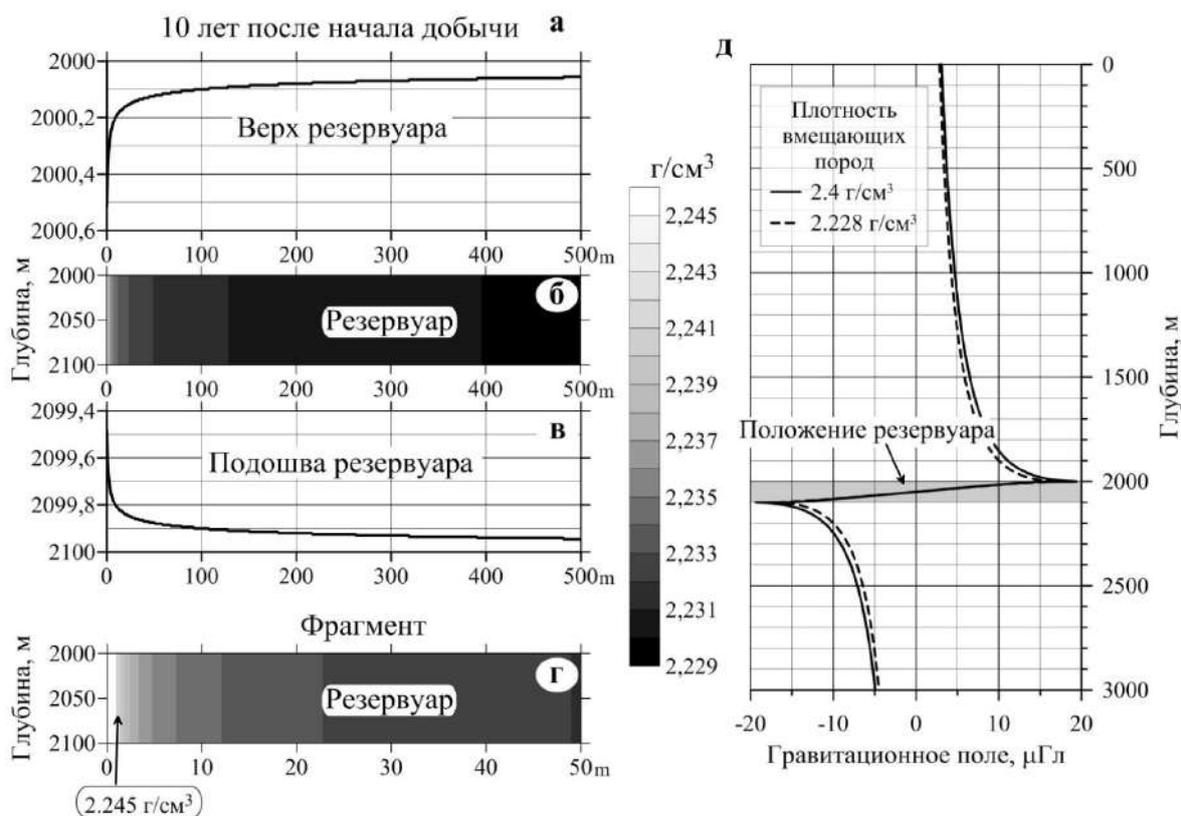


Рис. 2. Модель резервуара и изменения гравитационного поля после 10 лет эксплуатации: а) и в) – геометрия границ резервуара; б) и г) – распределение по радиусу плотности резервуара; д – изменение гравитационного поля в скважине по вертикали

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. - М.: Недра, 1970. - 336 с.
2. Aziz K., Settari A. Petroleum Reservoir Simulation. - London: Appl. Science Publishers LTD, 1979.
3. Eiken O., Stenvold T. Gravimetric and seafloor subsidence monitoring-a reservoir management tool. - SPE Offshore Beregen One Day Seminar, 2005.
4. Ferronato M., Gambolati G., Teatini P., Bau` D. Radioactive marker measurements in heterogeneous reservoirs: numerical study // International Journal of Geomechanics. - 2004. - Vol. 4. - P. 79-92.
5. Geertsma J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs // Journal of Petroleum Technology. - 1973. - P. 734-744.
6. Hearst J.R., Kasameyer P.W., Owen L.B. Potential uses for a high-temperature borehole gravimeter. - Lawrence Livermore Laboratory. - UCRL 52421. - March 8, 1978.
7. Nagel N.B. The Evaluation of Reservoir Compaction and Surface Subsidence Potential for the Parsons Lake Field, Mackenzie Delta - Northwest Territories, Canada. - Report WBT.CU0379-1-2004 November 2004, Updated May, 2006.
8. Pemper R., Fjell L. Field Examples with A New Compaction Monitoring Instrument // Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. - 1997.
9. Stenvold, T., O. Eiken, M. A. Zumberge, G. S. Sasagawa, and S. L. Nooner. High-precision relative depth and subsidence mapping from seafloor water pressure measurements // SPE Journal. - 2006. - Vol. 11. - P. 380-389.
10. Tempone, P., Landrø, M., Fjær, E. 4D gravity response of compacting reservoirs: Analytical approach // Geophysics. - 2012. - Vol. 77. - N 3. - P. g45-g54. - doi: 10.1190/GEO2010-0361.1

© А. Н. Василевский, О. Б. Бочаров, К. М. Эдвардс, 2016

## **ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ**

### ***Леонид Александрович Гагарин***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: gagarinla@gmail.com

### ***Иван Иванович Христофоров***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, старший научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: zodik@mail.ru

### ***Кирилл Ильич Бажин***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: kbazhin@gmail.com

### ***Людмила Сергеевна Лебедева***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: lebedevamila@gmail.com

### ***Николай Владимирович Торговкин***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, младший научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: nikolajj-torgovkin@rambler.ru

### ***Василий Анатольевич Куваев***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, тел. (4112)39-08-33, аспирант, ведущий инженер, e-mail: levchik\_47@mail.ru

### ***Иван Евгеньевич Мисайлов***

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 3, научный сотрудник, тел. (4112)39-08-33, e-mail: ventura-83@mail.ru

На 450 км федеральной автотрассы «Лена» в Южной Якутии проведена оценка оползневых процессов в скальных горных породах. Методами электропрофилеирования и георадиолокации установлены зоны повышенной трещиноватости и высокой обводненности массива юрских песчаников. Опробованы источники подземных вод, в нижней части склона, где развито оползневое тело, установлена их принадлежность к зоне интенсивного водообмена. Установлено зеркало скольжения оползня, приуроченное к трещиноватой обводненной зоне.

**Ключевые слова:** оползень, источник подземных вод, трещиноватость горных пород, георадиолокация, электропрофилеирование.

## **ESTIMATION OF LANDSLIDE IN MASSIVE ROCKS, SOUTH YAKUTIA**

### ***Leonid A. Gagarin***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Research Scientist, tel. (4112)39-08-33, e-mail: gagarinla@gmail.com

***Ivan I. Khristoforov***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Senior Researcher, tel. (4112)39-08-33, e-mail: zodik@mail.ru

***Kirill I. Bazhin***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Junior Researcher, tel. (4112)39-08-33, e-mail: kbazhin@gmail.com

***Lyudmila S. Lebedeva***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Junior Researcher, tel. (4112)39-08-33, e-mail: lebedevamila@gmail.com

***Nikolay V. Torgovkin***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Junior Researcher, tel. (4112)39-08-33, e-mail: nikolajj-torgovkin@rambler.ru

***Vasiliy A. Kuvaev***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Chief Engineer, tel. (4112)39-08-33, e-mail: levchik\_47@mail.ru

***Ivan E. Misaylov***

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Russia, Yakutsk, Merzlotnaya Str. 36, Senior Researcher, tel. (4112)39-08-33, e-mail: ventura-83@mail.ru

Estimation of the landslide in massive rocks at the 450<sup>th</sup> km of the «Lena» highway in southern Yakutia is given. Zones of intensive fracture and high water content of Jurassic sandstone block are revealed by methods of electric profiling and ground penetrating radar. Groundwater springs are sampled at the low part of the slope where landslide massive is developed. It was found out that they refer to the intensive water exchange zone. Landslide polish fault is defined that refer to fractured and watered zone.

**Key words:** Landslide, groundwater spring, rock fracturing, ground penetrating radar, electric profiling.

В июле 2015 г. авторами работы в составе полевого отряда участников Всероссийского молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 200-летию академика А.Ф. Миддендорфа, в районе р. Б. Дурай вдоль федеральной автотрассы «Лена» (450 км) проведены рекогносцировочные исследования оползневого участка. Несмотря на практически повсеместное распространение скальных горных пород рядом факторов, о которых будет упомянуто ниже в тексте, спровоцировано движение грунтовых масс полосой до 20-30 м. Широкое освоение сопредельных районов, в частности строительство котлованов по добыче угля, представляет опасность устойчивости их склонов и, соответственно, делает актуальными исследования оползневых процессов на рассматриваемой территории.

Участок исследований расположен в Нерюнгринском улусе Республики Саха (Якутия) на 450 км федеральной автотрассы «Лена». Ближайший крупный населенный пункт (пос. Чульман) находится в 50 км к югу. В геоморфологи-

ческом отношении участок расположен в пределах центральной части Чульманского плато (рис. 1), выделяемого в границах одноименной впадины [1]. На рассматриваемом участке активно проявляются подземные воды зоны интенсивного водообмена. В ходе маршрутных исследований обнаружена группа источников подземных вод на южном склоне реконструируемой дороги. Разгрузка подземных вод осуществлялась на относительной высоте 1,7 м над уровнем дороги полосой, шириной до 50 м. Родники местами представляли собой напорные струи (грифоны). Суммарный дебит источников в период наблюдений достигал  $0,043 \text{ м}^3/\text{с}$ . Температура воды составляла  $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . По химическому составу воды относятся к гидрокарбонатному магниево-кальциевому классу с повышенным содержанием натрия, имеют минерализацию  $33 \text{ мг/л}$ . Величина  $\text{pH}$  –  $6,21$ , а значение окислительно-восстановительного потенциала  $E_h$  –  $441 \text{ мВ}$ . Таким образом, воды источника циркулируют близ поверхности, о чем свидетельствуют слабо кислотная среда (по  $\text{pH}$ ), большое содержание атмосферных газов (по  $E_h$ ) и низкая минерализация, близкая к водам атмосферных осадков. Вероятнее всего, опробованный источник дренирует подземные воды сезонно-талого слоя, относящиеся к зоне интенсивного водообмена.



Рис. 1. Расположение геофизических профилей на оползневом участке 450 км федеральной автотрассы «Лена»

По данным ДИПО ОАО Иркутскгипродорнии, на южном склоне долины р. Б. Дурай, к которому приурочен оползень, многолетнемерзлые породы высокотемпературные [2]. Так, глубина сезонного оттаивания, в зависимости от микрорельефа, изменяется от 1,5 до 6 м, а температура многолетнемерзлых пород не опускается ниже  $-0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

По данным Филиала в г. Якутске ФКУ «ДСД ДальВосток», в районе 450 км федеральной автотрассы «Лена» в 2012 г. при проведении работ по выработке южного склона долины р. Б. Дурай для прокладки в этом месте дороги

были вскрыты источники подземных вод, разгружающихся широкой полосой в трещиноватых скальных горных породах. В последующем на этом месте произошел крупный оползень, послуживший причиной приостановки всех дорожных работ.

Согласно обследованию ДВГУПС Института транспортного строительства, установлено, что оползень на участке 450 км федеральной автотрассы «Лена» в районе ПК-55 является следствием послонных подвижек горных пород дурайской и юхтинской свит при воздействии сейсмических волн [2]. Авторами данного исследования приводится расчет устойчивости оползневого участка, который свидетельствует о неустойчивом его состоянии. Несмотря на проведенные исследования, специалистами ДВГУПС Института транспортного строительства не приводится роль подземных вод в развитии оползневых процессов, а также данные по кинематике последних.

С целью отработки методики изучения оползня участниками полевого отряда проведены геофизические работы методами электрического зондирования и георадиолокации, а также геологическое описание участка.

Электрическое зондирование было выполнено по одному профилю, длина которого составила 155 м. Профиль располагался вдоль старой дороги от моста через р. Б. Дурай и протягивался в юго-восточном направлении (рис. 1). Работы выполнялись аппаратурой «БИКС» производства КБ «Сейсмического приборостроения».

Глубина изученного геоэлектрического разреза составила 22 м. В ходе опытных работ были выбраны максимальные расстояния между диполями, изменяющиеся в диапазоне от 3,75 до 50 м. Максимальный разнос был выбран при отношении 3.

Обработка полученных данных производилась с помощью программы ZondRes2D, которая позволяет провести инверсию кажущихся сопротивлений в истинные и построить геоэлектрический разрез.

В результате при интерпретации данных в разрезе условно можно выделить 3 области (рис. 2): повышенных значений удельного электрического сопротивления (более 400 Ом\*м); пониженного удельного электрического сопротивления (200-400 Ом\*м); низких удельных сопротивлений (менее 200 Ом\*м). Первая область относится к участкам плотных, малоувлажненных пород (области высокого сопротивления), разделенных ослабленными зонами (трещинами), вероятно, водонасыщенными (вторая область), о чем свидетельствуют источники, расположенные ниже по склону. В правой части разреза (рис. 2) выделена третья область – область разуплотненных горных пород (зона низких сопротивлений). Последняя, вероятно, краевая часть оползневого тела.

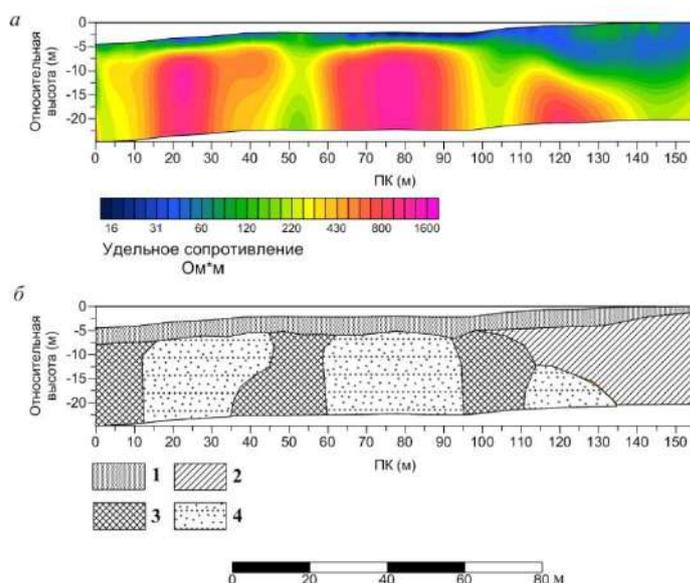


Рис. 2. Геоэлектрический разрез (а) на южном склоне долины р. Б. Дурай и его интерпретация (б).

Условные обозначения: 1 – рыхлые отложения (может быть деятельный слой); 2 – участок горных пород краевой части оползня; 3 – зоны разуплотненных горных пород, возможно, зона фильтрации подземных вод; 4 – участки плотных горных пород

Георадиолокационные исследования проведены с целью оценки возможности применения метода георадиолокации для определения зеркала скольжения оползня в районе 450 км федеральной автодороги «Лена».

Измерения проведены с применением сертифицированных георадиолокаторов с центральной частотой 300 МГц и АБДЛ «Тритон» с центральной частотой 50 МГц (ООО «ЛогиС-Геотех»). Для привязки полученных данных измерений к реальным глубинам разреза параметр диэлектрической проницаемости среды принят равным 6, что соответствует скальным трещиноватым горным породам.

Георадиолокационные исследования проводились по 4 профилям (см. рис. 1). В результате интерпретации данных на геоэлектрических профилях, выполненных линейными антеннами с центральной частотой 50 МГц, обнаружены низкочастотные участки, свидетельствующие о наличии зон повышенной увлажненности горных пород, вероятно, зон фильтрации подземных вод (рис. 3). Для выявления геометрии обводненных зон некоторые георадиолокационные разрезы были привязаны к рельефу местности, который, в свою очередь, получен по данным тахеометрической съемки. Отрезок профиля с участками повышенного увлажнения горных пород приурочен к нижней части оползневого тела. Глубину залегания верхней границы обводненной зоны определить не представлялось возможным, так как скоростные характеристики распространения электромагнитных волн в горной породе имели широкий диапазон значений. Полученные данные показывают, что ширина обводненных участков достигает 40 м, границы которых

в проекции на дневную поверхность совпадают с границей оползневого тела. Вероятно, зона обводнения (повышенной трещиноватости) грунтов и есть зеркало скольжения оползня в районе 450 км федеральной автотрассы «Лена».

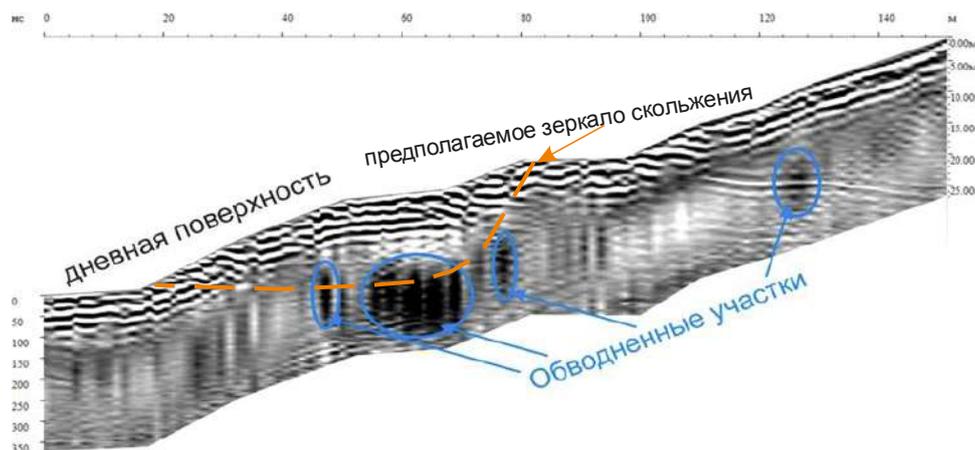


Рис. 3. Георадиолокационный разрез по профилю 1

Таким образом, мы считаем, что основной причиной образования оползня на 450 км федеральной автотрассы «Лена» явилась подрезка склона в результате дорожных работ. Совокупность факторов, в числе которых высокая трещиноватость горных пород, значительная водообильность, а также сейсмическая активность территории, явилась катализатором процесса. Анализ полученных данных указывает на необходимость тщательного изучения геологического и гидрогеологического строения рассматриваемой территории при проведении горнопроходческих работ во избежание негативных последствий.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №16-35-60027-мол\_а\_дк и №16-35-60082-мол\_а\_дк

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Южная Якутия. Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / под ред. Кудрявцева В.А. - М.: Изд-во МГУ, 1975. - 444 с.
2. Кудрявцев С.А., Малеев Д.Ю. Обследование оползневого участка строительства автомобильной дороги М56 «Лена» на 450 км. Анализ землетрясений, произошедших в 2011 году и расчет устойчивости оползневого склона на 450 км автомобильной дороги М56 «Лена». - Хабаровск: ФКУ «ДСД Дальний Восток», 2012.
3. Торопыгин С.Б. и др. Материалы к Государственной геологической карте РФ м-ба 1:200000 (второе издание) (отчёт о результатах геологического доизучения ранее заснятых площадей масштаба 1:200000 и подготовки к изданию Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000 (новая серия) территории листов О-51-XXIX и О-51-XXXV) Кн. 1. - Чульман, ФГУП РС(Я) «Алдангеология», 2004.

© Л. А. Гагарин, И. И. Христофоров, К. И. Бажин,  
Л. С. Лебедева, Н. В. Торговкин, В. А. Куваев, И. Е. Мисайлов, 2016

## **ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЯМР-ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ, КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ КРИОГЕЛЕМ, ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

### ***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 лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

### ***Тимофей Игоревич Ельцов***

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 скважинной геофизики, тел. (383)363-80-31, e-mail: YeltsovTI@ipgg.sbras.ru

### ***Светлана Николаевна Мелкозерова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)363-80-31, e-mail: MelkozerovaSN@ipgg.sbras.ru

### ***Мария Йоновна Шумскайте***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)363-80-31, e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

### ***Анастасия Сергеевна Юнашева***

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студентка группы ФГ-21, тел. (383)363-80-31

Исследовано поведение электрофизических и ЯМР-характеристик грунтовых композитов в процессе циклического замораживания/размораживания. Композиты состоят из естественного песчаного грунта и криогеля на основе 10 % раствора поливинилового спирта (ПВС). Степень заполнения порового пространства грунта криогелем – 35 %.

**Ключевые слова:** криогели, удельное электрическое сопротивление, комплексная диэлектрическая проницаемость, диаграмма Коул-Коул, ЯМР-спектрометрия.

## **BEHAVIOR OF THE ELECTROPHYSICAL AND NMR PROPERTIES OF GROUND COMPOSITES CONDITIONED CRYOGELS, TEMPERATURE CYCLING**

### ***Nikita A. Golikov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

### ***Timofey I. Eltsov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)363-80-31, e-mail: YeltsovTI@ipgg.sbras.ru

*Svetlana N. Melkozerova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Engineer of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)363-80-31, e-mail: MelkozerovaSN@ipgg.sbras.ru

*Maria J. Shumskayte*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D. student of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

*Anastasia S. Junasheva*

Novosibirsk state technical university, 630090, Russia, Novosibirsk, Karla Marksa Prospect 20, student, tel. (383)363-80-31

Electrophysical characteristics and NMR spectra of ground composites during cyclic freezing and thawing have been studied. Composites consist of natural sandy soil and cryogel based on 10 % polyvinyl alcohol (PVA). The degree of soil pore space filling with cryogel is 35 %.

**Key words:** cryogel, resistivity, complex dielectric permittivity, Cole-Cole diagram, NMR-spectrometry.

Применение грунтовых композитов на основе растворов поливинилового спирта (ПВС) для защиты от деградирования почв и насыпных сооружений являются перспективным направлением. При замораживании/размораживании криогелей образуются упругие полимерные тела, которые связывают ингредиенты рыхлого грунта в единое целое [1, 2].

Проведены лабораторные исследования физических свойств композита «песок-криогель» на основе 10 % водного раствора ПВС. Песок и гель смешивались до получения однородной массы, полученный композит помещался в измерительные ячейки. Проведены измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) на частоте 1 кГц с помощью RLC-метра E7-8, комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) в диапазоне частот 1 кГц-5 МГц конденсаторным методом с помощью RLC-измерителя GWInstek 78105G и ЯМР-спектрометрия на релаксометре «МСТ-05». Температура контролировалась встроенными электронными датчиками температуры (DS18B20).

Температура изменялась циклически в диапазоне от +20°C до -17°C. Всего проведены измерения в течение 5 циклов.

#### УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

С уменьшением температуры УЭС грунтовых композитов увеличивается и доходит до максимума при диапазоне температур от -8 до -10°C (рис. 1). После достижения максимума УЭС падает в 2-3 раза при достижении температуры -17°C. При нагревании ячеек с образцами грунтовых композитов происходит увеличение УЭС до предельного значения при температуре около 0°C, и после этого происходит уменьшение УЭС до первоначальных значений при комнатной температуре.

Зависимость УЭС грунтовых композитов от температуры отличается от подобной зависимости чистого криогеля. При замораживании/размораживании чистого криогеля наблюдается гистерезис УЭС. При температурах ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  УЭС грунтовых композитов стабилизируется и по значениям на порядки отличается от УЭС при комнатной температуре и УЭС мерзлого песка.

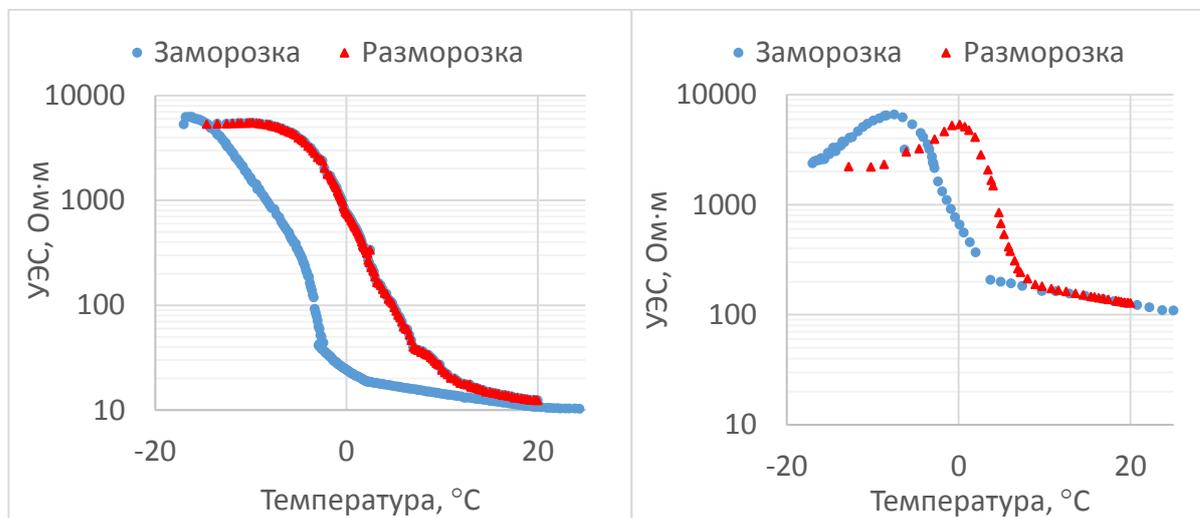


Рис. 1. Слева зависимость УЭС чистого криогеля от температуры. Справа зависимость УЭС грунтового композита от температуры

Дальнейшие циклы практически не оказывают значительного влияния на поведение УЭС.

### КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Спектр КДП грунтового композита до заморозки на диаграмме Коул-Коул близок к спектру поляризации типа Коул-Коул (рис. 2) с частотой максимальной дисперсии 1,2 МГц. В процессе первого цикла замораживание/размораживание спектр КДП приобретает сложный характер:

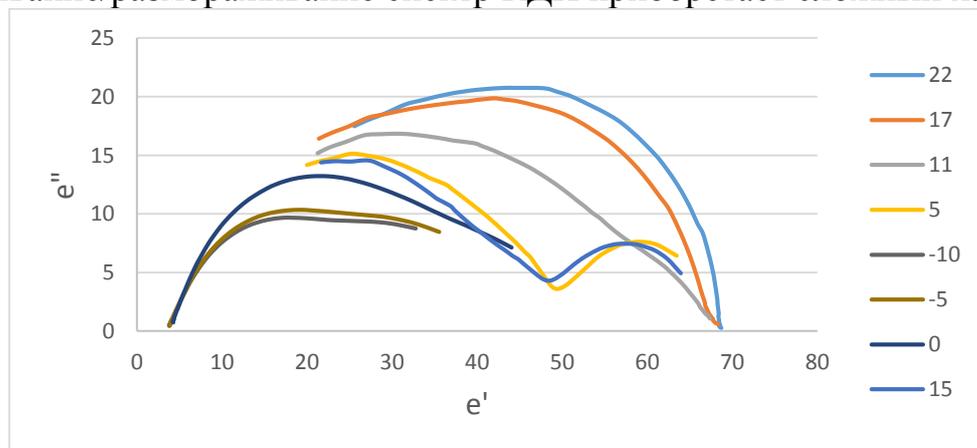


Рис. 2. Диаграммы Коул-Коул для грунтового композита при циклическом изменении температуры. Индекс кривой – температура  $^{\circ}\text{C}$

С уменьшением температуры реальная и мнимая части КДП уменьшаются, при температуре 5 °С проявляются две поляризации с частотами максимальной дисперсии 3 МГц в высокочастотной области и 2 КГц в низкочастотной. При дальнейшем понижении температуры частота максимальной дисперсии понижается для высокочастотной части до 10 КГц, для низкочастотной смещается за пределы диапазона измерений.

При повышении температуры до +15 °С спектры КДП становятся близкими к спектрам при температуре +5 °С, при охлаждении и при дальнейшем циклическом замораживании/размораживании спектры КДП изменяются в этих пределах.

### ЯМР-ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выполнены ЯМР-измерения геля и его смеси с песком для четырех циклов заморозки/разморозки. В составе смеси содержание геля составляло 5, 15, 25 и 35 %.

При заморозке наблюдается увеличение времен релаксации с уменьшением температуры при любом содержании геля в песке. Коэффициент пористости закономерно уменьшается при заморозке, что свидетельствует об уменьшении доли подвижного флюида. При этом 3-ий и 4-ый циклы заморозки характеризуются наименьшими изменениями как  $T_2$ , так и  $K_p$ .

При разморозке для всех образцов в каждом цикле закономерно увеличивается время релаксации и коэффициент пористости. При этом на всех циклах, кроме 1-го, наблюдаем установление постоянных значений  $K_p$  и  $T_2$  при температуре выше 0°С.

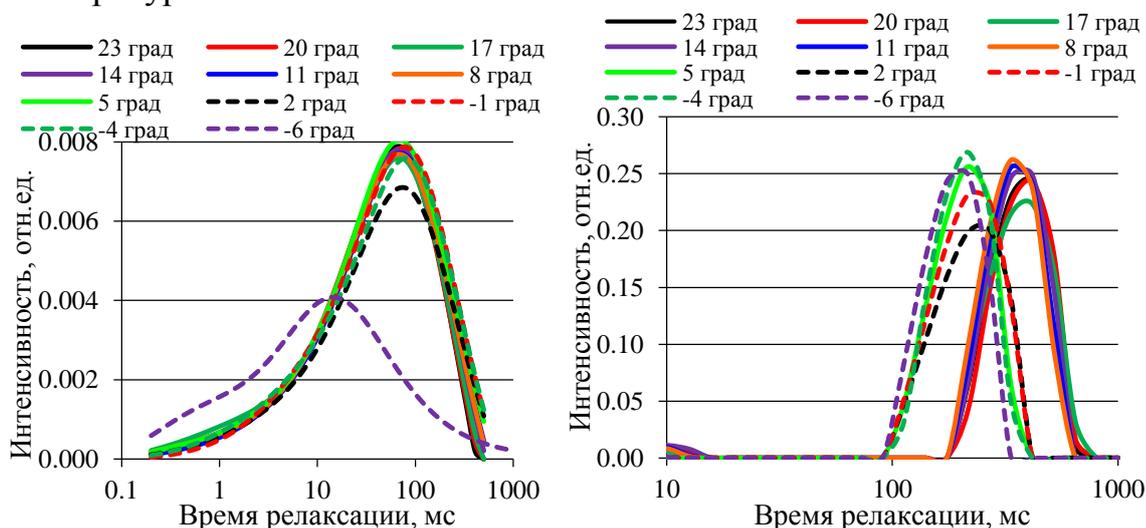


Рис. 3. ЯМР-спектры смеси 15% геля с песком (слева) и «чистого» геля (справа) при 3-м цикле заморозки

Из рис. 3 видно, что ЯМР-спектры практически не меняются с уменьшением температуры, за исключением минимальной температуры -6°С, когда спектр смещается влево и уменьшается его амплитуда, что говорит

о полном замерзании флюида. Для «чистого» геля спектры смещаются при каждом уменьшении температуры, т. е. флюид замерзает.

Из рис. 4 видно, что при разморозке смеси геля и песка до достижения положительной температуры спектры сначала смещаются в сторону больших времен релаксации и увеличивается их амплитуда, с дальнейшим увеличением температуры спектры стабилизируются. Для «чистого» геля спектры закономерно увеличиваются по амплитуде и смещаются в сторону больших времен релаксации, что говорит о переходе флюида в подвижную фазу.

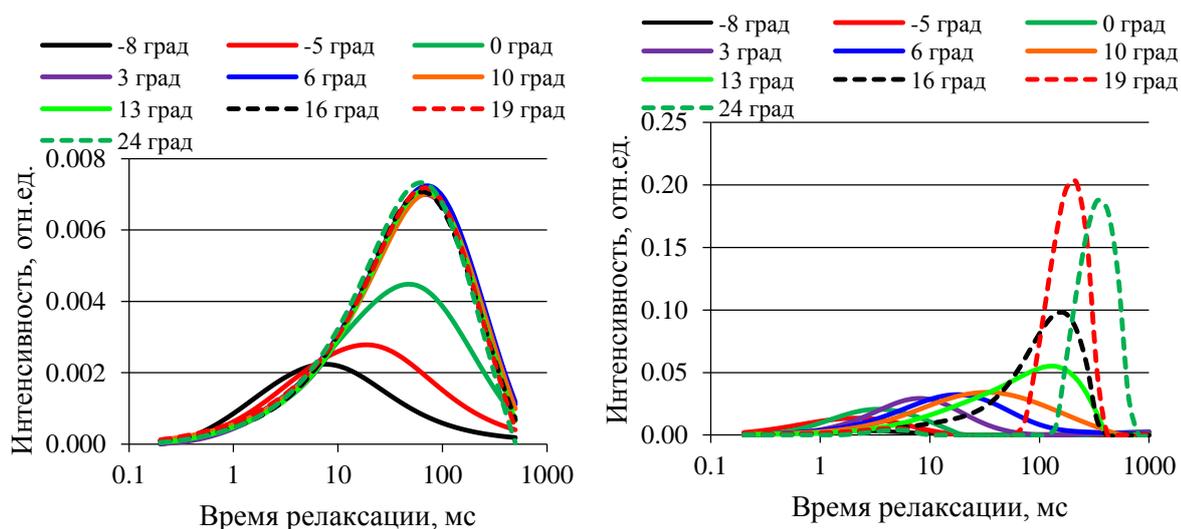


Рис. 4. ЯМР-спектры смеси 15 % геля с песком (слева) и «чистого» геля (справа) при 3-м цикле разморозки

Незначительные изменения амплитуды ЯМР-спектров и отсутствие их смещения по временам релаксации говорит о неизменности структуры порового пространства, образуемого гелем и песком, при изменении температуры.

## ВЫВОДЫ

Проведенные измерения электрофизических и ЯМР-характеристик грунтовых композитов, состоящих из естественного песчаного грунта и криогеля на основе 10 % раствора ПВС, в процессе циклического замораживания/размораживания показали, что основные структурные изменения происходят при первом цикле заморозки. Структурные изменения приводят к сложным зависимостям электрофизических и ЯМР-характеристик от температуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алтунина Л.К., Фуфаева М.С., Филатов Д.А., Сваровская Л.И., Ган-Эрдэнэ Т. Применение криогеля для стабилизации почв, подверженных дефляции // Криосфера Земли. - 2013. - Т. XVII. - № 3. - С. 83-88.
2. Манжай В.Н., Фуфаева М.С. Свойства криогелей и их применение в технологиях добычи и транспорта нефти // Нефть и газ. - 2011. - № 6. - С. 102-107.

© Н. А. Голиков, Т. И. Ельцов, С. Н. Мелкозерова, М. Й. Шумскайте, А. С. Юнашева, 2016

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ РУДОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ НА СЫПЧУГУРСКОЙ РУДОНОСНОЙ ПЛОЩАДИ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)**

***Екатерина Сергеевна Горностаева***

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

***Александр Сергеевич Калганов***

Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, аспирант, e-mail: gravegro@yandex.ru

***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 Юрьевич Юдицких***

Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, кандидат геолого-минералогических наук, зав. кафедрой геофизики, e-mail: Eug71@yandex.ru

Обсуждаются результаты изучения процесса вызванной поляризации (ВП) одного из перспективных рудных участков на промышленное золотое оруденение. Анализ пространственного распределения удельного электрического сопротивления и кажущейся поляризуемости дает возможность выделить рудные зоны. Данные о скорости спада процесса поляризации позволяют высказать предположения относительно зональности минеральных ассоциаций.

**Ключевые слова:** электротомография, метод вызванной поляризации, скорость спада, геоэлектрический разрез, заряжаемость, золотое оруденение.

## **THE APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY INDUCED POLARIZATION METHOD TO SEARCH FOR ORE ON SYPCHUGURSKOY MINERALIZED AREAS (TRANS-BAIKAL TERRITORY)**

***Ekaterina S. Gornostaeva***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Engineer, e-mail: GornostaevaES@gmail.com

***Alexander S. Kalganov***

Zabaikalsky State University, 672039, Russia, Chita, Alexandro-Zavodskya Str. 30, Ph. D., student, e-mail: gravegro@yandex.ru

***Vladimir V. Olenchenko***

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

*Eugene Y. Yudiskih*

Zabaikalsky State University, 672039, Russia, Chita, Alexandro-Zavodskaya Str. 30, Ph. D., Head of the Laboratory of Geophysics, e-mail: Eug71@yandex.ru

Discusses the results of studying the process of induced polarization (IP) one of the most promising ore areas for industrial gold mineralization. The analysis of the spatial distribution of electrical resistivity and apparent polarizability allows to identify the ore zone. Data on the rate of decay of the polarization process, allow us to make assumptions about the zoning of mineral associations.

**Key words:** electrical resistivity tomography, induced polarization method, decay rate, geoelectric section, chargeability, gold mineralization.

Метод вызванной поляризации имеет высокую эффективность при проведении поисково-разведочных работ на твердые полезные ископаемые. Это объясняется тем, что он является единственным методом электроразведки, который позволяет выделять породы, содержащие электропроводящие минералы, присутствие которых является поисковым признаком гидротермально или метасоматически измененных пород, часто вмещающих рудные тела [1].

Метод ВП основан на изучении вторичных электрических полей, источником которых являются физико-химические процессы, возбуждаемые в геологической среде электрическим током. Интенсивные поля ВП создаются над средами, содержащими рудные (электропроводящие) минералы. Во время пропускания тока на поверхности рудных минералов протекает ряд физических превращений и химических реакций, приводящих к поляризации среды. После отключения тока в среде начинает устанавливаться равновесие, проявляющееся в спаде вторичного электрического поля и наличии на приемных электродах потенциалов  $\Delta U_{ВП}$  в течение некоторого времени. Различают быстрые и медленные процессы ВП. Первые протекают в микро-миллисекундном временном диапазоне, а вторые – в течение секунд, часов. Скорость спада переходной характеристики ВП во времени определяется электрохимическими свойствами поляризуемой среды. Она несет информацию о природе поляризуемого объекта, т. е. о минеральном составе того или иного рудного тела и зональных изменениях в контурах месторождений [2].

В настоящее время при рудопоисковых работах развивается применение метода электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП) [3-5]. Мы опробовали метод ЭТ-ВП на одном из рудных месторождений Забайкалья.

Сыпчугурская рудоносная площадь находится на территории Карымского и Читинского районов Забайкальского края, в 80-85 км к юго-востоку от г. Читы и составляет 115,7 км<sup>2</sup>. Площадь состоит из двух рудных полей: Горхонского, расположенного в западной части, и Сыпчугурского, находящегося в восточной части площади. Главными разрывными структурами площади являются северо-восточный Монголо-Охотский и субмеридиональный Онон-Туринский глубинные разломы, а также субширотная Оленгуй-Битуйская зона повышенной трещиноватости. Монголо-Охотский и Онон-Туринский

разломы являются структурными швами длительного развития, разделяющими структурно-формационные зоны. Разрывные нарушения играют важную роль в формировании структур рассматриваемой территории [6]. Рудные тела Сыпчугурской рудоносной площади относятся к гидротермальной среднетемпературной золото-кварц-сульфидной (пирит-арсенопиритового типа) формации. Они приурочены к разломным зонам. Коренные породы перекрыты чехлом рыхлых отложений мощностью от 1-2 до 10-15 и более м (в долинах рек).

Исследования методом ЭТ-ВП были проведены на участке Серебряный. Четыре профиля проходили в юго-восточном направлении вкрест простирания основных геологических структур и располагались на расстоянии 200 м друг от друга, длина профилей составляла 960 м. Измерения выполнены аппаратурой Скала-64, разработанной в ИНГГ СО РАН и произведенной серийно ООО «КБ Электрометрии». При измерениях применялась градиентная установка с линией АВ размером 315 м. Параметры ВП оценивались во временном диапазоне 20-160 мс. Рассчитывалась заряжаемость ( $C$ ) среды. Геоэлектрические разрезы УЭС и заряжаемости по одному из профилей участка, полученные в результате 2D-инверсии, показаны на рис. 1.

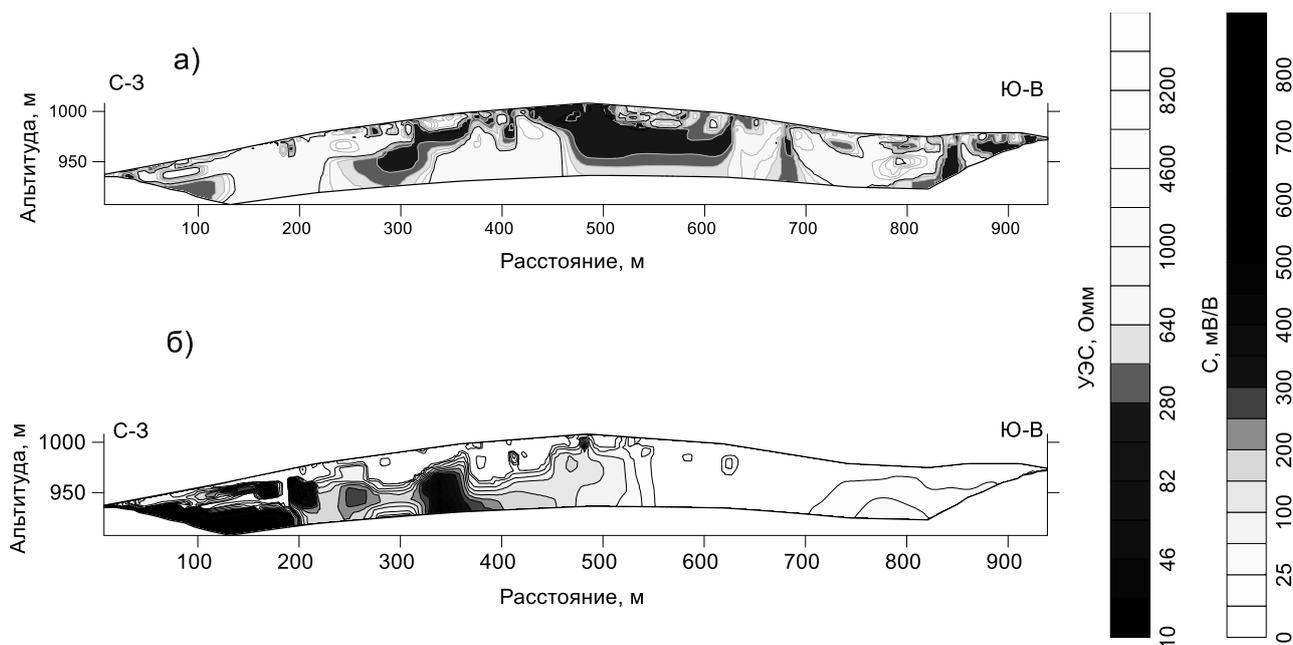


Рис. 1. Разрез УЭС (а) и заряжаемости (б) по данным 2D-инверсии. Участок Серебряный, Сыпчугурское рудное поле

По пониженным значениям удельного электрического сопротивления выделены разломные зоны, а по повышенным значениям заряжаемости выделены аномалии, приуроченные к зонам оруденения. Наиболее интенсивные аномалии ВП (400-700 мВ/В) отмечаются в интервалах профиля 0-200 м и 310-360 м. В аномальных по заряжаемости зонах анализировались переходные характеристики ВП. За аномальные принимались участки, где значения  $C$  трехкратно превышали среднеквадратичное отклонение выборки ( $3\sigma$ ).

Для анализа временных характеристик спада ВП применена характеристика, используемая в методе РСВП – приведенная скорость спада  $S_k$  [2]. Под скоростью спада понимается изменение напряжения  $U_{ВП}(t)$  за определенный промежуток времени:

$$S_k = \frac{U_{ВП}^{t_1} - U_{ВП}^{t_2}}{U_{ВП}^{t_1} \cdot \Delta t}, \text{ с}^{-1}$$

где  $U_{ВП}^{t_1}$  и  $U_{ВП}^{t_2}$  – значения напряжений  $U_{ВП}$  в момент времени  $t_1 = 20$  мс и  $t_2 = 40$  мс,  $\Delta t = t_2 - t_1 = 20$  мс. Для сравнения формы кривых спада ВП каждая кривая была пронормирована на значение  $U_{ВП}^{t_1}$  и приведена к нулевому уровню путем вычитания значения  $U_{ВП}$  на временной задержке 160 мс.

Полученные графики зависимости спада напряжения  $U_{ВП}$  от времени  $t$  с момента выключения тока показаны на рис. 2. По форме кривых выделено три типа спада ВП. К первому относятся кривые с самой высокой скоростью спада ВП на данном участке, к третьему типу – с низкой скоростью.

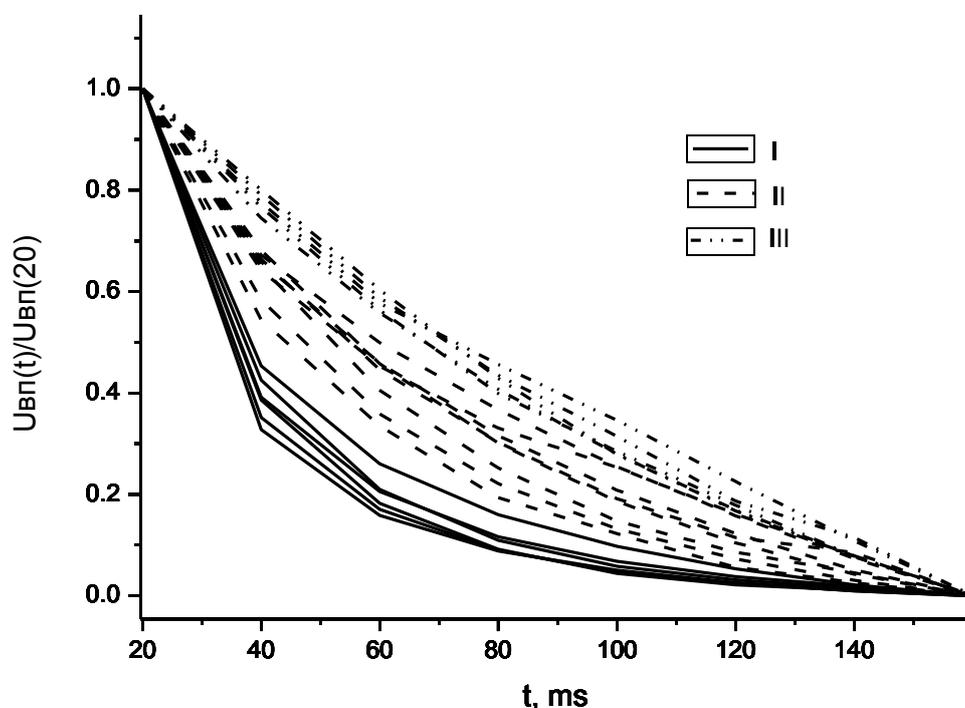


Рис. 2. Графики спада ВП, где I – высокая скорость спада ВП ( $S=27 \div 33 \text{ с}^{-1}$ ), II – средняя ( $S=15 \div 22 \text{ с}^{-1}$ ), III – низкая ( $S=1 \div 12 \text{ с}^{-1}$ )

Важно отметить, что три типа графиков соответствуют разным глубинам. Первый тип кривых с быстрой скоростью спада относится к верхней части разреза до глубины 10-15 м. Второй тип проявляется в средней части разреза – переходная область от верхней части разреза к рудной области (околорудное пространство). Третий тип – это нижняя часть разреза (30-50 м). Мы предполагаем, что изменение типа кривых спада ВП связано с изменением электрохимических свойств сульфидов с глубиной. В верхней части разреза

развита кора выветривания, на глубине сульфиды находятся в неокисленной форме. С другой стороны, изменение скорости спада может быть связано с увеличением количества арсенопирита в рудных ассоциациях, так как арсенопирит характеризуется низкими скоростями спада ВП [2].

Таким образом, метод ЭТ-ВП позволяет выделять наряду с разломными зонами области сульфидной минерализации, а анализ временных характеристик ВП дает возможность выделять руды с разной электрохимической активностью. Информация о разных типах руд может быть использована при выборе технологии обогащения при разработке месторождения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коробейников А.Ф. Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 253 с.
2. Карасев А.П., Птицын А.Б., Юдицких Е.Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. - Новосибирск: Наука, 2005. - 291 с.
3. Куликов В.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м // Геофизика. - 2014. - № 2. - С. 39-46.
4. Ерохин С.А., Бобачев А.А. Исследование перспективного золоторудного участка в северной Якутии с помощью электротомографии // Engineering and Mining. - 2009. - 26 с.
5. Гурин Г.В. Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд: дис. ... канд. геол.-мин. наук. - СПб., 2015. - 132 с.
6. Ковалев П.И., Землянский Л.Н., Бородин В.Г. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые среднего течения р.Туры и Оленгуй. - Чита: ЧГУ, 1968. - 237 с.

© Е. С. Горностаева, А. С. Калганов, В. В. Оленченко, Е. Ю. Юдицких, 2016

## **О ПРИЧИНАХ УВЕЛИЧЕНИЯ АМПЛИТУД СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

***Павел Владимирович Громыко***

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-геофизик, тел. (923)191-65-57, e-mail: Psharak@ngs.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 Владимирович Лисейкин***

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

Данная работа посвящена инженерно-сейсмологическому исследованию Саяно-Шушенской гидроэлектростанции, направленному на определение причин возникновения повышенных колебаний в теле плотины.

**Ключевые слова:** гидроакустические, собственные колебания, плотина, водовод.

## **CAUSES INCREASE THE AMPLITUDE OF NATURAL OSCILLATIONS OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HYDRO POWER PLANTS**

***Pavel V. Gromyko***

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Geophysicist, tel. (923)191-65-57, e-mail: Psharak@ngs.ru

***Victor S. Seleznev***

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

***Alexey V. Liseikin***

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

This work is dedicated to engineering-seismological research Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant aimed to identifying causes of increased oscillations in the dam.

**Key words:** hydroacoustic, natural oscillations, dam, water conduit.

Распространение сейсмических колебаний в теле плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (далее СШ ГЭС), как и в любом замкнутом пространстве, приводит к образованию стоячих волн, частоты колебаний которых являются собственными. Воздействие внешних источников может привести к резонансу на данных частотах, представляющему опасность для конструкции сооружения.

В ГС СО РАН разработан и запатентован метод, который позволяет по данным микросейсмических колебаний, зарегистрированных в инженерном сооружении, выделить поле стоячих волн [1, 2]. После аварии в 2009 г. сотрудниками ГС СО РАН с применением данного метода на гребне плотины СШ ГЭС (отм. 542 м, рис. 1) были определены собственные частоты колебаний сооружения.

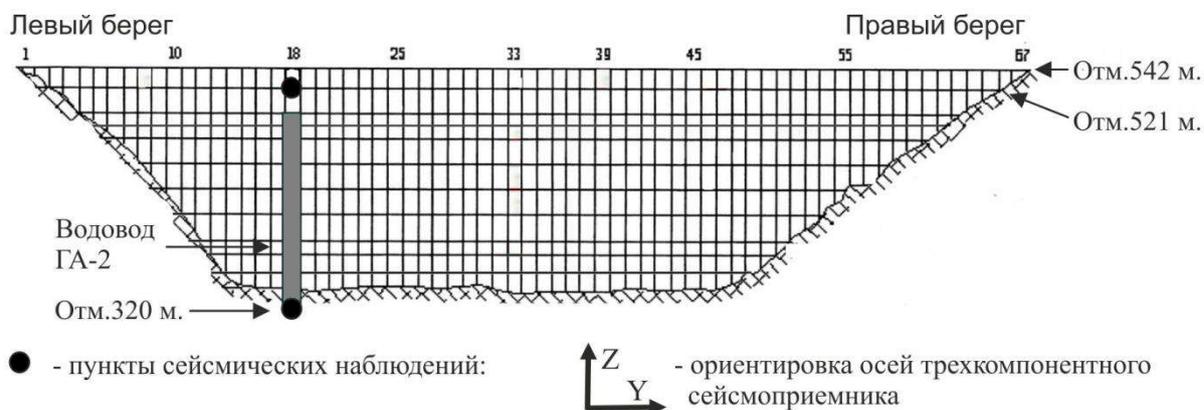


Рис. 1. Схема сейсмических наблюдений

При дальнейших исследованиях, посвященных определению параметров динамических воздействий и их связи с режимами работ для каждого из вводимых в эксплуатацию гидроагрегатов, в различных пунктах наблюдения в теле плотины и на агрегатных блоках СШ ГЭС был обнаружен эффект многократного увеличения значений амплитуд радиальных колебаний (направленных по течению) на собственных частотах [3, 4]. Так, при нагрузках на гидроагрегатах (далее ГА) в среднем от 100 МВт до 300 МВт наблюдались повышенные значения 6-й и 7-й форм собственных колебаний (попадающих в интервал 3-4 Гц – на рис. 2 частоты 3.1 и 3.8 Гц), а при 100-480 МВт – с 1-й по 5-ю формы (в интервале 1-3 Гц). При этом максимальные значения амплитуд колебаний в 20 раз превышали уровень фона (колебаний тела плотины, регистрируемых при работе группы гидроагрегатов с нагрузками от 500 МВт и выше). Подобное поведение может быть опасно, так как амплитуды возрастают достаточно резко (рис. 2, в, д), что свидетельствует о возникновении резонансных колебаний.

Для того чтобы избежать влияния вышеупомянутого эффекта, нужно или не работать в опасных режимах, или вносить конструктивные изменения в элементы ГЭС. Попытаемся разобраться в причинах этого явления.

В ходе работ было замечено, что одним из факторов, воздействующим на собственные колебания плотины СШ ГЭС, являются гидроакустические колебания, зарегистрированные возле водоводов исследуемых гидроагрегатов. На рис. 2 изображен результат регистрации сейсмических колебаний в точках наблюдения, расположенных в верхней части плотины (отм. 521 м) и в агрегатном блоке у водовода (отм. 320 м) по оси ГА-2. На графиках видна взаимосвязь

между изменениями значений амплитуд собственных гидроакустических колебаний в водоводе и собственных колебаний плотины. Когда нагрузка на гидроагрегат составляет 120-320 МВт, наблюдается рост амплитуд 6-й и 7-й форм собственных колебаний плотины и рост гидроакустических колебаний в полосе частот 3,7-5,1 Гц, а при 340-530 МВт наблюдается рост на первых пяти формах и в полосе частот 1,3-2,3 Гц соответственно. Таким образом, собственные колебания в плотине увеличиваются при тех же условиях, что и колебания в водоводе.

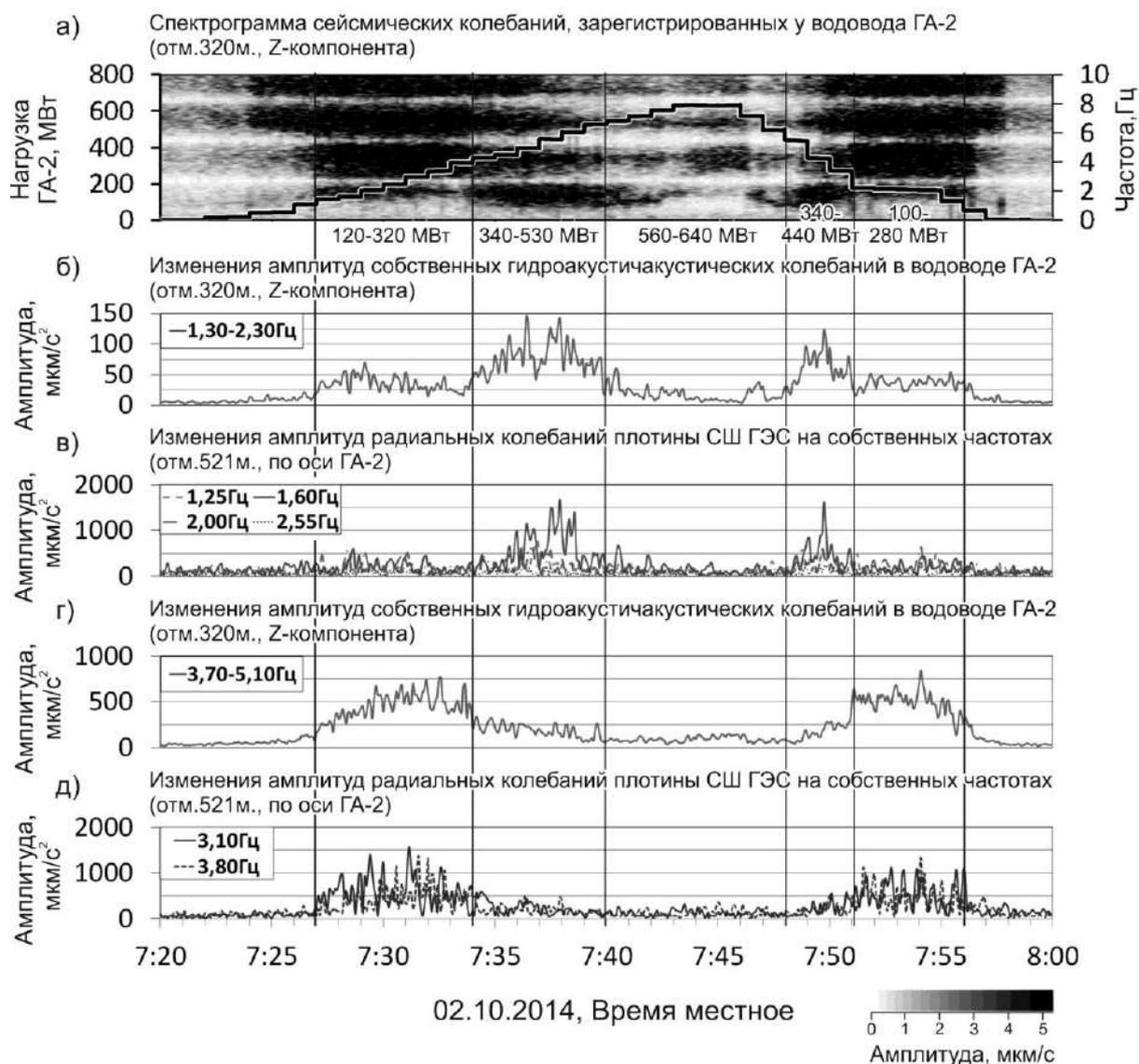


Рис. 2. Результат регистрации сейсмических колебаний в точках наблюдения в плотине и у водовода СШ ГЭС: (а) – спектрограмма колебаний, зарегистрированных на отм. 320 м, и режимы работы ГА-2; (б) и (г) – графики изменений амплитуд собственных гидроакустических колебаний; (в) и (д) – графики изменения амплитуд собственных колебаний плотины 2-5 и 6-7-й форм соответственно

Вышеописанная зависимость требует более детального изучения, поэтому в дальнейшем предлагается выполнять теоретические и экспериментальные исследования, направленные на то, чтобы уменьшить амплитуды собственных гидроакустических колебаний в водоводе, что, в свою очередь, приведет к уменьшению деформационных процессов водовода и тела плотины СШ ГЭС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. - 2002. - № 2. - С. 192-207.
2. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: пат. на изобретение РФ, № 2461847 / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, А.А. Брыксин. - Бюл. № 26. - 20.09.2012.
3. 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.
4. Громыко П.В., Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Курзин В.Б. Изменения собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при работе старых и новых гидроагрегатов // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рожд. акад. Н.Н. Пузырева (г. Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.). - 2014. - С. 125-128.

© П. В. Громыко, В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, 2016

## **ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХВОСТОХРАНИЛИЩА КОМСОМОЛЬСКОГО ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА (КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

*Анна Юрьевна Девятова*

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; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент, тел. (913)745-53-79, e-mail: DevyatovaAY@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, зав. лабораторией геоэлектрохимии, тел. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Работа посвящена изучению состава газовых потоков, концентрации и миграционной способности химических элементов в газовой фазе, отделяющейся от сульфидных хвостохранилищ при их нагревании или горении. Рассчитаны коэффициенты подвижности в системе порода/воздух, определена сравнительная подвижность элементов при отделении парогазовой фазы.

**Ключевые слова:** сульфидные хвостохранилища, газовый перенос элементов, Комсомольский золотоизвлекательный завод.

## **GAS-AEROSOL TRANSFER OF ELEMENTS FROM WASTE DUMPS OF KOMSOMOLSK GOLD PROCESSING PLANT (KEMEROVO REGION)**

*Anna Y. Devyatova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Scientific Researcher; Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, docent, tel. (913)745-53-79, e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

*Svetlana B. Bortnikova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Professor, Head of the Laboratory, tel. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

This article presents the results of field and laboratory research of gas-vapor transfer of chemical elements from sulfide-containing tailing dump (township Komsomolsk in Kemerovo region. Work is devoted to studying the composition of the gas flow, concentration and migration ability of chemical elements in the gas phase is separated from the sulfide tailings during heating or combustion. Calculated coefficients of mobility in the rock / air system, determined the relative mobility of the elements in the vapor-gas phase separation.

**Key words:** sulfide-containing tailings, gas emission, air pollution, physical and chemical simulation.

Газовое и аэрозольное загрязнение окружающей среды на сегодняшний день представляет серьезную проблему, которая будет только нарастать

в ближайшие десятилетия. Исследования глобальной эмиссии тяжелых металлов из основных антропогенных источников в атмосферу впервые были выполнены J.O. Nriagu, J.M. Pacyna [1].

Согласно этим данным, почти все промышленные производства, а также сжигание топлива, транспорт и другие виды деятельности человека приводят к антропогенному рассеиванию элементов в окружающей среде. В то же время хорошо прослеживается, что наибольший вклад вносят все виды сжигания топлива (386216 т/год), автотранспорт (88739 т/год), цветная металлургия (88629 т/год), черная металлургия (6592 т/год), производство цемента (4826 т/год).

Актуальность проблемы, в рамках которой проведена данная работа, состоит в необходимости получения фактической информации о составе газовых потоков, особенно концентрации и миграционной способности химических элементов в газовой фазе, отделяющейся от сульфидных хвостохранилищ при их нагревании или горении. Эманирование газов из твердых тел происходит за счет «эффекта отдачи», за счет диффузионных процессов в твердом теле и при термических и компрессионных воздействиях на материал [2]. Несмотря на длительную историю исследований эманирования различных веществ, вопрос о влиянии содержания поровой влаги на возникновение флюидных и газовых потоков до сих пор остается открытым. Вместе с тем известно, что влажность – это практически единственный внешний фактор в условиях нормальных температур и давления естественной среды, который может существенно влиять на эманирование [3].

Задачи, решаемые в данной работе, состояли в оценке газового выноса элементов при повышении температуры; определении сравнительной подвижности элементов при отделении парогазовой фазы. Исследование проводилось применительно к Комсомольскому хвостохранилищу.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Бывший Комсомольский золотоизвлекательный завод (КЗЗ) расположен в Кемеровской области, в Кузнецком Алатау. Завод был введен в эксплуатацию в 1937-1940 гг. Общая масса отработанной руды за годы работы завода составила 1 227 300 т.

На заводе перерабатывались золото-арсенопирит-кварцевые руды Комсомольского месторождения, основными сульфидными минералами которых являлись пирит, сфалерит, галенит, пирротин, арсенопирит. Основной жильный минерал – кварц. Золото извлекалось методом цианирования в NaCN из руды, предварительно обработанной обычным способом (руда измельчалась до -150 меш). Осаждение металла производилось цинковой пылью, и основным продуктом был Au-шлам, отходы извлечения золота в виде пульпы с 1964 г. сбрасывались в хвостохранилище, расположенное в 1200 м от завода в бассейне ручья Екатерининского. Оно представляет собой широкую котловину, расположенную выше здания завода на 30 м. Хвостохранилище было предназначено для очистки общего стока завода, образующегося за счет репульпированного водой кека и сбрасываемых обеззолоченных растворов.

Для оценки газового переноса элементов с поверхности хранилищ были использованы два подхода.

1. Непосредственно на объекте исследования была проведена принудительная прокачка через барботер со сбором конденсатов либо через щелочную загрузку (10 мл дистилл. вода + NaOH до pH = 9.5) с помощью почвенного круга, изготовленного по схеме Ю.В. Алехина и др. [4] (рис. 1, а). Воздух через загрузки прокачивался в течение 2 часов при приблизительной скорости 1 л/мин.

2. Лабораторные эксперименты по сбору конденсатов газов, отделяющихся при нагревании вещества: 8 проб из верхних слоев шурфов (по 4 из каждого). Навеска пробы 100 г при естественной влажности помещалась в термостойкий стеклянный стакан, соединенный через воронку с барботером силиконовым шлангом (рис. 1, б.). Стакан с пробой нагревался на плитке при постоянной температуре 90 °С, имитируя нагревание вещества при горении отвала. Барботер помещался в охлаждающую среду для конденсации отделяющейся парогазовой смеси. С помощью обратного ручного насоса были собраны конденсаты, характеризующие эманации от вещества хвостохранилища при его нагревании.



Рис. 1. Схемы полевых и лабораторных экспериментов: прокачка через щелочную загрузку (а); нагревание и получение конденсатов в лабораторных условиях (б)

Пробы щелочных загрузок и конденсаты анализировали методами потенциометрии (pH, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), турбидиметрии (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), ИСП-АЭС и ИСП-МС (катионы и микроэлементы, Аналитический центр Института геологии и минералогии СО РАН, аналитики – И.В. Николаева и С.Ф. Нечепуренко).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода постоянно происходит эманирование ряда химических веществ. Максимальные концентрации в газоаэрозольной смеси имеют основные породообразующие макрокомпоненты: Ca, Na, K, Mg, Fe, B, Si. Из микрокомпонентов преобладают Zn, As, Mn, Sr, Ba, Ni.

В составе щелочных загрузок, отобранных во время полевых экспериментов, определен широкий круг элементов: основные катионы (Ca, Mg, K, Na, Fe), примесные металлы (Mn, Al, Sr, Ba, Zn, Cd, Pb, Li, Mo, Ti), анионогены (As, Sb, V, B). В единичных пробах обнаружены Cr, Co, Ni. Это означает, что при

нагревании поверхности эманации из хвостохранилища содержат широкий круг химических элементов, уходящих с парогазовой фазой.

Для оценки степени эманирования элементов в системе порода/атмосферный воздух были использованы коэффициенты подвижности.

$$K_{\text{подв}} = \text{Log}(C_{\text{ТВ}}/C_{\text{конд}}),$$

где  $C_{\text{ТВ}}$  – содержание элемента в твердом веществе,

$C_{\text{конд}}$  – содержание этого же элемента в конденсате, полученном при лабораторных экспериментах.

Чем выше  $K_{\text{подв}}$ , тем мобильнее элемент в системе порода/атмосферный воздух (рис. 2). Таким образом, элементы разделились на три группы:

- инертные  $0 < k < 1$  Fe, Ti, Al, Si, V, Pb;
- подвижные  $1 < k < 10$  Sb, As, Mn, Cd, K, Cu, Ca, Ba, Sr ;
- весьма подвижные  $10 < k < 100$  Mg, Ni, Cr, Zn, Na, Mo.

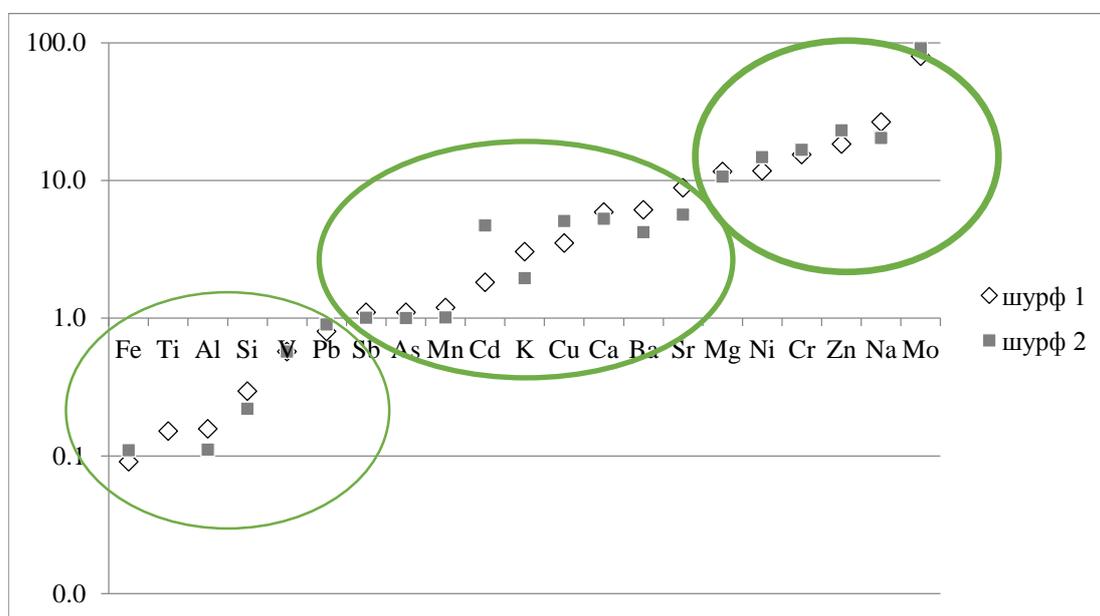


Рис. 2. Коэффициенты подвижности химических элементов в системе порода/воздух

Составы конденсатов парогазовой смеси, собранные в полевых условиях, являются практически идентичными составам конденсатов, полученных в лаборатории при нагревании отвального вещества (рис. 3). Практически все элементы имеют одинаковый порядок концентрации, исключения составляют Na, Al, Sb, содержания которых в конденсатах из лаборатории были на порядок больше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода постоянно происходит эманирование ряда химических веществ. Особенно высоки концентрации Ca, Na, K, Mg, Fe, B, Si, Zn, As, Mn, Sr, Ba, Ni.

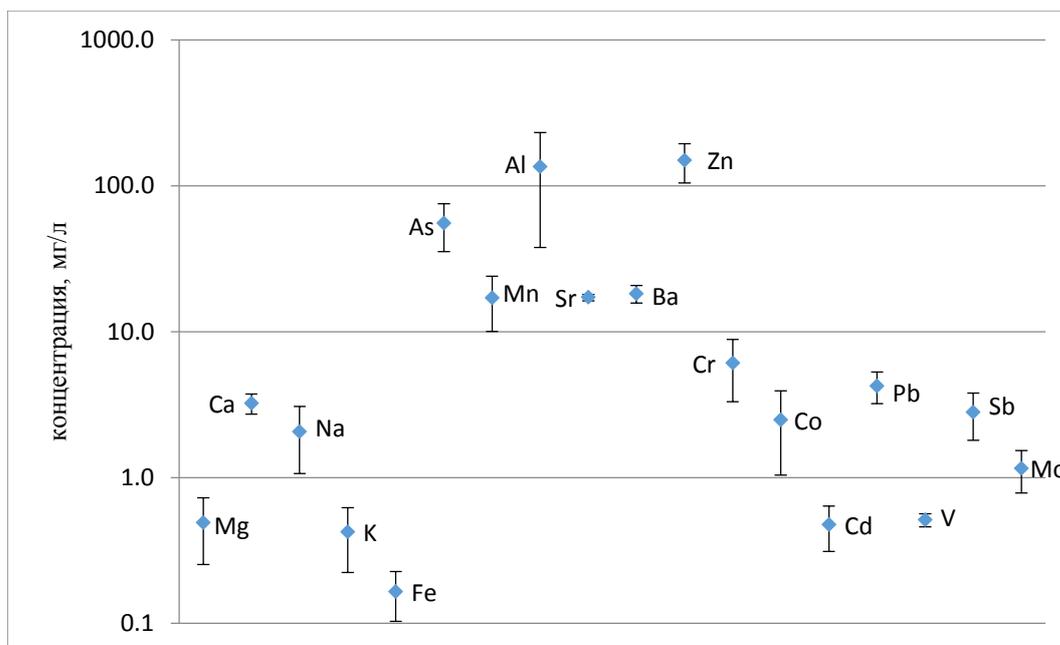


Рис. 3. Сравнение составов конденсатов, отобранных в поле, с конденсатами, отобранными в лаборатории. На графике отображено среднее значение и стандартное отклонение

Полученные ряды подвижности прекрасно согласуются с общими представлениями о миграционной способности химических элементов. В изучаемой нами системе так же, как и в системе вода-порода, с газоаэрозольными потоками слабо выносятся основные породообразующие элементы: Fe, Ti, Al, Si, поскольку находятся в плохорастворимой форме. Наиболее подвижные компоненты системы – сидерофильные элементы (Ni, Cr, Mo) и ряд щелочных металлов (Mg, Zn, Na).

Составы конденсатов парогазовой смеси, собранные в полевых условиях, являются практически идентичными составам конденсатов, полученных в лаборатории при нагревании отвального вещества.

В парогазовых конденсатах отвалов КЗЗ и полученных при экспериментальном нагревании отвального вещества содержится большое количество макро- и микроэлементов, которые переносятся в основном в виде своих соединений (оксидов, сульфидов, хлоридов).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals // Nature. - 1988. - Vol. 333. - P. 134-139.
2. Бекман И.Н. Эманирование твёрдых тел: учеб. пособие. - М.: Издательство МГУ, 1971. - 58 с.
3. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Влияние влажности на эманирование песчано-глинистых пород // АНРИ. - 2009. - № 1. - С. 53-57.
4. Алехин Ю.В., Лапицкий С.А., Мухамадиярова Р.В., Самсонов А.Е. Экспериментальные и аналитические методы исследования процессов межрезервуарного микроэлементного обмена // Вестник Отделения наук о Земле РАН: электрон. науч.-информ. журн. - 2008. - № 1(26). - URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2008/informbul-1\\_2008/elaborate-1.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/elaborate-1.pdf) (дата обращения: 18.02.2016).

© А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова, 2016

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПОРИСТОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ ФОРМАЦИИ. РАДИАЛЬНЫЕ СКВАЖИННЫЕ ВОЛНЫ**

*Виталий Николаевич Доровский*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, технический советник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

*Юрий Вадимович Перепечко*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Yury.Perepechko@BakerHughes.com

Предлагается скважинный метод измерения пористости формации. Акустические колебания возбуждаются в скважине. Максимальное значение спектрального давления на резонансной частоте зависит от пористости. Коэффициент затухания давления также зависит от пористости. Имея две функциональные зависимости от пористости и проницаемости, полученные теоретически, и измеряя максимальное значение давления и коэффициент затухания, математически из системы двух уравнений определяется проницаемость и пористость.

**Ключевые слова:** скважинное измерение, пористость, проницаемость, радиальные волны, резонанс, формация.

## **MEASUREMENT OF POROSITY AND PERMEABILITY. RADIAL BOREHOLE WAVES**

*Vitaly N. Dorovsky*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Doctor of Sciences, Technical Advisor, tel. (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

*Yury V. Perepechko*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: Yury.Perepechko@BakerHughes.com

The paper proposes a method for measuring formation porosity. Acoustic waves are generated in a borehole. The maximal value of the spectral pressure at the first resonant frequency depends on the porosity and permeability of the formation, as well as the attenuation parameter. Having two computed functional dependences together with measured maximal value of pressure and attenuation factor, we can find formation porosity and permeability from a system of two equations.

**Key words:** borehole measurement, porosity, permeability, radial waves, resonance, formation.

It will not be exaggeration to say that the variety of modern logging methods used for simultaneous porosity and permeability measuring of a formation beyond a borehole has been rather limited. This paper outlines the physical foundations of a

fairly simple and effective resonance method for measuring porosity and permeability in a saturated porous medium beyond a borehole. In the method, the borehole is considered to contain a cylindrical source placed along its axis. The source generates acoustic signals at a resonant frequency of borehole's radial eigenwaves and a frequency close to the resonant one. The parameters of the physical model: borehole fluid density is  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , sound velocity in borehole fluid is  $1.45 \text{ km/s}$ , porosity is  $0.05\text{-}0.40$ , solid matrix density is  $2.57 \text{ g/cm}^3$ , saturating fluid density is  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , first compressional sound velocity in formation is  $2.2 \text{ km/s}$ , second compressional sound velocity of sound in formation is  $0.9 \text{ km/s}$ , shear sound velocity in formation is  $1.6 \text{ km/s}$ , saturating fluid viscosity is  $0.0105 \text{ P}$ , formation permeability is  $0.02\text{-}0.22 \text{ D}$ .

In the method proposed, a source with an arbitrary shape of the pulse may be used. The main requirement to the source is that pulse duration should ensure the maximum of its spectrum to be close to the resonant frequency of the borehole. In the system under consideration (source radius  $1 \text{ cm}$ , borehole radius  $10.46 \text{ cm}$ ), the resonant frequency is about  $2 \text{ kHz}$ , which is close to the maximum of the pulse spectrum. In the case of attenuating radial waves (after the source stops operating at the resonant frequency) the characteristic pressure change in time follows the pattern presented in Fig.1.

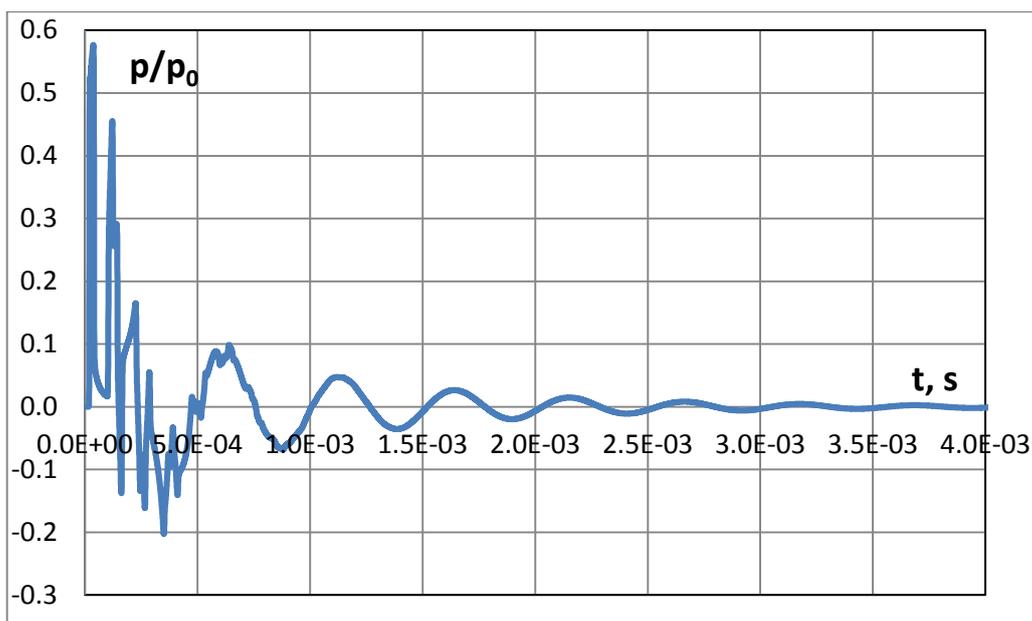


Fig. 1. Borehole waves attenuation in time, after a harmonic source stops operating at the first resonant frequency

In Fig. 2, you can see the spectrum of borehole eigenwaves. The blue curve corresponds to the spectrum of the signal obtained via 2D modeling and the red curve corresponds to the spectrum of the borehole eigenwaves computed analytically. The first resonant peak is similar in the both cases.

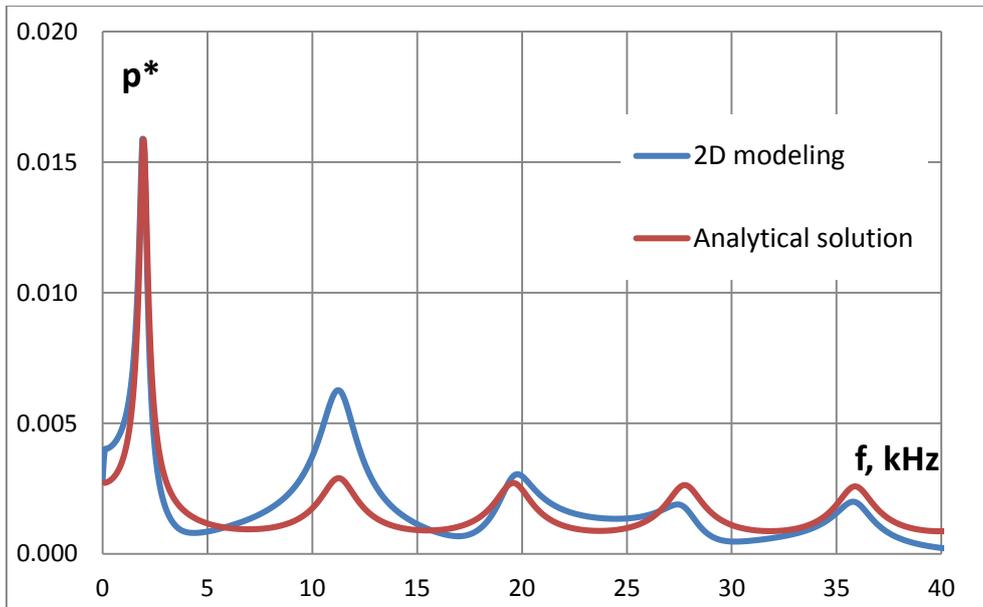


Fig. 2. The spectral composition of the eigenwaves of a borehole surrounded by a saturated formation

As the next step, the way the pressure behaves at the lower resonant frequency is analyzed. The pressure value at the first maximum (pressure at the frequency of the first resonant peak) is determined by the formation permeability  $k$  and the porosity  $\phi$  :  $p_{\max} = \psi(k, \phi)$ . The graph of this dependence as a function of porosity is presented in Fig. 3.

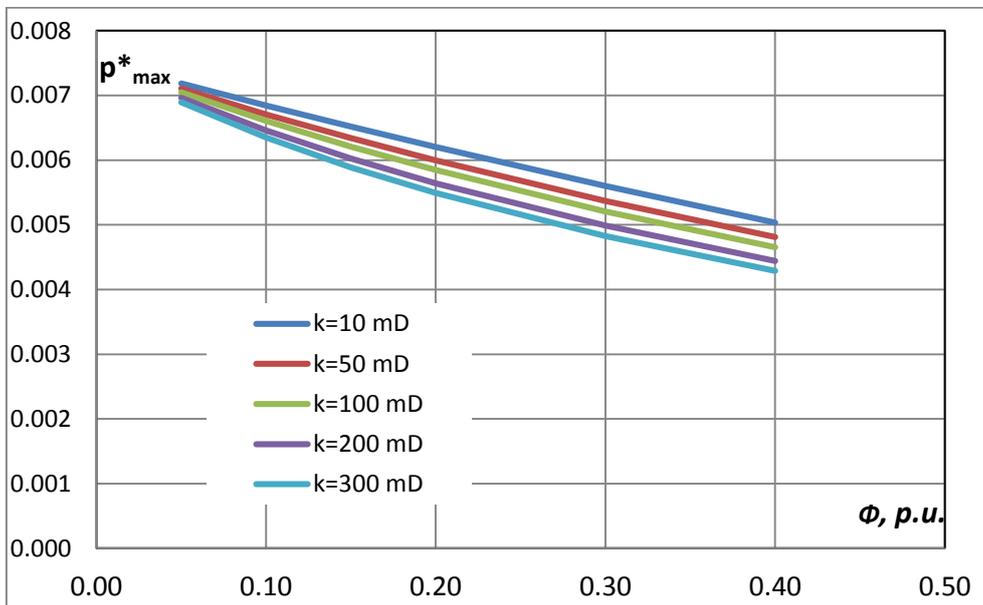


Fig. 3. The spectral pressure at the first resonant frequency as a function of porosity at different values of permeability

The pressure attenuation in time at the resonant frequency is plotted in Fig. 4, where the blue curve denotes the signal; the red curve is the signal filtered by the

Butterworth high pass filter of 7<sup>th</sup> order (at 5 kHz cutoff frequency); and the green curve denotes the exponential envelope of the filtered signal.

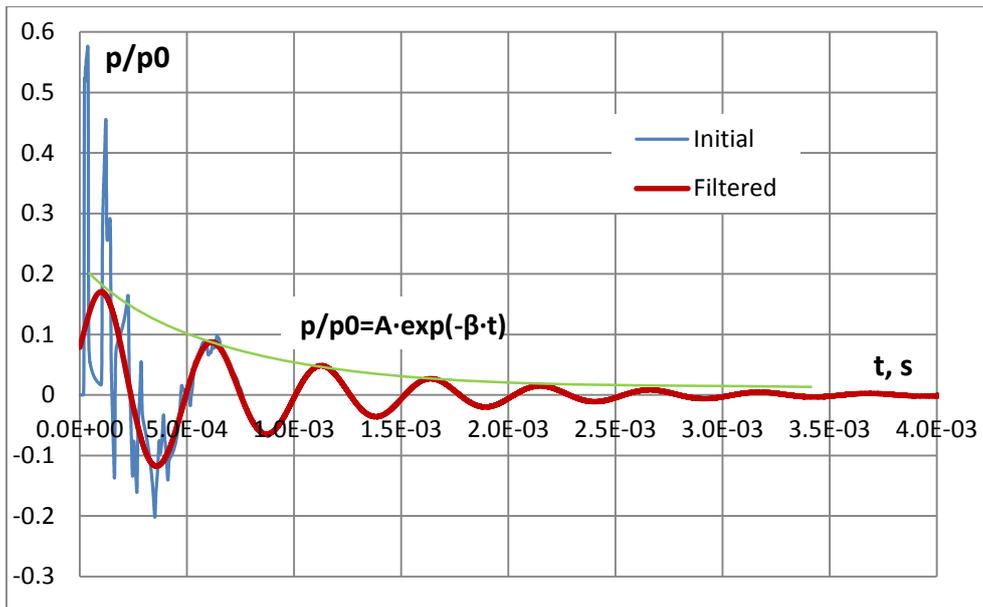


Fig. 4. Borehole waves attenuation in time, after a harmonic source stops operating. The envelope of maximal pressure values

The attenuation factor of the pressure waves (the envelope of the maximal values of pressure) is determined by permeability  $k$  and porosity  $\phi$ :  $\beta = \varphi(k, \phi)$ . The graph of this dependence is presented in Fig. 5.

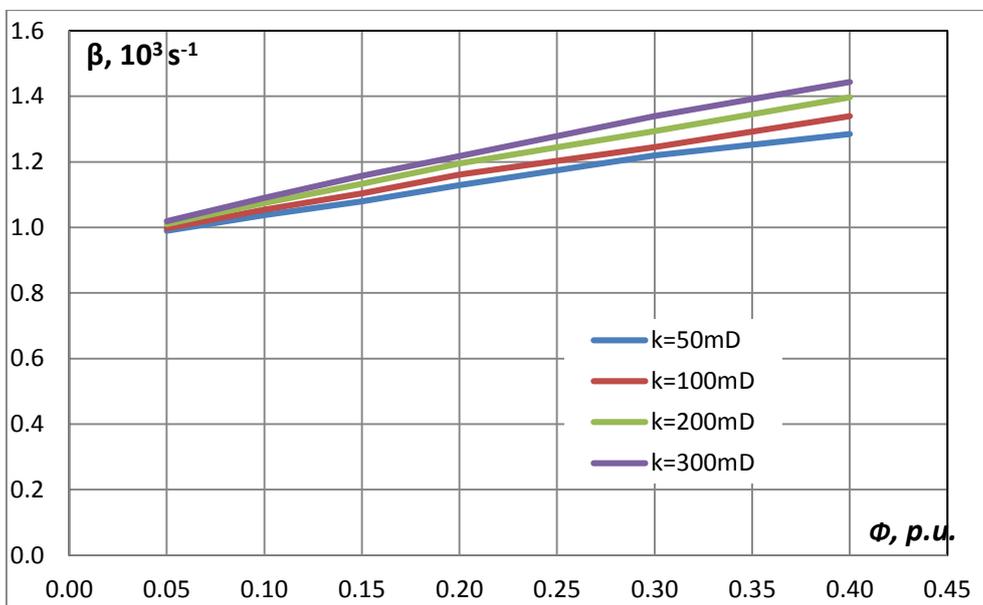


Fig. 5. The attenuation factor as a function of porosity at different values of permeability

The expressions  $\beta = \varphi(k, \phi)$  and  $p_{\max} = \psi(k, \phi)$  at given sound velocities in the fluid and the formation constitute a set of equations for finding permeability and porosity.

Measuring  $p_{\max}$ ,  $\beta$  and solving the system of two equations  $\varphi(k, \phi) = \beta$ ,  $\psi(k, \phi) = p_{\max}$ , one finds  $k$  and  $\phi$ . To perform the procedure described above, one needs to know or find independently such parameters as the sound velocity and the physical medium densities. Unlike the first compressional and shear sound velocities, the second compressional sound velocity in a saturated formation usually is not measured using borehole logging and remains unknown. In order to establish this value in the method proposed, you can select the characteristic velocity of the second compressional mode for the porous medium under consideration, because the changes in the second compressional velocity  $c_{p2}$  do not affect, within the error bars, the measured values of porosity and permeability. The functions  $\varphi(k, \phi)$ ,  $\psi(k, \phi)$  are determined theoretically for a two-velocity physical model [1].

The present article describes the principles of a new borehole method for finding formation porosity and permeability based on measuring and analyzing parameters of the radial waves in the borehole at frequencies close to the resonance of borehole eigenwaves. The maximum value of pressure and its attenuation factor at the boundary between the borehole and the porous formation beyond the borehole wall depend on formation porosity and permeability, so these two parameters can be found mathematically. Variations of the second compressional velocity of sound in the porous formation beyond the borehole bring corrections to the porosity value found that remain within the measurement error bars.

#### REFERENCES

1. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modelling in the theory of: Multivelocity Continuum. - New York: Nova Science Publishers Inc., 1995. - 183 p.

© В. Н. Доровский, Ю. В. Перепечко, 2016

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦОВ**

*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

*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, зав. лабораторией, тел. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@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

Представлена автоматизированная система сбора данных о состоянии образца в процессе наработки газогидрата. Описана аппаратная и программная реализация проекта, перечислены используемые алгоритмы управления и контроля.

**Ключевые слова:** автоматизация измерений, лабораторный эксперимент, газогидраты, акустические свойства.

## **AUTOMATIZATION OF LABORATORY EXPERIMENTS ON THE EXAMPLE OF MEASUREMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES OF HYDRATE SAMPLES**

*Arkadii N. Drobchik*

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

*Anton A. Duchkov*

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

*Nikita A. Golikov*

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

The automated system of the state of the sample data collection during the operating time of gas hydrate is presented. This article reviews the hardware and software implementation of the project. The used control and monitoring algorithms are presented in the article.

**Key words:** automation of measurements, laboratory experiments, gas hydrates, acoustic properties.

Результаты исследований 1980-х годов, связанные с обнаружением газогидратов в природных условиях, и последующая оценка запасов метана в газогидратах привели к тому, что газовые гидраты стали рассматриваться как относительно новый и обширный источник метана. Несмотря на сложность по добыче самих газогидратов вследствие их твердой формы, уже сейчас существуют методы по добыче газа из газогидрата путем создания зоны разложения газогидрата вследствие нарушения условий его стабильности. А в 2013 г. Япония впервые в мире провела успешную экспериментальную добычу метана из газогидратов на море. Наиболее распространенным методом обнаружения гидратных месторождений является стандартная и высокочастотная сейсмическая разведка. Именно поэтому так важно изучение акустических свойств неконсолидированных образцов, содержащих гидраты. Газогидраты обладают стабильным состоянием при низкой температуре и высоком давлении, при нормальных условиях газогидрат разлагается. Изучение газогидратов производится в лабораторных условиях в зоне стабильности гидратов, что требует создания установок для формирования гидрата в пористых образцах и измерения акустических свойств. Процесс образования газогидратов достаточно длительный и даже при использовании методик, призванных ускорить процесс синтеза газогидрата (циклическая заморозка с последующей разморозкой, интенсивное перемешивание при поддержании постоянного давления газа-гидратообразователя, барботирование и пр.), процесс может занимать от 1 до 4 суток.

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис. 1. Ее основным блоком является цилиндрическая стальная камера высокого давления (рабочий диапазон 1-40 МПа), вмещающая образцы (4) диаметром 30 мм и высотой 10-70 мм. Насосная станция позволяет независимо создавать осевое давление через верхний (1) и нижний (5) пуансоны и боковое давление через резиновую манжету (2). При формировании газовых гидратов жидкость и газ подаются в образец через специальные каналы в пуансонах, создавая необходимое поровое давление. Температура задается системой термостатирования (термостат и рубашка охлаждения (3)). Более подробно установка описана в [1].

Каждый пуансон (верхний и нижний) снабжен двумя пьезокерамическими шайбами разной поляризации, которые могут быть использованы для генерации или приема продольных ( $P$ ) и поперечных ( $S$ ) волн соответственно. Для генерации волн они должны быть подключены к генератору высоковольтных импульсов, для регистрации волн – к осциллографу. Поочередное подключение генератора и осциллографа для работы на  $P$ - или  $S$ -волнах осуществляется с помощью коммутатора, собранного на основе 2-х двухпозиционных реле, блока питания и платы Seeeduino 3.0.

Длительный эксперимент с постоянным мониторингом за состоянием образца требует автоматизации системы сбора данных о состоянии системы и контроля за состоянием образца. Автоматизация насосной установки не требуется, так как после создания осевого и бокового давления оно

поддерживается пневмоаккумуляторами (компенсация температурного расширения масла).

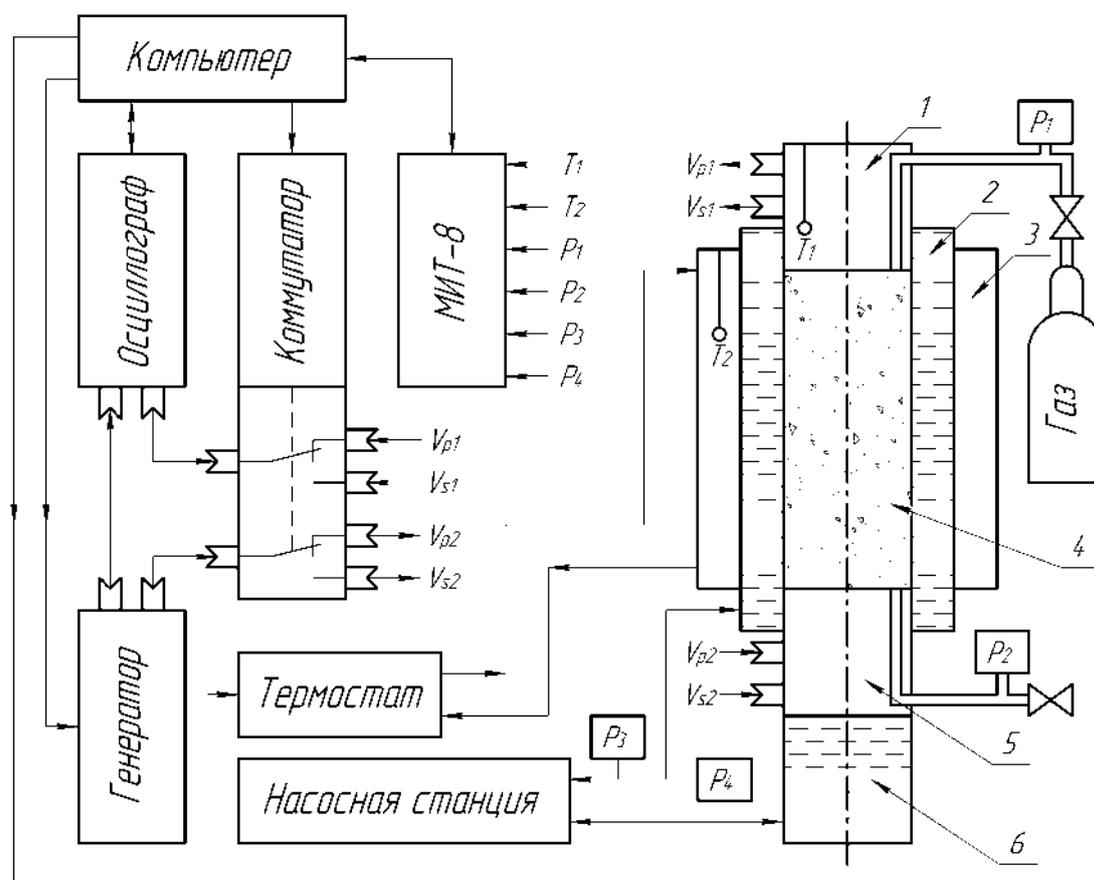


Рис. 1. Функциональная схема установки: 1 – верхний пуансон; 2 – камера для создания бокового давления; 3 – рубашка охлаждения; 4 – образец; 5 – нижний пуансон; 6 – камера для создания осевого давления;  $V_{p1}$ ,  $V_{s1}$  – коаксиальные соединения для регистрирующего пуансона (верхнего);  $V_{p2}$ ,  $V_{s2}$  – коаксиальные соединения для генерирующего пуансона (нижнего);  $T_1$ ,  $T_2$  – хромель-алюмелевые термодары;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  – преобразователи давления

Основные задачи системы автоматизации:

- управление пуском установки на основе заданных параметров эксперимента (продолжительность, программа термостата, периодичность измерения акустических параметров);
- управление и регулирование параметров в ходе эксперимента;
- циклические измерения и запись данных:
  - двух каналов температуры (рис.1,  $T_1$ ,  $T_2$ );
  - четырех каналов давления (поровое давление на двух пуансонах (рис. 1,  $P_1$ ,  $P_2$ ), боковое и осевое давление (рис.1,  $P_3$ ,  $P_4$ );
  - линейного размера образца;
  - акустических данных  $P$ - и  $S$ -волн;

- обработка и визуализация данных в реальном времени для оперативного контроля;
- обеспечение высокой повторяемости эксперимента.

В качестве среды разработки был выбран пакет LabVIEW от National Instruments. Данная среда разработки была выбрана в связи с наличием большого количества библиотек для различных приборов, а также высокой эффективностью и скоростью разработки программного обеспечения.

Используемое оборудование с используемыми интерфейсами описано в таблице. Работа с RS-232 организована при помощи библиотеки от National Instruments – VISA. Осциллограф управляется с помощью библиотеки PicoSDK 10.6.10 для LabVIEW от производителя Pico Technology.

*Таблица*

Оборудование, используемое в эксперименте

Прибор	Интерфейс
Термостат Huber CC-415 с	RS-232
Многоканальный измеритель температуры МИТ-8.03	RS-232
Генератор высоковольтных импульсов АК ИП 3305	USB
Осциллограф АК ИП 72208А	RS-232
Коммутатор (самодельный)	RS-232

Программа поделена на логические части: контроль температуры на основе показаний термопар Т1 и Т2; коммутация и измерение  $P$ - и  $S$ - волн; обработка данных, визуализация и сохранение. Кроме того, разные приборы имеют различную частоту опроса. Так, особенностью многоканального измерителя температуры МИТ-8 является то, что прибор не может выдать информацию

о том или ином канале по запросу с ПК. Поэтому приходится опрашивать буфер данных прибора с максимальной скоростью, отличной от частоты измерения  $P$ - и  $S$ - волн. Это, в свою очередь, накладывает требования к программной реализации, в данном случае использование распараллеливания циклов обращения к приборам.

Обработка в реальном времени сводится к расчету скоростей  $P$ - и  $S$ -волн, модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Скорости  $P$ - и  $S$ -волн рассчитываются по ГОСТу 21153.7-75, см. [2]. В рамках автоматизированной обработки времена прихода волн, используемые для расчета скоростей, определяются как время первого экстремума сигнала в данных. Данные по линейному размеру образца используются для расчета плотности и модуля Юнга (плотность может меняться в зависимости от осевого и бокового давлений).

В качестве испытания системы на стабильность работы был произведен эксперимент длительностью в 21 час на образце из оргстекла длиной 40 мм. В результате эксперимента было произведено 1260 измерений скоростей и 12600 полных циклов опроса МИТ-8 (один цикл – Т1, Т2, Р1, Р2, Р3, Р4).

Испытания подтвердили работоспособность системы мониторинга в течение длительного времени.

На рис. 2 представлены графики изменения скоростей продольных и поперечных волн в ходе 40-часового эксперимента по наработке газогидрата метана в кварцевом песке.

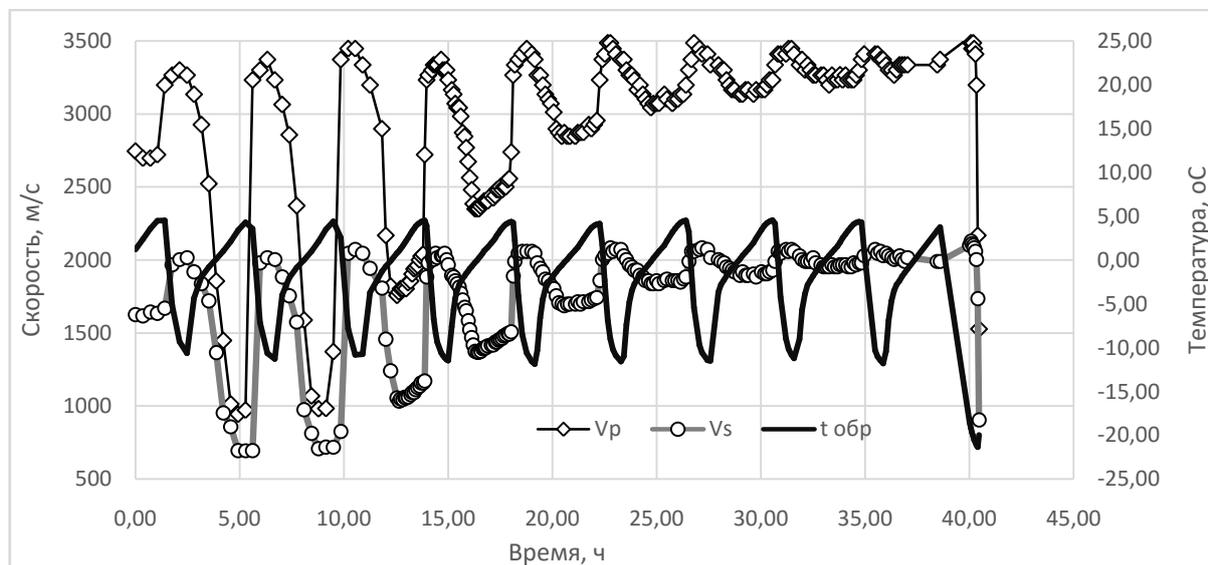


Рис. 2. Результаты измерений скоростей  $P$ -волн (квадратный маркер),  $S$ -волн (круглый маркер) и температуры (без маркера) в процессе длительного эксперимента по формированию гидрата метана в песчаном образце

Установка активно используется для получения данных в экспериментах по изучению газогидратов, а также свойств криогелей. В дальнейшем планируется добавить управление термостатом и отправку промежуточных отчетов по e-mail.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00511) в ИНГГ СО РАН и ИНХ СО РАН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дучков А.Д., Голиков Н.А., Дучков А.А. и др. Аппаратура для изучения акустических свойств гидратосодержащих пород в лабораторных условиях // Сейсмические приборы. - 2015. - Т. 51. - № 2. - С. 44-55
2. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей упругих продольных и поперечных волн. - М.: Изд-во стандартов, 1975.

© А. Н. Дробчик, А. А. Дучков, Н. А. Голиков 2016

## **ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРАТЫ МЕТАНА**

### ***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, зав. лабораторией, тел. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@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, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@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

### ***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

### ***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. зав. лабораторией, тел. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

Приводятся результаты лабораторных измерений акустических свойств неконсолидированных образцов, содержащих гидраты метана. Проведена серия экспериментов для образцов с разным начальным содержанием воды, которая затем переходит в гидратную форму. Показана регрессионная зависимость между массой гидрата и скоростями  $P$ - и  $S$ -волн.

**Ключевые слова:** гидраты метана, акустические свойства пород, лабораторные измерения.

## **LABORATORY STUDIES OF ACOUSTIC PROPERTIES OF UNCONSOLIDATED SAMPLES CONTAINING METHANE GAS HYDRATE**

### ***Anton A. Duchkov***

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

### ***Albert D. Duchkov***

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

***Arkadii N. Drobchik***

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

***Nikita A. Golikov***

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

***Mikhail E. Permyakov***

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

We present the results of laboratory measurements of acoustic properties of unconsolidated samples containing methane hydrate. A series of experiments was carried out for samples with different initial water content, which is further converted into the hydrate. We show regression relation between the hydrate mass and P- and S-wave velocities.

**Key words:** methane hydrates, acoustic properties of rocks, laboratory experiments.

Большинство скоплений (месторождений) природных газовых гидратов найдено в неконсолидированных донных осадках морей и океанов, где эти скопления обычно связаны с активными подводными газо-флюидными источниками, которые располагаются на глубинах более 300-500 м, включая оз. Байкал (см. [1]). При этом основное внимание обычно уделяется изучению акустических свойств, так как сейсмические методы преимущественно применяются при поисках и разведке скоплений газовых гидратов в морских осадках (см. [2]).

Изучение физических свойств гидратосодержащих осадков проводится в лабораторных условиях с использованием специальных установок, позволяющих моделировать образцы, содержащие гидраты метана, и проводить соответствующие измерения (например, [3]). В 2014 г. авторами была создана первая в России лабораторная установка для изучения акустических свойств гидратосодержащих осадков [4]. В настоящей статье кратко приведены результаты серии экспериментов, проведенных на этой установке, и их анализ.

При формировании гидратосодержащих образцов нами в основном использовался кварцевый песок с размером частиц 0,1-0,5 мм и метан в качестве гидратообразователя. После загрузки ячейки в камеру смесь замораживается до -15 °С, и производится промывка системы метаном для удаления остатков воздуха. Затем в камере устанавливается рабочее поровое давление (порядка 8-10 МПа); для ускорения гидратообразования образец циклически нагревается и охлаждается в диапазоне от +2 до -18 °С, в результате чего вода претерпевает фазовые переходы (вода-лед), а гидрат остается в зоне стабильности. Эксперимент длится 1-4 суток, в течение него проводились акустические

измерения

и контроль параметров эксперимента (давление и температура).

Установка позволяет измерять скорости продольных и поперечных волн в процессе образования гидрата метана в песчано-водяной смеси (при осевом и боковом давлении в пределах 15-25 МПа, а поровом давлении порядка 10 МПа). Для акустических измерений используются пьезокерамические датчики *P*- и *S*-волн; датчики имеют резонансную частоту 75 МГц (рабочий частотный диапазон – 300-700 КГц). В качестве источника используется импульс длительностью 1 мкс, запись поля производится с частотой дискретизации 250 МГц. Для обеспечения хорошего контакта пуансонов с неконсолидированными осадками к ним прикладывается осевое давление (не менее 10 МПа). Скорости *P*- и *S*-волн рассчитываются по ГОСТ 21153.7-75. С учетом повторяемости экспериментов по формированию гидратсодержащих образцов точность определения скоростей составляет 5-6 %. Рассчитав скорости *P*- и *S*-волн, а также плотность образцов, можно определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга.

Большинство экспериментов длительностью 2-4 суток были ориентированы на изучение акустических свойств песчаных образцов, содержащих разное количество гидрата метана. Обычно эти эксперименты включали до 10 циклов замерзания/оттаивания. Развитая система автоматизации эксперимента позволяет проводить такие длительные эксперименты, осуществляя регулярные измерения и сохранение на диск данных по температуре, давлению и акустическим данным. Потом для данных проводилось автоматическое пикирование времен прихода *P*- и *S*-волн и расчет скоростей.

Результаты измерений скоростей в течение одного из длительных экспериментов показаны на рис. 1. Были проведены 10 циклов изменения температуры (циклов замерзания/оттаивания), ускоряющих формирование гидратов метана. Фазовые переходы «вода-лед» хорошо отслеживаются по изменениям скоростей акустических волн. При замораживании образца скорости растут, при последующем нагревании лед тает и скорости падают. Но с каждым циклом в «оттаявшем» состоянии можно видеть постепенное увеличение скоростей (для *P*- и *S*-волн), что указывает на формирование метангидратов, остающихся стабильными и при положительной температуре.

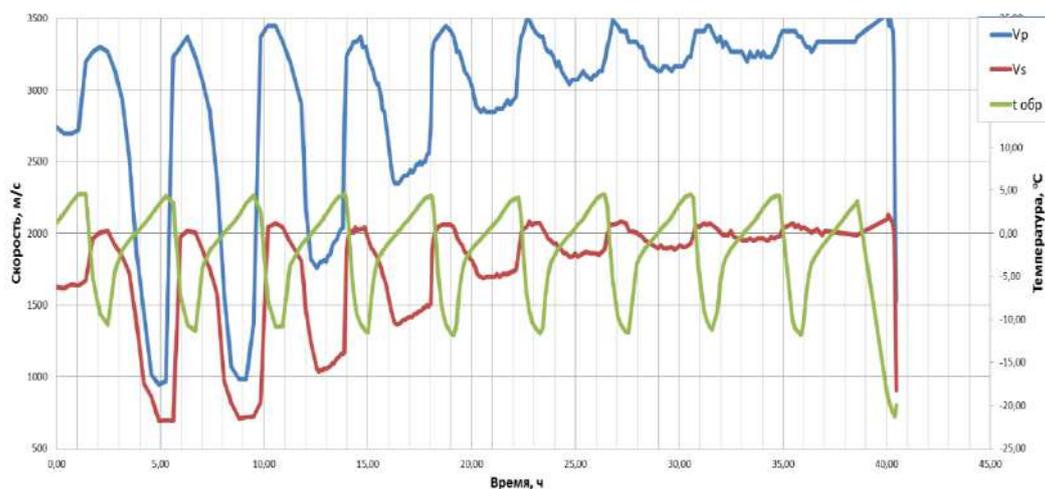


Рис. 1. Результаты измерений скоростей  $P$ -волн (синий график),  $S$ -волн (красный график) и температуры (зеленый график) в процессе длительного эксперимента по формированию гидрата метана в песчаном образце

Из графиков видно, что по мере увеличения количества газогидрата нижний предел изменения скорости на каждом температурном цикле увеличивается от 1000 до 3340 м/с для  $P$ - волн и от 720 до 2020 м/с для  $S$ -волн. В конце эксперимента (35-39 часов) скоростные различия между интервалами с положительной и негативной температурами почти исчезают. Так, к концу эксперимента скорости продольных и поперечных волн оставались высокими, меняясь примерно на 50 м/с при отрицательных и положительных температурах. Стабильная акустическая картина при переходе температуры образца через ноль является индикатором почти полной наработки гидрата (в образце не остается воды, которая может замерзнуть или таять).

Была проведена серия экспериментов по созданию гидратов метана в образцах песка с различным начальным удельным содержанием воды. Примерно рассчитать массу гидрата ( $M_g$ ), наработанного в процессе эксперимента, можно по первоначальному содержанию воды или льда в образце (верхняя оценка) или по измеренному объему газа, выделившегося из образца после завершения эксперимента (нижняя оценка). Значения  $M_g$ , рассчитанные обоими способами, показывают в большинстве случаев их хорошее совпадение.

По результатам каждого эксперимента получают оценки удельного содержания воды в начальном образце, массы образовавшегося гидрата, скоростей продольных и поперечных волн, а также коэффициентов Пуассона и модуля Юнга. По результатам самых надежных экспериментов были построены зависимости скоростей  $P$ - и  $S$ -волн (в образцах с максимальным содержанием гидрата метана) от верхних (по воде) оценок массы гидрата в образцах (рис. 2). Данные свидетельствуют о существовании корреляции между параметрами: чем больше гидрата образуется в образце, тем выше значения скоростей. При построении зависимости на рис. 2 не учитывались данные по скоростям для

образцов со значительным начальным содержанием поровой влаги, так как в таких образцах не происходило полной наработки гидрата за время эксперимента (в конце эксперимента отмечались заметные изменения скоростей при переходе через нулевую температуру).

В качестве заключения отметим, что в статье кратко приведены описание и результаты экспериментов на лабораторной установке по формированию гидратов метана в неконсолидированных осадках и изучению их акустических свойств. Тестирование установки на повторяемость акустических свойств образцов при одинаковой их подготовке показали, что точность измерения скоростей для неконсолидированных песчаных образцов составляет 5-6 % (при сохранении постоянного осевого давления). Акустические записи для различных циклов замерзания/оттаивания показывают хорошую повторяемость волновых форм, указывающую на то, что удалось добиться устойчивого контакта датчика с образцом в течение длительных экспериментов. Это подтверждает пригодность установки для проведения успешных экспериментов по формированию гидратосодержащих образцов и измерению их акустических свойств.

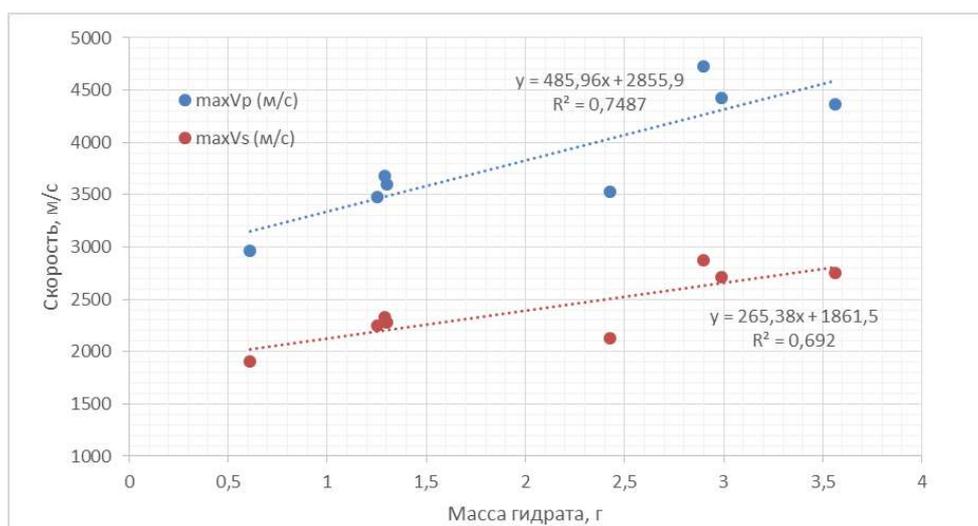


Рис. 2. Сопоставление скоростей  $P$ - и  $S$ -волн с оценками массы гидрата в образцах, полученных по количеству воды в начальном образце

Акустические измерения гидратосодержащих образцов, подготовленных по описанной выше методике, показали увеличение скоростей при формировании метангидратов в порах до значений, характерных для замерзших образцов. Это является косвенным признаком того, что сформировавшиеся газовые гидраты – «цементирующего» типа, т. е. они образуются на контакте зерен, эффективно связывая минеральные зерна друг с другом. Данные свидетельствуют о существовании корреляции между скоростями  $P$ - и  $S$ -волн и массой образовавшегося метангидрата в образце.

Серию этих экспериментов планируется продолжить для выявления более надежных связей между параметрами. В частности, планируется увеличить время эксперимента и опробовать альтернативные способы формирования гидратосодержащего образца для случая высокого уровня начального флюидонасыщения. Подробный анализ полученных результатов и их интерпретация с точки зрения связей между параметрами и механических свойств будут возможны при увеличении массива данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00511) в ИНГГ СО РАН и ИНХ СО РАН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. - СПб: ВНИИОкеангеология, 1994. - 199 с.
2. Riedel M., Willoughby E.C., Chopra S. (Eds.). Geophysical characterization of gas hydrates (SEG Geophysical Developments Series; No. 14). Tulsa: SEG, 2010, 390 p.
3. Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D. et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments // Reviews of Geophysics. - 2009. Vol. 47. RG4003, P. 1-38.
4. Дучков А.Д., Голиков Н.А., Дучков А.А., Манаков А.Ю., Пермяков М.Е., Дробчик А.Н. Аппаратура для изучения акустических свойств гидратосодержащих пород в лабораторных условиях // Сейсмические приборы. - 2015. - Т. 51. - № 2. - С. 44-55.

© А. А. Дучков, А. Д. Дучков, А. Н. Дробчик, Н. А. Голиков, М. Е. Пермяков, 2016

УДК 550.34+551.2

#### **ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАУЛЕ (ЧИЛИ), 27.02.2010 Г., Mw = 8,8**

##### *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; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

##### *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

##### *Юлия Михайловна Романенко*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Выполнен расчет сейсмотектонических деформаций для района землетрясения Мауле, Mw = 8,8, 2010 г. Детально исследованы особенности деформаций, определенных по механизмам очагов землетрясений, на разных глубинах. Близгоризонтальное растяжение вкрест простирания океанического желоба в пределах глубин 0–70 км прослеживается южнее области афтершоков землетрясения Мауле. В области очага землетрясения Мауле и севернее характер поля деформаций (H = 0–70 км) является обычным для зон субдукции:

наблюдается укорочение в направлении погружения океанической плиты. Ниже глубины 70 км характер деформирования резко меняется на горизонтальное растяжение. После главного события очаговая область характеризуется близширотным укорочением и окружена участками с противоположным типом деформаций – близширотным удлинением.

**Ключевые слова:** сейсмотектонические деформации, сильное землетрясение, механизм очага землетрясения, афтершоки, землетрясение Мауле Чили.

## **FEATURES OF SEISMOTECTONIC DEFORMATIONS BY PREPARATION AND REALIZATION OF THE EARTHQUAKE OF MAULE (CHILE), 27.02.2010, $M_w = 8,8$**

*Peter G. Dyadkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Lead Senior; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Associate Professor, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

*Olga A. Kuchay*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)333-37-92, e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru

*Yuliya M. Romanenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Research Scientist, tel. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Seismotectonic deformations for the region of Maule earthquake,  $M = 8,8$ , 2010, were calculated. Features of the deformations determined from earthquake focal mechanisms at different depths are investigated in details. Near-horizontal lengthening across the extending of an oceanic trench within depths of 0 – 70 km is traced to the south of aftershock area. Within the epicentral area of Maule earthquake and to the north of it character of deformations at depths up to 70 km is usual for subduction zones: shortening in the direction of oceanic plate dipping is observed. Lower than depth of 70 km type of deformation sharply changes on horizontal strain. After the main event, the focal area is characterized by near-latitudinal shortening and is surrounded locations with opposite type of deformation – near-latitudinal lengthening.

**Key words:** seismotectonic deformations, strong earthquake, earthquake focal mechanism, aftershocks, Maule earthquake, Chile.

Одно из сильнейших землетрясений последнего времени зарегистрировано 27 февраля 2010 г. ( $M_w=8.8$ ,  $\varphi = 36.122^\circ$ ,  $\lambda = 72.898^\circ$ ,  $H=23$  км) в регионе Мауле (Чили) на контакте тектонических плит Наска и Северо-Американской. Это третье по интенсивности событие из произошедших во время последней глобальной активизации после Суматра-Андаманского, 2004 г.,  $M_w=9.2$ , и Тохоку, 2011 г.,  $M_w=9.0$ . В данной работе анализируются сейсмотектонические деформации (СТД), полученные по параметрам механизмов очагов землетрясений с  $M>4.8$  [5] в районе с координатами  $\varphi = 17^\circ-46^\circ$  ю.ш.,  $\lambda = 66^\circ-76^\circ$  з.д. за 1976-2014 гг. для разных интервалов глубин: 0-35 км, 36-70 км, 71-150 км, 150-

300 км – и поведение сеймотектонических деформаций за отдельные отрезки времени: 1976-1985 гг.; 1985-2009 гг. и 2010-2014 гг.

Как известно, Анды на западном побережье Южной Америки сформировались при встречном движении океанической плиты Наска, движущейся в В-СВ направлении со скоростью 8 см/год, и Южно-Американской плиты, движущейся на З-СЗ со скоростью 1см/год [9]. Основная сейсмичность сосредоточена в коре и подкоровом слое до 300 км [3]. Небольшая часть землетрясений происходит на глубинах до 600-700 км. Протяженность очага Мауле по горизонтали оценивается в 500 км. Северное и южное окончания области афтершоков приурочены к таким тектоническим структурным элементам, как хребет Хуан Фернандес на севере и разломная зона Моча на юге. Можно говорить о тектоническом сегменте земной коры, расположенном между 33-ей и 39-ой параллелями ю.ш., где начиная с 1835 г. не было событий с магнитудой более 8 и где, по данным GPS, наблюдался дефицит смещений в поддвиге океанической коры под континентальную [12]. Эта так называемая брешь Дарвина, по оценкам [8], была полностью закрыта землетрясением Мауле в 2010 г. Афтершоковая область землетрясения Мауле на юге заканчивается на параллели 38.5° ю.ш., перед областью наибольших дислокационных смещений Чилийского землетрясения 1960 г.,  $M_w=9.5$  [10]. Основной структурной неоднородностью исследуемого сегмента зоны субдукции, возможно объясняющей длительное накопление упругих деформаций в районе сейсмической бреши Дарвина, является обнаруженное на глубине ~ 25 км высокоскоростное поднятие рельефа субдуктирующей океанической плиты. Пространственное положение этой структуры, выявленной на основе сейсмотомографических исследований [6], совпадает с интенсивной положительной гравитационной аномалией Буге [13]. Это поднятие могло являться основным «зацепом» между континентальной и погружающейся океанической плитами. Именно вблизи него произошло начало вспарывания разрыва землетрясения Мауле.

Для расчета сеймотектонического деформирования объемов горных масс использовалась методика [2]. Расчеты компонент деформаций для ячеек размером 0.5° x 0.5° градусов проводились методом скользящего окна с шагом 0.25°. Исследовались поля вертикальных, меридиональных и широтных компонент сеймотектонических деформаций, рассчитанных в географической системе координат. При построении карт для нас были важными не сами величины деформаций, а их знак, т. е. относительные удлинения и укорочения объемов горных масс. В данной работе было принято, что положительные значения деформаций соответствуют относительному удлинению, отрицательные – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов земной коры в соответствующих направлениях. Анализ полученных результатов свидетельствует, что объемы земной коры в юго-западной части побережья Южной Америки сокращаются в широтном направлении и удлиняются в вертикальном.

В меридиональном направлении горные массы испытывают чередование областей удлинения и укорочения. По краям вытянутой зоны фиксируются районы

с противоположными значениями деформаций по отношению к центральной области. На глубинах более 65-70 км происходит резкая смена характера деформаций: вертикальное удлинение меняется на вертикальное укорочение, а широтное укорочение – на широтное удлинение. Для исследуемой области обнаруживается совпадение в деформировании приповерхностных (данные GPS) [7] и глубинных объемов земной коры (слой  $H=0-35$ км).

Южная граница афтершоковой области приурочена к участку смены типа деформирования объемов земной коры (39-я параллель ю.ш.) (рис.). Северная граница афтершоковой области проходит южнее 33 параллели [11]. Построенные нами по разные стороны от 33 параллели сечения с гипоцентрами землетрясений с  $M \geq 4$  вдоль широты  $31.6^\circ$  ю.ш. и широты  $34.8^\circ$  ю.ш. показывают существенные различия пространственного простирания подкоровых очагов, что может объясняться различным глубинным строением среды [4]. На концах северного и южного окончаний области дислокации землетрясения Мауле произошли афтершоки со сбросовым типом подвижек. В южной части возник сильный афтершок (27 февраля 2010,  $M_w=7.4$ ) с механизмом сбросового типа, в северной части в относительно узкой полосе (от  $\sim 34.3^\circ$  до  $34.6^\circ$  ю.ш.) наблюдались сеймотектонические деформации растяжения (рис.), где 11.03.2010 г. имели место 3 сильных афтершока с  $M_w = 6-6.9$  со сбросовым механизмом очага. Известно, что вблизи окончаний области деструкции среды, в условиях близгоризонтального сжатия могут наблюдаться участки с другим типом деформирования – близгоризонтальным растяжением [1], хотя в этом случае тип деформирования иной, обусловленный процессом субдукции.

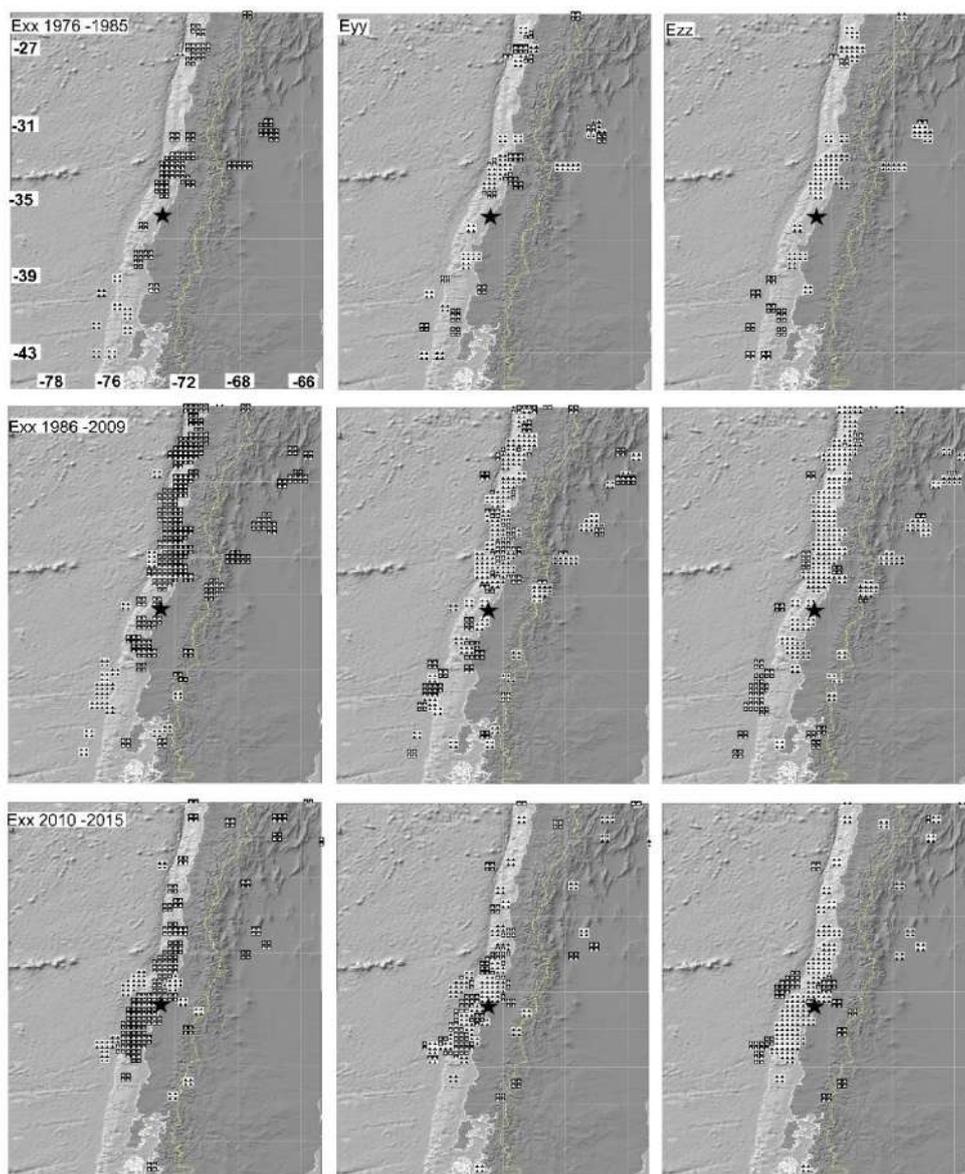


Рис. Поле широтной ( $E_{xx}$  – левый столбец), меридиональной ( $E_{yy}$  – центральный столбец) и вертикальной ( $E_{zz}$  – правый столбец) компонент сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений, зарегистрированных в диапазоне глубин  $H=0-35$  км. Верхний и средний ряды рисунков – за периоды 1976-1985 гг. и 1986-2009 гг. (до землетрясения Мауле). Нижний ряд – за период 2010-2014 гг. (после землетрясения). Темными квадратами показаны области укорочения, светлыми – удлинения в соответствующих направлениях.

Характер СТД до и после землетрясения Мауле за отрезки времени 1976-1985 гг., 1985-2009 гг. и 2010-2014 гг. в целом сохраняется (рис.). После главного события, несмотря на преобладание характера деформирования с близширотным укорочением, очаговая область оказалась окруженной отдельными участками с противоположным типом деформаций – близширотным удлинением (рис.). Таким образом, землетрясение Мауле в зоне



## **ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ КОЛЛЕКТОРА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 КГЦ ДО 1 ГГЦ**

*Тимофей Игоревич Ельцов*

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 скважинной геофизики, тел. (952)903-89-90, e-mail: YeltsovTI@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 лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Разработан стенд для измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов горной породы в диапазоне частот от 1 кГц до 1 ГГц с использованием трех различных методик. Измерения на частотах 1 кГц – 5 МГц и 5 МГц – 50 МГц производятся в конденсаторной ячейке с помощью измерителя типа LCR и векторного анализатора соответственно. Методика измерения в диапазоне частот от 20 МГц до 1 ГГц основана на измерении коэффициента отражения от открытого конца волновода. Предлагаемая установка позволяет измерять электрофизические параметры образцов горной породы в широком диапазоне частот.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, лабораторные измерения, пористая среда.

## **COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY MEASUREMENTS OF RESERVOIR CORE SAMPLES USING FREQUENCY RANGE FROM 1 KHZ TO 1 GHZ**

*Timofey I. Eltsov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (952)903-89-90, e-mail: YeltsovTI@ipgg.sbras.ru

*Nikita A. Golikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher of the Laboratory of borehole geophysics, tel. (383)363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Assembled stand for measuring complex dielectric permittivity of rock samples in the range from 1 kHz to 1 GHz using three different methods. The measurements at frequencies of 1 kHz – 5 MHz and 5 MHz – 50 MHz are produced in capacitor cell using LCR meter and vector analyzer, respectively. The measurement method in the frequency range 20 MHz – 1 GHz based on the measurement of reflectance coefficient from the open end of the waveguide. The proposed installation allows one to accurately measure the electrophysical parameters of the rock samples over a wide frequency range.

**Key words:** dielectric permittivity, laboratory measurements, porous media.

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) в диапазоне частот 1 кГц – 5 МГц производилось в конденсаторной ячейке измерителем LCR GWInstek. Методика измерений является модификацией классической методики измерения диэлектрической проницаемости (ДП) в плоском конденсаторе [1]. Длина исследуемых образцов составляла 25 и 30 мм, а диаметр – 30 мм. Диаметр электродов (90 мм) ячейки выбирался из условия однородности электрического поля в центральной части конденсатора, где помещается исследуемый образец [2].

Для компенсации влияния соединительных проводов и паразитных емкостей на результат измерения происходят в два этапа. Сначала производятся измерения емкости конденсатора с фторопластовым кольцом без образца, затем в кольцо помещается образец, измерения производятся повторно. Фторопластовое кольцо с внутренним диаметром 30 мм предназначено для предотвращения высыхания образцов в процессе измерений, и одновременно оно обеспечивает сохранение геометрических размеров конденсатора при калибровочных измерениях. На рис. 1 представлено схематическое изображение ячейки, на рис. 2 – фотография измерительной системы и ячейки.

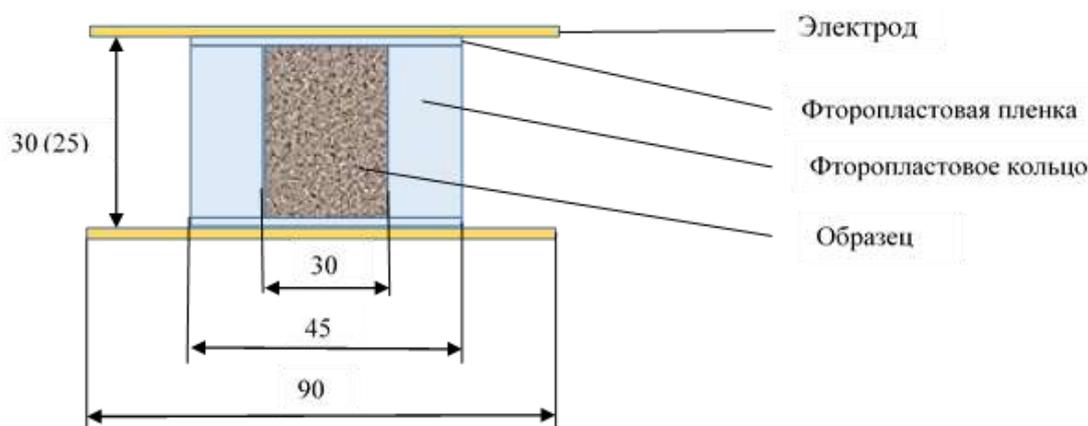


Рис. 1. Схематическое изображение ячейки

Вычисление КДП из измеряемых величин происходит следующим образом. Комплексная проводимость измерительной ячейки  $Y = 1/Z$ :

$$Y_{я} = \operatorname{Re} Y_{я} + i \operatorname{Im} Y_{я},$$

где  $\operatorname{Re} Y_{я} = \sigma C_{я} / \varepsilon_0$ ,  $\operatorname{Im} Y_{я} = \omega * C_{я}$ ,  $\sigma$  – проводимость,  $\omega$  – круговая частота. Общая емкость конденсаторной ячейки с образцом ( $C_x$ ) состоит из набора емкостей, соединенных параллельно:

$$C_x = \varepsilon_x C_0 + \varepsilon_{\phi} C_{\phi,к} + \varepsilon_{\delta} C_{\delta,к} + C_n,$$

где  $C_x$  – емкость ячейки с образцом,  $C_0$  – емкость части конденсатора, занятой образцом,  $\epsilon_x$  – диэлектрическая проницаемость образца,  $\epsilon_\phi$  – диэлектрическая проницаемость фторопласта,  $C_{\phi.к}$  – емкость фторопластового кольца,  $C_{вк}$  – емкость воздушного кольца,  $\epsilon_в$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $C_\pi$  – паразитная емкость, обусловленная краевыми эффектами. Общая емкость ячейки без образца:

$$C_\epsilon = \epsilon_\epsilon C_0 + \epsilon_\phi C_{\phi.к} + \epsilon_\epsilon C_{вк} + C_\pi.$$

Вычитая  $C_\epsilon$  из  $C_x$  и принимая  $\epsilon_\epsilon = 1$ , получаем:

$$C_x - C_\epsilon = (\epsilon_x - 1)C_0.$$



Рис. 2. Измерительная система LCR GW Instek, ZVRE Rohde&Schwarz, емкостная ячейка, фторопластовые кольца

С использованием этих соотношений действительная и мнимая части эффективной комплексной диэлектрической проницаемости вычисляются следующим образом:

$$\epsilon_x' = 1 + \frac{|Z_x| \sin \varphi_x - |Z_\epsilon| \sin \varphi_\epsilon}{\omega C_0}, \quad \epsilon_x'' = \frac{|Z_x| \cos \varphi_x - |Z_\epsilon| \cos \varphi_\epsilon}{\omega C_0},$$

где  $|Z_x|$ ,  $\varphi_x$  – модуль и аргумент импеданса ячейки с образцом соответственно,  $|Z_\epsilon|$ ,  $\varphi_\epsilon$  – модуль и аргумент импеданса ячейки с воздухом. Погрешность

измерения прибора меняется от 0.1 % на частоте 1 кГц до 2.5 % на частоте 5 МГц.

Методика измерения КДП в диапазоне частот до 50 МГц основана на измерении параметра  $S_{12}$  (коэффициент прохождения) векторным анализатором ZVRE. Конденсаторная ячейка включается в разрыв центрального проводника передающей линии анализатора. Комплексная проводимость конденсаторной ячейки связана с параметром  $S_{12}$  следующим соотношением [4]:

$$Y_{я} = \frac{1}{Z} = \frac{S_{12}}{2R_0(1-S_{12})},$$

где  $R_0 = 50$  Ом – внутреннее сопротивление анализатора. Измерения и расчеты эффективной КДП проводятся аналогично измерениям с первой методикой. Для устранения влияния приэлектродной поляризации на результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости образцов горных пород, насыщенных минерализованным раствором, применены прокладки. В качестве изолирующей прокладки использовалась тефлоновая лента толщиной 0.30 мм

с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon' = 2.02$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta = 0.0003$ . Диэлектрическая проницаемость ленты уточнялась с помощью измерений емкости конденсатора с различным количеством слоев ленты между электродами (от 2 до 10). Пленка прокладывалась с двух сторон образца, конденсатор рассматривался как двухслойный.

Измеренные значения КДП являются эффективными значениями, которые описываются поляризацией Максвелла-Вагнера [3]. Истинные значения комплексной диэлектрической проницаемости вычисляются с учетом параметров поляризации Коул-Коул [5, 6].

Методика измерения КДП в диапазоне частот от 20 МГц до 1 ГГц основана на измерении коэффициента отражения  $S_{11}$  от открытого конца волновода [7]. Исследуемый образец помещается в конце волноводной линии (рис. 3) зонда, и векторным анализатором цепей ZVRE измеряется комплексный коэффициент отражения. Коэффициент отражения  $S_{11}$  связан с комплексной проводимостью эквивалентной цепи:

$$Y = Y_0 \frac{1-S_{11}}{1+S_{11}}, Y = j\omega\epsilon_x C_k + \sqrt{\epsilon_x^5} G_k,$$

где  $Y_0 = 1/50$  Смс – проводимость зонда, а  $C_k$  и  $G_k$  – константы, получаемые при калибровке зонда в воздухе и калибровочной жидкости. Решая это уравнение, получаем комплексную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_x$ .

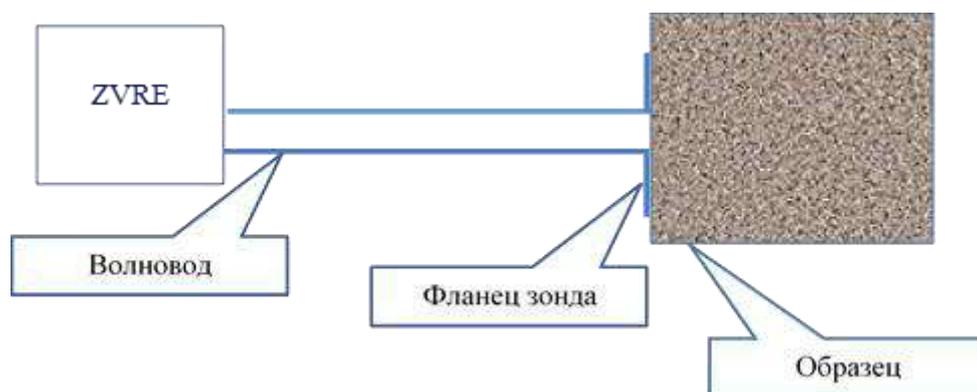


Рис. 3. Принципиальная схема измерений методом открытого конца  
Собран измерительный стенд для исследования электрофизических свойств образцов нефтегазового коллектора, насыщенных водонефтяной смесью, в частотном диапазоне от 1 кГц до 1 ГГц.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-35-00395) в ИНГГ СО РАН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - Т. 1. - 404 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Электродинамика сплошных сред. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - Т. VIII. - 656 с.
3. Челидзе Т.Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. - Киев: Наукова думка, 1977. - 230 с.
4. Эпов М.И., Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В. Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах // Геология и геофизика. - 2011. - Т.52. - № 9. - С. 1302-1309.
5. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics // Journal of Chemical Physics. - 1941. - P. 341-351.
6. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics II. Direct Current Characteristics // Journal of Chemical Physics. - 1942. - P. 98-105.
7. Vorlicek J., Oppl L., Vrba J. Measurement of Complex Permittivity of Biological Tissues // Progress In Electromagnetics Research Symposium (Cambridge, USA, July 5–8, 2010). - Cambridge, 2010. - P. 599-601.

© Т. И. Ельцов, Н. А. Голиков, 2016

## **ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ Г. АНЖЕРО-СУДЖЕНСКА КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ**

### ***Алексей Александрович Еманов***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-52-66, e-mail: alex@gs.sbras.ru

### ***Екатерина Викторовна Лескова***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-60-14, e-mail: katya@gs.sbras.ru

### ***Александр Владимирович Фатеев***

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

### ***Александр Фёдорович Еманов***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)330-12-61, e-mail: emanov@gs.sbras.ru

Изложены результаты по оценке сейсмической опасности г. Анжеро-Судженска Кемеровской области и прилегающих территорий на основе комплекса сейсмологических, геологических и геоморфологических данных.

**Ключевые слова:** оценка сейсмической опасности, Кемеровская область, сейсмичность.

## **SEISMIC HAZARD ASSESSMENT OF ANZHERO-SUDZHENSK OF THE KEMEROVO REGION AND ADJACENT TERRITORIES**

### ***Aleksey A. Emanov***

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

### ***Ekaterina V. Leskova***

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

### ***Aleksander V. Fateev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Senior Engineer, tel. (383)330-52-66

### ***Aleksandr F. Emanov***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Director, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.sbras.ru

The results of the seismic hazard assessment of Anzhero-Sudzhensk of the Kemerovo region and adjacent territories on the basis of seismological, geological and geomorphological data are presented.

**Key words:** seismic hazard assessment, Kemerovo region, seismicity.

Сейсмическое районирование России, выполненное в 1990-е гг. [5], как известно, являлось очередным этапом исследований по оценки сейсмической опасности России. Даже к моменту составления карт сейсмического районирования не вся региональная информация была использована в работе из-за большой трудоемкости.

С появлением в последнее десятилетие высокоточной цифровой регистрирующей аппаратуры и развитием математических методов и современных комплексов программ цифровой обработки больших объемов различной геолого-геофизической информации уточнение сейсмической опасности территории России становится весьма актуальной задачей. Тем не менее до сих пор уточнение сейсмической опасности всей территории России является трудоемкой работой, и в большинстве случаев актуальным становится решение этой задачи по отдельным регионам.

Данная работа ставит своей целью уточнение сейсмической опасности территории г. Анжеро-Судженска Кемеровской области и прилегающих районов.

Основная идея вероятностной оценки сейсмической опасности вначале была предложена Корнеллом [9] и в дальнейшем разрабатывалась многими учеными [7, 8, 11]. Методология, использованная в данной работе, включает в себя следующие шаги: 1) выделение сейсмических зон, зон ВОЗ (возможных опасных землетрясений); 2) оценка повторяемости землетрясений и максимальной магнитуды для каждой из зон ВОЗ; 3) оценка затухания колебаний почвы; 4) вычисление сейсмической опасности в пиковых ускорениях грунта; 5) оценка сейсмической опасности в баллах сейсмической интенсивности по шкале MSK-64.

Оценка сейсмической опасности территории г. Анжеро-Судженска Кемеровской области проводится на основе каталога сейсмических событий Алтае-Саянского региона, включающего в себя параметры землетрясений за период 1734-2014 гг., как инструментально зарегистрированных, так и исторических (рассчитанных по данным макросейсмических проявлений). Для целей анализа сейсмичности все доступные данные о землетрясениях (исторических, инструментальных, зарегистрированных стационарной и локальными сетями) в области радиусом ~400 км от г. Анжеро-Судженска объединены в сводный каталог, который в дальнейшем был унифицирован по энергетической характеристике (магнитуда  $M_s$ ).

В целом район размещения г. Анжеро-Судженска малосейсмичен, тем не менее сейсмичность южных, юго-восточных и восточных прилегающих территорий может внести свой вклад при оценке сейсмической опасности.

Наибольшая сейсмическая активность в радиусе 400 км от города по данным сейсмологического мониторинга последних двухсот лет зафиксирована в районе г. Камень-на-Оби Алтайского края; на Кузбассе, включая Кузнецкую котловину и ее горное обрамление, и в южных и юго-восточных отрогах Кузнецкого Алатау (рис. 1).

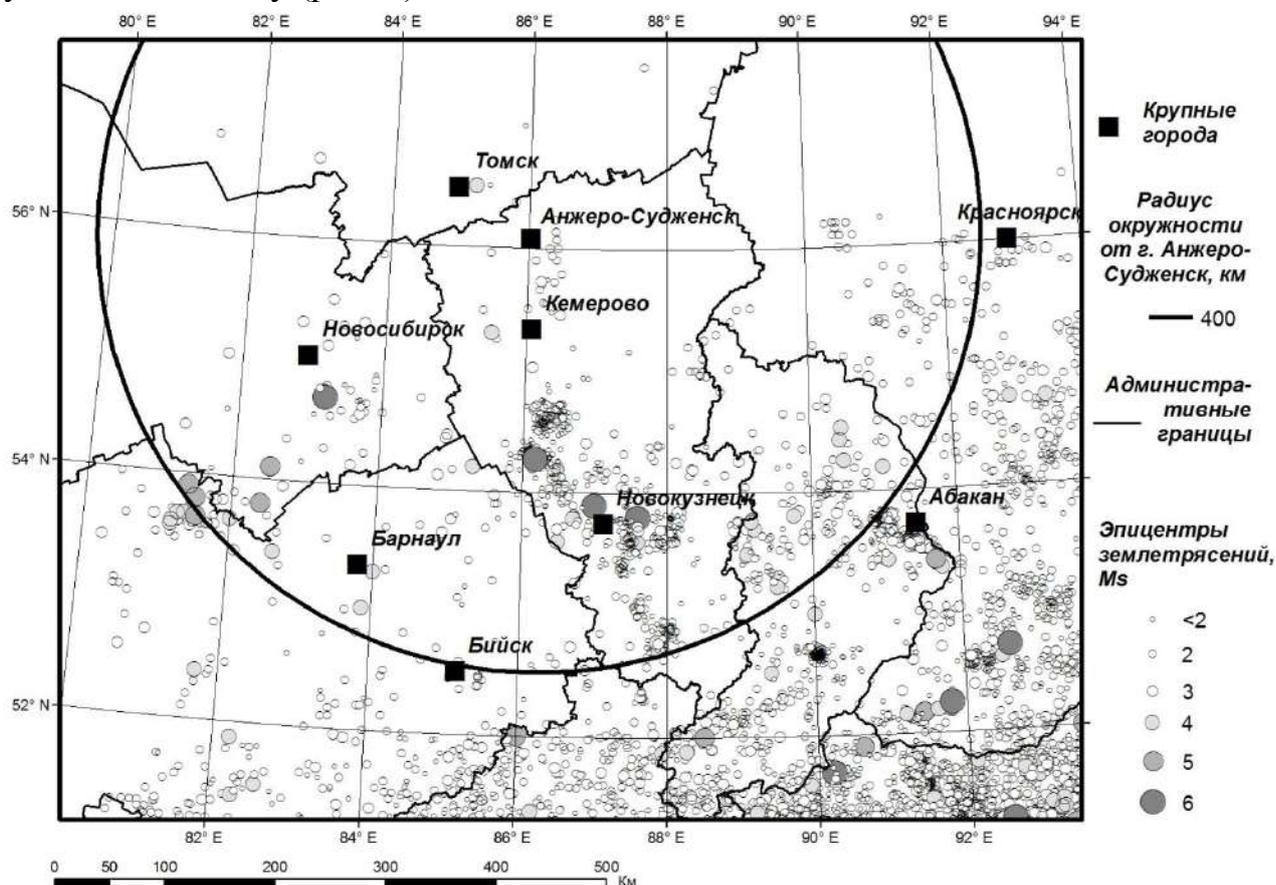


Рис. 1. Эпицентры землетрясений в радиусе 400 км от площадки исследования (1734-2014 гг.)

Основой для оценки сейсмической опасности (определения исходного балла) конкретной площадки является модель сейсмичности – карта зон ВОЗ и их параметры (максимальная магнитуда, сейсмическая активность и наклон графика повторяемости).

Выделение зон ВОЗ для уточнения сейсмической опасности территории г. Анжеро-Судженска производилось на основе имеющейся сейсмологической и геологической информации с привлечением данных результатов исследований по уточнению сейсмической опасности смежных территорий из других источников, а также рельефа и геоморфологических представлений об исследуемой области.

Исходными сейсмологическими данными является каталог землетрясений Алтае-Саянского региона за доступный период 1734-2014 гг., отфильтрованный от зависимых событий в пределах зоны радиусом 400 км от города алгоритмом

пространственно-временных окон [10, 12]. Используемый каталог содержит сведения о параметрах 886 землетрясений в диапазоне магнитуд  $6.1 \leq M_s \leq -2$ .

Для анализа использована карта активных разломов, в основу которой легли данные ГИН РАН (гл. ред. В.Г. Трифонов), несколько дополненные и уточненные [1], а также карта активных разломов Кузбасса, приведенная в работе [4].

В качестве дополнительной информации привлечены результаты исследований по уточнению сейсмической опасности юга Кузбасса [2] и г. Полысаево Кемеровской области [4], а также новые версии карт ОСР-2012 [6] и ОСР-2016 [3].

В результате анализа и сопоставления данных в области радиусом 400 км от г. Анжеро-Судженска выделены десять доменов и девять линеаментов (рис. 2). Для выделенных зон ВОЗ определены параметры сейсмического режима: оценена повторяемость землетрясений и значение максимальной магнитуды  $M_{max}$  (рис. 2).

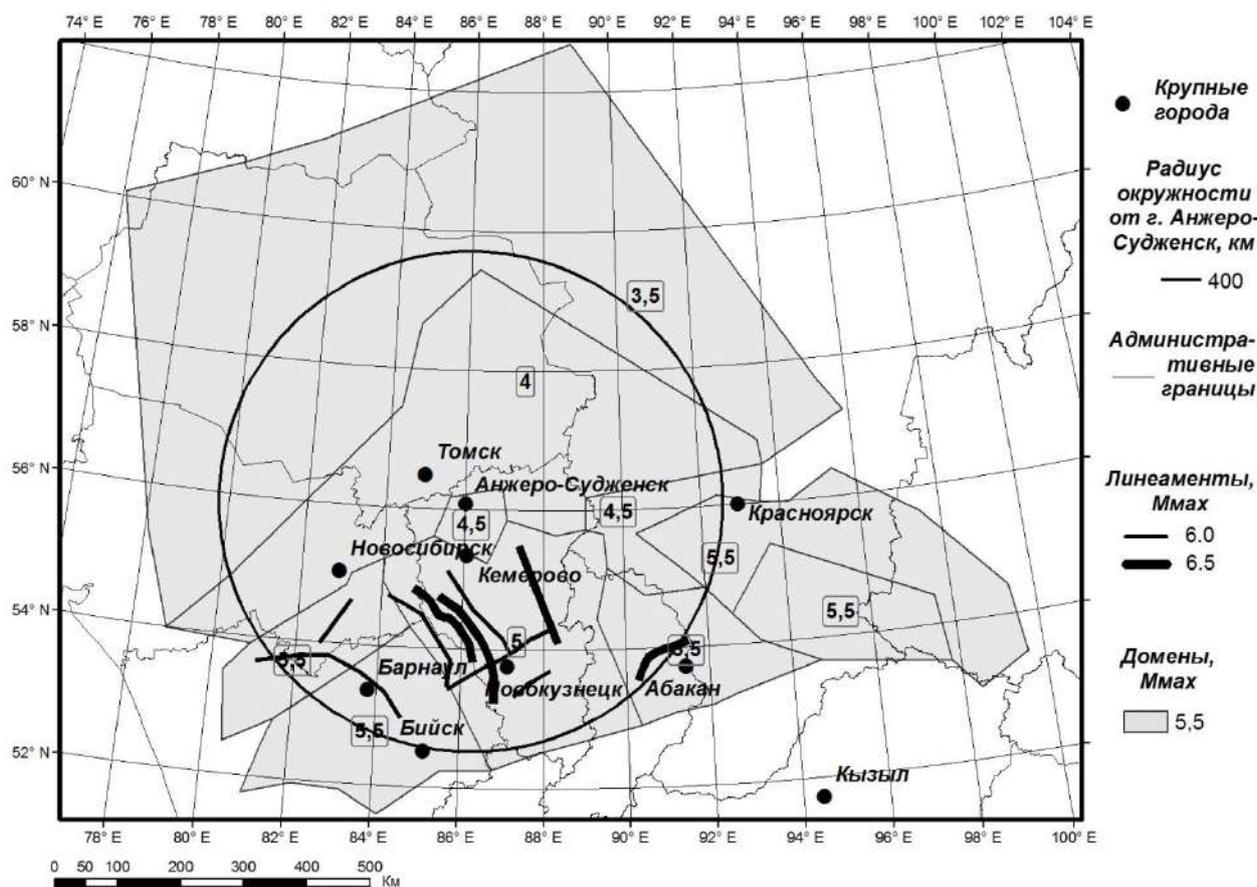


Рис. 2. Карта выделенных зон ВОЗ с назначенными  $M_{max}$

Для вычисления вероятностной сейсмической опасности была использована программа SEISRISKIII, реализующая метод Бендера-Перкинса и предназначенная для расчета максимальных уровней показателей сейсмической сотрясаемости, которые с заданной вероятностью не могут быть превышены в

течение определяемых пользователем фиксированных промежутков времени, в каждой точке тестового полигона [8].

Расчеты по оценке сейсмической опасности территории г. Анжеро-Судженска проведены на основе параметров уточненных зон ВОЗ и полученных результатов по затуханию колебаний грунта для Алтае-Саянского региона. В результате исследований получено, что для территории города значение интенсивности сейсмических сотрясений в течение 50 лет не превысит: 4.8 балла – с вероятностью 90 %; 5.1 балла – с вероятностью 95 %; 5.8 балла – с вероятностью 99 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Физическая мезомеханика. - 2005. - Т. 8. - № 1. - С.49-64.

2. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Кузнецов К.Г., Лескова Е.В., Новиков И.С., Сычѳв И.В., Фатеев А.В. Оценка сейсмической опасности территории Юга Кузбасса // Вестник НЯЦ РК. - 2007. - Вып. 2. - С.113-127

3. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / Отв. ред. Уломов В.И., Богданов М.И. - М.: ИФЗ РАН, 2016. - 64 с.

4. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Лукашова Р.Н., Донцова Г.Ю., Кучай М.С., Новиков С.С. Отчет о результатах научно-исследовательских работ по теме: «Экспертное заключение о прогнозной вероятности землетрясения на территории г. Полысаево Кемеровской области». - М.: ИФЗ РАН, 2010. - 68 с.

5. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. - М.: ОИФЗ РАН, 1999. - 57 с.

6. Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. - 2013. - № 8. - С. 30-39.

7. Algermissen S., Perkins D. A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States. - U.S. Geological Survey, Open-File Report, 1976. - P.76-416.

8. Bender B., Perkins D. SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation. - USGS Bulletin, 1987. - 1772 p.

9. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of Seismological Society of America. - 1968. - Vol. 58. - P.1583-1606.

10. Gardner K.J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, poissonian? // Bulletin of Seismological Society of America. - 1974. - Vol. 64. - P. 1363-1367.

11. McGuire R. EQRISK Fortran computer program for seismic risk analysis. - U.S. Geological Survey, Open-File Report, 1976. - P. 76-67.

12. Musson R.M.W. Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan Region // Annali di Geofisica. - 1999. - Vol. 42. - N 6. - P.1109-1138.

© А. А. Еманов, Е. В. Лескова, А. В. Фатеев, А. Ф. Еманов, 2016

## **КОМПЛЕКСНЫЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫМИ МЕТОДАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ТЕ- И ТМ-ПОЛЯРИЗАЦИИ**

*Аркадий Владимирович Злобинский*

Научно-техническая компания «ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, 26/1, 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; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, профессор кафедры геофизики, тел. (913)912-43-36, e-mail: mvecs@yandex.ru

Для недропользователей все больший интерес вызывают глубокозалегающие объекты. При изучении таких объектов традиционные методы электроразведки на основе использования электромагнитного поля ТЕ-поляризации или малоэффективны, или не обладают достаточной достоверностью. Решение таких задач требуют применения методов, обладающих лучшей локальностью и изучающих различные электродинамические параметры среды. Необходимо применять методы с использованием электромагнитного поля ТМ-поляризации.

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

## **INTEGRATED ELECTRICAL PROSPECTING SURVEY USING TE AND TM-POLARIZATION OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD**

*Arkadiy V. Zlobinskiy*

STC «ZaVeT-GEO», Russia, 630102, Novosibirsk, Voskhod Str. 26/1, 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, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Principal Scientist Officer of the Laboratory of geoelectrics; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Professor of geophysics, tel. (913)912-43-36, e-mail: vecs@yandex.ru

Many modern surveys tests deep ore objects. Traditional electrical prospecting methods with using TE-polarization of an electromagnetic field are not effective for testing the deep objects and have not good localization. For testing the objects we need to use methods with more localization and testing different electrodynamic parameters of medium. We should use TM-polarization of an electromagnetic field.

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

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для недропользователей все актуальнее становится задача изучения рудных объектов на больших глубинах. При изучении таких объектов традиционные методы электроразведки на основе использования электромагнитного поля ТЕ-поляризации или вовсе неэффективны, или не обладают достаточной локальностью при выявлении интересующих недропользователей объектов. Повысить достоверность геофизических данных можно, применяя методы, обладающие лучшей локальностью и изучающие различные электродинамические параметры среды. В первую очередь нужно обратить внимание на относительно новое направление электроразведки с использованием электромагнитного поля ТМ-поляризации. Использование ТМ-поляризации позволяет изучать не только горизонтальное удельное сопротивление среды, но и вертикальное удельное сопротивление среды, а также параметры поляризации среды.

Напомним основные различия между ТМ-поляризацией и ТЕ-поляризацией электромагнитного поля. Источником поля только ТЕ-поляризации является незаземленная петля. Источником поля только ТМ-поляризации является круговой электрический диполь – КЭД. КЭД представляет из себя несколько горизонтальных линий, одни концы которых равномерно заземлены по окружности, а вторые – в центре окружности. 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.

Поле ТМ-поляризации является ортогональным полю ТЕ-поляризации. 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). Возможность регистрировать отклик только от локального трехмерного объекта предоставляет электромагнитное поле, возбуждаемое круговым электрическим диполем – КЭД [4, 6, 8]. При проведении работ методом ЗВТ применяются хорошие возможности восстановления параметров среды по измеренным данным. ЗВТ используется на рудных месторождениях и при экологических работах [1-3].

Для обоснования предложенной методики было проведено компьютерное трехмерное моделирование с учетом параметров поляризации среды. Осложняющими условиями для проведения работ признаны:

- 1) приповерхностный пятидесятиметровый проводящий слой, проводимость которого превышает проводимость объектов поиска в два раза;
- 2) глубина залегания до 800 метров;
- 3) относительно небольшие размеры объектов в плане – несколько сот метров.

Результаты моделирования показали, что аномалии от объектов при таких условиях не превышают одного процента в измеряемом сигнале, что делает использование только классической электроразведки бесполезной. Все расчеты проводились с использованием программ Подбор, ВыборЗС и GeoPrep [5, 7, 9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Данные работы проводились на участке площадью чуть больше 5 км<sup>2</sup>, сетка измерений близка к квадратной сетке 200\*200 м<sup>2</sup>. Работы проводились двумя методами:

1) Методом переходных процессов – МПП. МПП – это классический, широко распространенный метод, использующий только поле ТЕ-поляризации. В данных работах в качестве источника использовалась квадратная петля со стороной 200 м, ток в петле – 10 А. Применялась соосная установка, приемником был датчик с эффективной площадью 10 000 м<sup>2</sup>.

2) ЗВТ. Источником поля являлся круговой электрический диполь с радиусом 750 м, суммарный ток в источнике – 80 А. Измерялись следующие компоненты электромагнитного поля –  $\partial B_z / \partial t$ ,  $\partial B_\phi / \partial t$ ,  $E_r$ . Компоненты электромагнитного поля  $\partial B_z / \partial t$ ,  $\partial B_\phi / \partial t$  измерялись датчиками с эффективной площадью 30 000 м<sup>2</sup>. Компонента  $E_r$  измерялась приемной линией длиной 50 м.

Информативными оказались следующие результаты работ:

1) Метод МПП. Была проведена интерпретация в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели. Изучалось горизонтальное удельное сопротивление среды. Учет параметров поляризации среды не проводился, так как поляризация на глубинах в несколько сот метров не влияет на измеряемые сигналы МПП. В работе использовалась хорошая устойчивость метода МПП к приповерхностным неоднородностям и возможность подбирать параметры среды, устойчивые к искажениям. С помощью данного метода выявлены основные зоны увеличения проводимости, которые потом более пристально исследовались методом ЗВТ.

2) Метод ЗВТ, измерения компоненты  $E_r$ . Проводилась послойная интерпретация в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели с учетом параметров поляризации среды по формуле Cole-Cole. Основной информацией, полученной из измерений этой компоненты, оказалось выделение зоны поляризации на площади. По результатам обработки качественно определена западная

и часть южной границы зоны поляризации. Восточная и северная границы выявлены с большими погрешностями, так как они не находились между зоной поляризации и источником электромагнитного поля КЭД. В работе использовалась большая чувствительность компоненты  $E_r$  метода ЗВТ к изменению поляризации среды. Для получения результата по компоненте  $E_r$  в данной работе можно было даже не проводить количественной интерпретации, а просто выделить часть площади, где измеренные кривые имеют переход через ноль – эта область соответствует аномалии с увеличенной поляризацией среды.

3) Метод ЗВТ, измерения компоненты  $\partial B_z / \partial t$ . Для выделенных в рамках МПП аномалий мы подобрали трехмерные модели на основании измерения компоненты  $\partial B_z / \partial t$  метода ЗВТ. Изучалось горизонтальное и вертикальное удельное сопротивления среды в рамках трехмерного моделирования. Использовалась уникальная чувствительность магнитных компонент поля в методе ЗВТ к трехмерным изменениям электромагнитных параметров среды. Ни один другой метод электроразведки не позволяет собирать такую качественную информацию о трехмерных включениях в среду.

4) Проверка соответствия трехмерных моделей ЗВТ, полученных по результатам измерения компоненты  $\partial B_z / \partial t$  данным МПП. Зафиксировано сильное смещение по глубине и в плане аномалий по результатам интерпретации данных МПП в рамках одномерной модели по сравнению с реальной средой.

На рисунке приведены площадные (нормированные) распределения сигналов компоненты  $\partial B_z / \partial t$  метода ЗВТ на времени 0.78 мс. Цветовая шкала соответствует различным значениям ЭДС. Обратим внимание на то, что сигнал меняется от -70 мкВ до 70 мкВ, голубой соответствует отрицательным значениям ЭДС, а красный соответствует положительным значениям. На рисунке выделены зоны, связанные с одной из аномалий. Темно-зеленым выделена аномалия по МПП. Светло-зеленым – аномалия по  $\partial B_z / \partial t$  метода ЗВТ. Ало-желтым – аномалия поляризации в  $E_r$  метода ЗВТ.

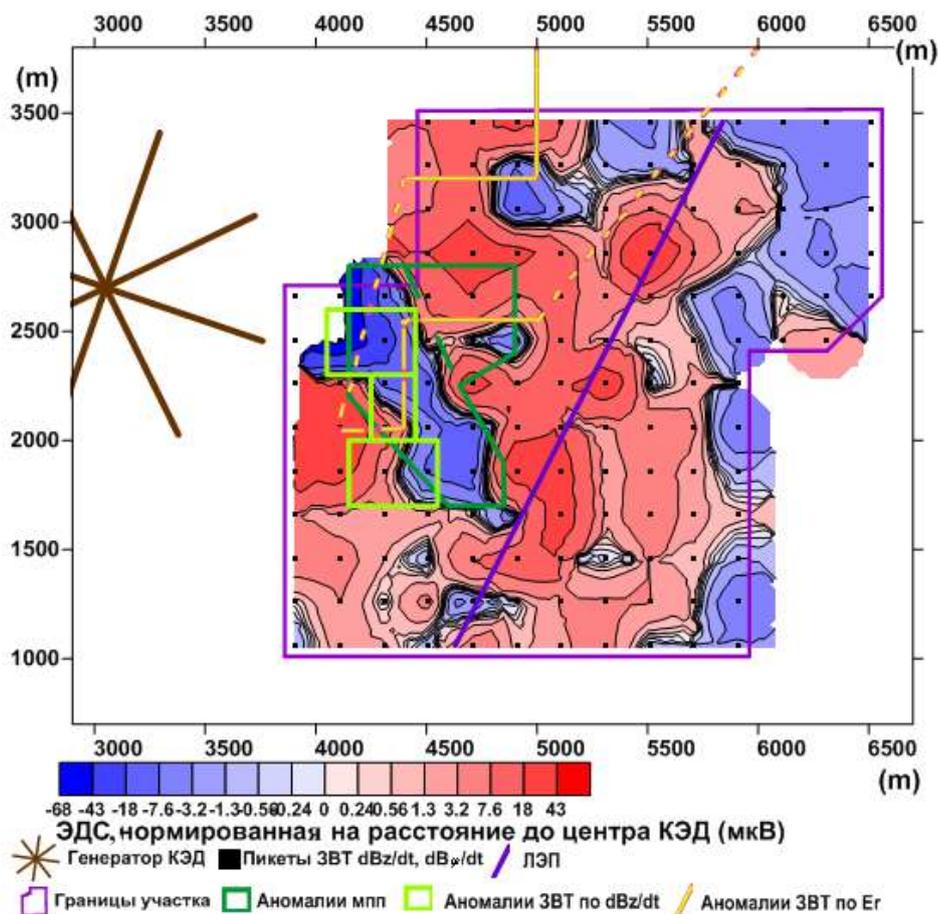


Рис. Площадные (нормированные) распределения сигналов ЗВТ. Компонента  $\partial B_z / \partial t$  время 0.78 мс. Темно-зеленые – аномалии по МПП. Светло-зеленые – аномалии по  $\partial B_z / \partial t$  ЗВТ. Ало-желтые – аномалии поляризации по  $E_r$  ЗВТ

## ВЫВОДЫ

1. Наличие аномалий подтверждено не только по изменению удельного сопротивления на глубинах свыше 200 м, но и по резкому изменению поляризуемости среды в районе аномалий.

2. Полученные аномалии по данным МПП позволили выделить зоны увеличения проводимости. Интерпретация в рамках горизонтально-слоистой модели не позволила точно определить границы объекта и его глубину. В данных работах известное тело было определено с существенным смещением в плане (нет перекрытия между зоной аномалии и объектом) и изменением глубины объекта с 300 м на 100 м.

3. Трехмерная интерпретация сигналов компоненты  $\partial B_z / \partial t$  ЗВТ позволила точно определить границы объекта и уменьшить площадь аномалии, полученной по данным МПП, примерно в 3 раза.

4. Моделирование сигналов МПП в рамках трехмерных моделей (трехмерные модели мы могли получить только из сигналов ЗВТ) дало хорошее согласие между наблюдаемыми и модельными сигналами.

#### 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 конференции "ГЕО-Сибирь-2014". - 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. – Vol. 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. - Vol. 44(10). - P. 1700-1705.

© А. В. Злобинский, В. С. Могилатов, 2016

УДК 531.717.31

#### **РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НА БОРТУ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

***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

***Надежда Юрьевна Степанова***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (383)333-30-12, e-mail: togysan@mail.ru

***Антон Юрьевич Бондаренко***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий конструктор, тел. (383)333-30-12, e-mail: BondarenkoAJu@ipgg.sbras.ru

В работе изложены основные принципы создания многоканальной системы беспилотного летательного аппарата для решения навигационных задач на основе использования данных от бортовых инерциальной и спутниковой навигационных систем (ИНС и СНС), импульсных лазерных измерительных систем при их синхронной обработке. Экспериментально подтверждена техническая возможность применения импульсных лазерных систем с рабочей длиной волны 905 нм.

**Ключевые слова:** многоканальные измерительные системы, беспилотный летательный аппарат, магниторазведка, альтиметр, лазерный сканер, ультразвуковой дальномер.

## **DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF THE SYSTEM TO SOLVE PROBLEMS OF NAVIGATION ON BOARD UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*Igor N. Zlygostev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Senior science researcher, tel. (383)333-30-12, e-mail: ZlygostevIN@ipgg.sbras.ru

*Nadya Y. Stepanova*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks Prospect 20, undergraduate, tel. (383)333-30-12, e-mail: togysan@mail.ru

*Anton Y. Bondarenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Design project leader, tel. (383)333-30-12, e-mail: BondarenkoAJu@ipgg.sbras.ru

The present paper covers the main principles for the development of a multichannel drone system for solving navigation problems using the data from inertial and satellite on-board navigation systems (INS and SNS), pulse laser calibration systems processed simultaneously.

Technological applicability of pulse laser systems with an operating wavelength of 905 nm is verified by experiment.

**Key words:** multichannel measurement systems, drone, magnetic survey, altimeter, laser scanner, ultrasonic distance meter.

Повышение ресурсной базы полезных ископаемых требует проведения детальных геолого-геофизических исследований плохо изученных территорий. Значительный вклад в решение этих задач вносят традиционные аэрогеофизические методы разведки, позволяющие выявить наиболее перспективные площади для последующего детального изучения. Однако стоимость выполнения таких работ довольно высока и становится одним из сдерживающих факторов для поиска месторождений.

Для решения таких задач ИНГГ СО РАН предложена новая технология низковысотной аэрогеофизической магнитной съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве носителя.

В 2014 г. в ИНГГ СО РАН был разработан опытный образец аэрогеофизического комплекса с магнитометрическим каналом, размещенным на борту БПЛА мультироторного типа сверхлегкого класса. Общий уровень магнитных помех магнитометрического канала при работе в составе комплекса не превышает 1 нТл. Подобная система, смонтированная на беспилотном вертолете среднего класса, создана в Германии [1], но она имеет уровень магнитных помех около 10 нТл.

Для отработки новой технологии в полевые сезоны 2014 и 2015 гг. при помощи разработанного комплекса были проведены пилотные исследования ряда геологических объектов в Хакасии, в районе Якутска, Мирного и археологических объектов в Венгеровском районе Новосибирской обл. [2, 3]

Результаты исследований, заверенные данными пешеходной съемки, показали высокую эффективность предложенной технологии и очень высокую производительность (до 100 погонных километров профилей в день) при полетах

в автоматическом режиме под управлением автопилота.

Полеты выполняются как под управлением автопилота, так и в режиме ручного управления. Полетное задание (маршруты полета) формируются при помощи специализированных программ, путем импорта графической подложки обследуемого участка с привязкой координат по латерали по данным СНС.

Для реализации всех преимуществ этой технологии при проведении обследований территорий со сложным рельефом необходимо дополнить носитель системой для решения следующих навигационных задач:

- измерение высоты полета над поверхностью;
- определение местоположения навигационных препятствий, расположенных по курсу следования носителя (резкое изменение высоты рельефа, высоко стоящее дерево и т. п.).

Целью настоящей работы является выбор и системная интеграция основных принципов создания системы для решения навигационных задач и анализ технических возможностей ее реализации.

Авторы считают, что система должна быть основана на многоканальных измерителях, осуществляющих пространственно-временную обработку сигналов, обеспечивающую одновременное измерение угловых координат и дистанции источников переизлучения, и формирование управляющих воздействий для автопилота. Увеличение числа линейно независимых каналов (например, прием отраженных импульсов разнесенными измерителями, использование сигналов от бортовых систем ИНС и СНС) обуславливает повышение информационных возможностей системы благодаря увеличению ее пропускной способности. Анализ преимуществ такого подхода хорошо изложен в [4, 5].

Исходя из поставленных выше навигационных задач, система должна включать в себя следующие измерительные каналы (измерители):

- 1) дистанции до препятствия – определение высоты полета над поверхностью;

2) дистанции до препятствия и его угловых координат в угломестной плоскости – дополнительная информация для измерения высоты, предсказание изменений рельефа и наличия навигационных препятствий по курсу;

3) дистанции до препятствия и его угловых координат в азимутальной плоскости – возможность корректировки курса для исключения столкновений;

4) измеритель вектора скорости движения носителя – выдача управляющих воздействий;

5) углового положения платформы с размещенными измерителями по п.п. 1 – 3 – корректировка измерений угловых координат и дистанций;

б) единая система измерения времени, общая для всех измерителей, – для реализации синхронной обработки данных.

При выборе типа измерителей необходимо учесть ограничения, налагаемые техническими характеристиками носителя и геофизической аппаратурой.

БПЛА сверхлегкого класса может нести полезную нагрузку (включая геофизическую аппаратуру) массой не более 2 кг, очень существенны ее габариты и энергопотребление, также необходимо большое внимание уделить выполнению требований по электромагнитной совместимости с учетом наличия высокочувствительного магнитоизмерительного канала, их стоимости и наличия возможностей приобретения.

В настоящее время имеются несколько классов различных измерителей по п.п. 1-3, таких как радиоволновые (альтиметры и радиолокаторы), ультразвуковые (измерители расстояния) и лазерные (2D- и 3D-сканеры, измерители расстояния).

Радиоволновые альтиметры и радиолокаторы для этой цели непригодны так как имеют большой вес и габариты антенной системы, а также возникают серьезные проблемы электромагнитной совместимости.

Ультразвуковые и лазерные системы, в широком ассортименте представленные на рынке, свободны от этих недостатков. Для подтверждения возможностей их применения авторами был проведен ряд экспериментальных работ в лабораторных и натуральных условиях. Выбор конкретных типов измерителей произведен на основе анализа совокупности технических характеристик, представительности на рынке данного типа, показателя цена/качество. Так, наиболее широкий сегмент рынка представлен импульсными лазерными системами с рабочей длиной волны 905 нм, а ультразвуковые измерители – порядка 1 см.

Поэтому для испытаний были выбраны: недорогой импульсный лазерный дальномер типа LIDAR Lite LL-905-PIN-01 [6] и ультразвуковой дальномер US-015 [7].

Цель испытаний заключалась в определении технических характеристик этих устройств в зависимости от условий их применения при различных коэффициентах отражения и рассеяния естественных объектов (трава, кусты и т. д.). К сожалению, эти данные недостаточно полно изложены в технической документации производителей.

Для проведения испытаний создан малогабаритный измерительный модуль на основе контроллера Arduino. Общий вид приведен на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Вид спереди



Рис. 2. Вид сзади

В ходе работы производилась проверка заявленных производителем технических характеристик лазерного и ультразвукового дальномеров для различных типов отражающих поверхностей – земли, травяного покрова, кустарников, кирпичной и стальной стен.

Результаты испытаний показали, что максимальная дальность обнаружения травяного покрова и кустарников лазерным дальномером как при нормальном падении луча, так и при его отклонении от оптической оси на угол в пределах  $\pm 10^\circ$  составляет 30 м (при точности измерения не хуже 10 см). Ультразвуковой дальномер в ходе испытаний показал, что дальность обнаружения травяного покрова не превышает 1 м и при отклонении луча от оси на угол в пределах  $\pm 6^\circ$  он перестает регистрировать отражения.

Таким образом, экспериментально установлено, что лазерный дальномер Lite LL-905-PIN-01 и, следовательно, аналогичные сканирующие лазерные системы можно применять в качестве измерителей для решения задач по п.п. 1-3.

Данные по п.п. 4-6 предоставляют штатные бортовые системы ИНС и СНС носителя, включенные в автопилот.

По нашему мнению, примерная конфигурация системы для решения навигационных задач должна включать в себя лазерный дальномер (определение высоты), два быстродействующих лазерных сканера – угломестный и азимутальный с секторами сканирования около  $100^\circ$  (уточнение текущей высоты, предсказание изменения рельефа, определение местоположения навигационных препятствий), штатные бортовые системы ИНС и СНС – текущие углы крена и тангажа, значения вектора скорости перемещения летающей платформы и привязку к мировому времени.

Обработка всей совокупности данных должна производиться на специализированном вычислителе, который будет вырабатывать управляющие сигналы для автопилота, необходимые для успешного выполнения полетного задания,

и передавать результаты измерения высоты для регистрации в энергонезависимом запоминающем устройстве.

Создание такой системы требует разработки специализированного программно-алгоритмического обеспечения, и в настоящее время такая работа выполняется в ИНГГ СО РАН.

#### 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. - Vol. 29. - N 4. - P. 103-105.

2. Эпов М.И., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Дядьков П.Г., Савлук А.В., Вайсман П.А. и др. Магнитометрический комплекс на лёгких БПЛА для археологических исследований. - Новосибирск: Институт археологии и этнографии СО РАН, 2015. - С. 30-31.

3. Эпов М.И., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Вайсман П.А., Колесов А.С., Шеремет А.С. Применение инновационного высокочастотного магнитометрического зонда на легком беспилотном летательном аппарате геологии, археологии и смежных областях. - Алматы, 2015. - С. 613-619.

4. Вопросы статистической теории радиолокации / под ред. Г.П. Тартаковского. - М.: Сов. Радио, 1963, 1964. - Т. 1, 2.

5. Царьков Н.М. Многоканальные радиолокационные измерители. - М.: Сов. радио, 1980. - 192 с.

6. Технические характеристики лазерного дальномера LIDAR Lite LL-905-PIN-01: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.pulsedlight3d.com/>

7. Технические характеристики ультразвукового дальномера US-015 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://smd61.ru/katalog/datchiki-i-moduli/modul-ultrazvukovoy-dalnomer-us-100>

© И. Н. Злыгостев, Н. Ю. Степанова, А. Ю. Бондаренко, 2016

## **ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СУПЕРВУЛКАНА ТОБА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

### ***Екатерина Владимировна Касаткина***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, лаборант лаборатории сейсмической томографии; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка, тел. (383)330-92-01, e-mail: KasatkinaEV@ipgg.sbras.ru

### ***Иван Юрьевич Кулаков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией сейсмической томографии; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики, тел. (383)330-92-01, e-mail: KoulakovIY@ipgg.sbras.ru

### ***Александр Николаевич Василевский***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, лаборатория сейсмической томографии, Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики, тел. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru

На протяжении последних миллионов лет в кальдере вулкана Тоба произошло несколько крупных извержений. Наиболее мощным и крупнейшим в голоцене стало суперизвержение, произошедшее 74 000 лет назад и приведшее к выбросу 2800 км<sup>3</sup> вулканического материала. Это извержение вызвало длительную смену климата на Земле, а также стало причиной изменения направления расселения людей на планете. Мы предполагаем, что главной причиной извержений вулкана Тоба стала субдукция под Зондскую плиту хребта Исследователей (IFZ), который представляет собой крупную разломную водонасыщенную зону. Наша томографическая модель позволяет надежно выявить питающую систему вулкана Тоба, а также выделить в ней несколько уровней накопления магмы. Полученные результаты говорят об активности питающей системы вулкана в настоящее время и о возможной ее активизации в будущем.

**Ключевые слова:** сейсмология, сейсмическая томография, супервулканизм, вулкан Тоба, скоростная модель.

## **TOBA SUPERVOLCANO FEEDING SOURCES INFERRED BY SEISMIC DATA**

### ***Ekaterina V. Kasatkina***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, BSc, Assistant, Laboratory of seismic tomography; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, student, tel. (383)330-92-01, e-mail: KasatkinaEV@ipgg.sbras.ru

### ***Ivan Y. Koulakov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory of seismic tomography; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Senior teacher Chair of Geophysics, tel. (383)330-92-01, e-mail: KoulakovIY@ipgg.sbras.ru

**Alexander N. Vasilevsky**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Researcher, Laboratory of seismic tomography, Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Senior teacher Chair of Geophysics, tel. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru

During the last millions of years, there were several large eruptions in the Toba volcano caldera. The most powerful and the largest in the Holocene was a super eruption that occurred 74,000 years ago and contributed to the release of 2,800 km<sup>3</sup> of volcanic material. This eruption caused the long-term climate change on Earth, and caused the changing of the direction of human settlement on the planet. We assume that the main reason of Toba eruptions was the subduction of the Investigator ridge (IFZ) which is a large water saturated fracture zone. Our tomographic model allows to reliably identify the Toba volcano feeding system and to identify in it several levels of magma accumulation. The obtained results show the activity of the volcano feeding system at the present and the possibility of new eruptions in the future.

**Key words:** seismology, seismic tomography, supervolcanoes, Toba volcano, velocity model.

Кальдера вулкана Тоба расположена в центральной части Северной Суматры и является местом нескольких крупных извержений. Последнее суперизвержение вулкана произошло 74 000 лет назад, и оно считается самым крупным в Голоцене извержением на Земле. Выброс вулканического материала в твердом эквиваленте составил около 2800 км<sup>3</sup> и существенно повлиял на глобальную биосферу и климат. Если такое извержение произошло бы в наше время, оно бы радикально изменило жизнь людей на Земле в течение нескольких поколений. Поэтому нам важно понять принципы функционирования магматической системы, питающей этот супервулкан.

Кальдера вулкана Тоба является частью Зондской дуги, где Индо-Австралийская плита погружается под Зондскую плиту под углом со скоростью около 56 мм/год. В различных зонах субдукции присутствуют следы кальдерообразующих извержений, однако интенсивность и повторяемость извержений вулкана Тоба делает его уникальным.

Рисунок 1, А показывает, что кальдера вулкана Тоба находится на продолжении Хребта исследователей (IFZ), который представляет собой трансформную зону в Индийском океане длиной около 2500 км и отделяет более молодой западный сегмент океанической плиты от восточного сегмента [1]. IFZ состоит из нескольких параллельных хребтов, достигающих высоты 1500 м по отношению к окружающему морскому дну. На карте видно, что в области стыка между IFZ и Зондским желобом морфология аккреционного комплекса значительно отличается от других сегментов желоба, что может быть объяснено более сильным сжатием вышележащей плиты [2]. Сейсмичность в зоне погружения слэба образует в мантии линейную структуру, направленную непосредственно под кальдеру Тоба. Аналогичное

распределение сейсмичности ранее описывали Fauzi и др. [3], которые провели анализ землетрясений, зарегистрированных на локальных и региональных сетях. Эти авторы предположили, что IFZ "служит местом сфокусированного высвобождения летучих из слэба в клин вышележащей мантии".

Увеличенный фрагмент области кальдеры с относящейся к слэбу сейсмичностью показан на рис. 1, В.

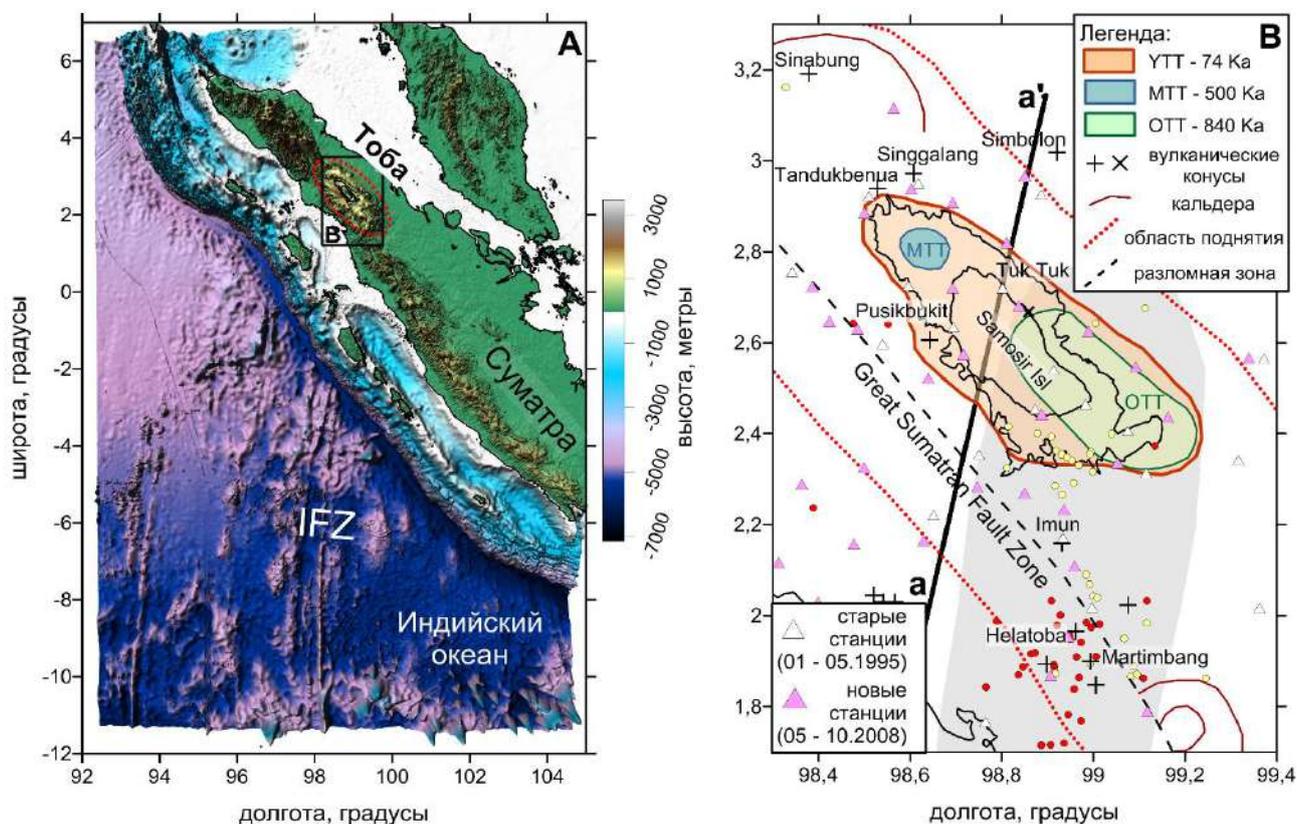


Рис. 1. Топография, система наблюдения и основные структуры исследуемой области: А – батиметрическая карта положения хребта исследователей (IFZ) по отношению к кальдере вулкана Тоба; В – положение основных структур, сейсмических станций и землетрясений в области кальдеры; Great Sumatran Fault Zone – Суматранская разломная зона; ОТТ, МТТ, и YTT – Old, Middle и Young Toba Tuffs соответственно – основные кальдеры, образованные за время действия вулкана; линия а - а' показывает направление вертикального сечения

В настоящей работе мы представляем новую томографическую модель, полученную путем совместной обработки времен прихода  $P$ - и  $S$ -волн двух наборов данных – старого (эксперимент 1995 г.) и нового (эксперимент 2008 г.). Вступления были зарегистрированы на 40 и 42 станций в каждом эксперименте, а общее количество лучей составило 6644 и 5240 для  $P$ - и  $S$ -волн соответственно. Томографическая инверсия проводилась с использованием алгоритма LOTOS [4]. В качестве начальной была выбрана скоростная модель, полученная в предыдущем исследовании [5], основанном только на наборе данных более раннего эксперимента. Все результаты, полученные в настоящей

работе, были проверены с помощью ряда синтетических тестов. В результате была получена трехмерная скоростная модель исследуемого региона.

Было обнаружено, что аномалии скоростей  $P$ - и  $S$ -волн хорошо коррелируют между собой. На рисунке 2 мы приводим результаты инверсии для

$S$ -модели, так как считаем ее более репрезентативной из-за большей чувствительности  $S$ -волн к температуре и флюидонасыщенности. Мы предполагаем, что исходные магмы образуются на глубине около 150 км, где имеется аномальное выделение летучих из субдуцируемой зоны хребта Исследователей, которая имеет более толстую кору и является более водонасыщенной, чем "нормальная" океаническая литосфера [3, 6]. При проникновении в мантийный клин флюиды могут реагировать с перидотитами и трансформировать их в флогопит или амфиболсодержащие породы, которые характеризуются более низкими температурами плавления [7]. Восходящие частично расплавленные потоки магмы проявляются как низкоскоростные сейсмические аномалии. На глубинах 30-50 км эти потоки образуют большой резервуар (basic magma reservoir на рис. 2). Высокая амплитуда отрицательной аномалии  $S$ -волн и менее интенсивная аномалия  $P$ -волн предполагают наличие значительных количеств расплава внутри этого резервуара.

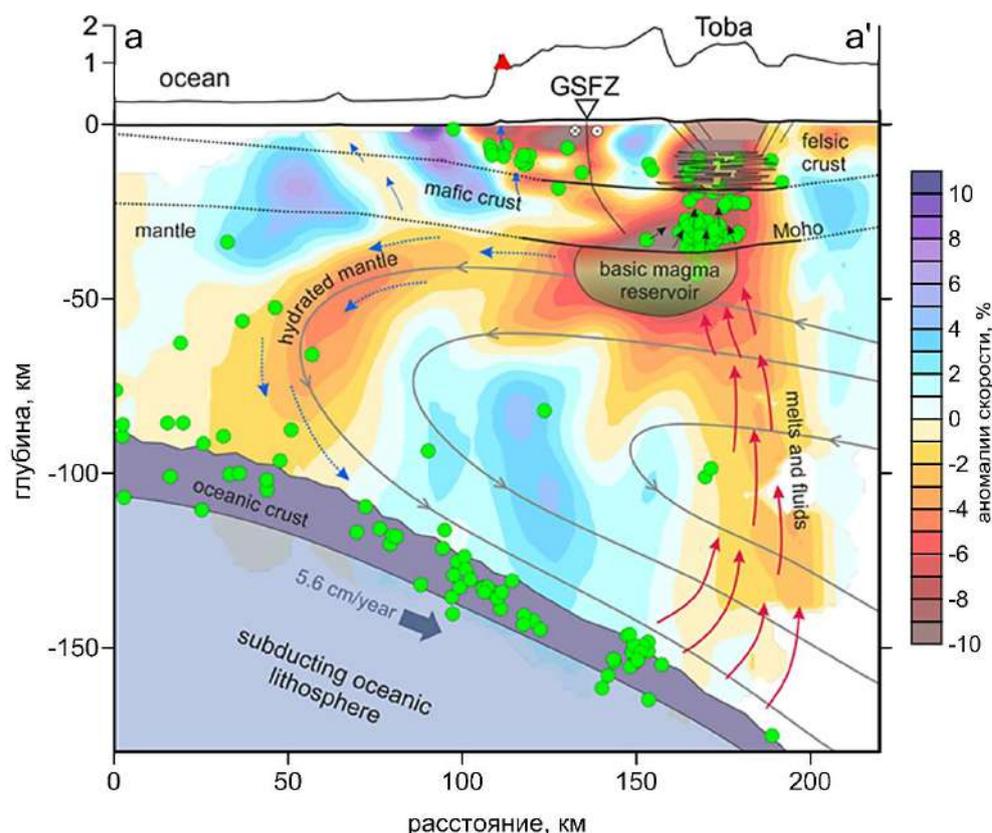


Рис. 2. Результаты инверсии и схематичная интерпретация полученных результатов на вертикальном сечении. Положение сечения в пространстве показано на рис 1, В; треугольник показывает положение вулканического комплекса на линии берега; GSFZ – Суматранская разломная зона; крупные точки маркируют землетрясения; сплошными стрелками показаны направления

движения флюидов и расплавов, пунктирными – потоки гидратированной магмы; границы под вулканом (сплошные линии) приведены по результатам метода функции приемника [8]

Дифференцированные легкие и летучие фракции из резервуара у основания коры обладают достаточной плавучестью, чтобы подняться в верхнюю часть коры и образовать там неглубокий резервуар кислой магмы. Именно эти фракции могут выступать в качестве прямого источника для суперизвержений.

Исследования выполнялись при поддержке проектов РНФ 14-17-00430 и РФФИ 16-35-00099.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Müller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y., Gahagan L.M., Sclater J.G. Digital isochrons of the world's ocean floor // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. - 1997. Vol. 102. - N B2. - P. 3211-3214.
2. Kopp H., Weinrebe W., Ladage S., Barckhausen U., Klaeschen D., Flueh E.R., Papenberg C. Lower slope morphology of the Sumatra trench system // *Basin Research*. - 2008. - Vol. 20. - N 4. - P. 519-529.
3. Fauzi, McCaffrey R., Wark D., Sunaryo, Prih Haryadi P. Lateral variation in slab orientation beneath Toba Caldera, northern Sumatra // *Geophysical Research Letters*. - 1996. - Vol. 23. - N 5. - P. 443-446.
4. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2009. - Vol. 99. - N 1. - P. 194-214.
5. Koulakov I.T., Yudistira B.G. Luehr, Wandono. P, S velocity and VP/VS ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography // *Geophysical Journal International*. - 2009. Vol. 177. - N 3. - P. 1121-1139.
6. Maruyama S., Okamoto K. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone // *Gondwana Research*. - 2007. - Vol. 11. - N 1. - P. 148-165.
7. Peacock S. A. Fluid processes in subduction zones // *Science*. - 1990. - Vol. 248. - N 4953. - P. 329-337.
8. Sakaguchi K., Gilbert H., Zandt G. Converted wave imaging of the Toba Caldera, Indonesia // *Geophysical research letters*. - 2006. Vol. 33. - N 20.

© *Е. В. Касаткина, И. Ю. Кулаков, А. Н. Василевский, 2016*

## **ХАРАКТЕРИСТИКА СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ПАЛЕОЗОЙСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ АРЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ДАННЫМ ГИС**

### ***Никита Константинович Каюров***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)330-79-47, e-mail: KayurovNK@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, зав. лабораторией скважинной геофизики, тел. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@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, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Палеозойский нефтегазоносный комплекс является одним из наименее изученных в пределах всей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Комплекс представлен преимущественно карбонатными, терригенно-карбонатными и метаморфизованными терригенными породами. Преобладают коллекторы со сложной структурой, преимущественно кавернозно-трещиноватые. Насыщение коллекторов обычно имеет четкую стратификацию по разрезу скважин и представлено нефтью, часто с газово-газоконденсатной шапкой, практически повсеместно подстилается высокоминерализованной пластовой водой.

**Ключевые слова:** петрофизика, ГИС, отложения палеозоя, трещиновато-кавернозные коллекторы, карбонатные и метаморфизированные породы.

## **PALEOSOICS COMPLEX TRAPS CHARACTERIZATION OF ARCHIN FIELD (TOMSK REGION) BY GEOPHYSICAL LOGGING DATA**

### ***Nikita K. Kayurov***

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

### ***Viacheslav N. Glinskikh***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Head of the Borehole Geophysics Laboratory, tel. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

### ***Karina V. Sukhorukova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior staff scientist of the Borehole Geophysics Laboratory, tel. (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Paleozoic oil and gas complex is one of the frontiers in the West Siberian oil and gas province. The complex is represented calcareous, clastic-carbonate and metamorphosed clastic

rocks. Traps have a complex structure, mainly it have cavernous-fractured types. Traps usually saturated by oil with gas and condensate caps and underlain by highly mineralized formation water.

**Key words:** petrophysics, logging data, Paleozoic rocks, fractured and cavernous traps, carbonate and metamorphosed rocks.

Отложения палеозоя Западной Сибири являются наиболее слабоизученными в пределах Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, и одновременно затруднительно их изучение из-за сложного геологического строения и гидродинамических условий. Промышленная нефтегазоносность данных отложений доказана в разных регионах Западной Сибири. На юго-востоке нефтегазоносного бассейна открыт ряд залежей нефти, газа и газоконденсата в отложениях палеозоя, среди которых Арчинское месторождение [3, 4].

Данные геофизических исследований скважин (ГИС) позволяют получать информацию о составе, строении и насыщении сложнопостроенных коллекторов. Для значительного продвижения в изучении палеозойских отложений необходим комплексный подход к интерпретации данных ГИС с привлечением данных геолого-технологических исследований и газового каротажа (ГТИ), а также результатов испытаний пластов (ИП) и лабораторных исследований керна и др.

Для определения литологической характеристики палеозойских отложений применялся расширенный комплекс данных ГИС, включающий данные методов радиоактивного (ГК, НГК), электрического (БК, БКЗ), индукционного (ИК), акустического (АК), плотностного (ГГКп) каротажей, кавернометрии (КВ). Совместный анализ этих данных позволяет выделить в разрезе основные встречающиеся литотипы и восстановить объемную литологическую модель изучаемых отложений. Петрофизический анализ проводился с помощью совместного анализа результатов интерпретации данных акустического, нейтронного и плотностного каротажа, с учетом влияния объемной доли глинистого материала и профиля скважины. Для определения насыщения использованы данные электрического, плотностного, нейтронного каротажей, а также данные газового каротажа и результатов испытания пластов. Тип коллектора определен с использованием коэффициента сжимаемости порового пространства [1, 2].

Отметим, что литологические и петрофизические модели, по данным ГИС, увязывались с данными исследований керна. Из-за развитой трещиноватости вынос керна редко достигал 50 % и в основном представлен плотными непроницаемыми разностями. Также затруднительно стандартными методами оценить петрофизические характеристики трещиноватого коллектора на керне, из-за чего верифицировать результаты возможно только по части минимальных значений пористости и проницаемости.

Породы доюрского основания Арчинского месторождения главным образом представлены карбонатными, терригенно-карбонатными и метаморфизованными терригенными породами девона (рис. 1). Карбонатные породы, которые наиболее развиты в разрезе палеозоя, представлены плотными известняками, часто доломитизированными, редко доломитами. По данным плотностного и электрического каротажей, плотность известняков увеличивается с глубиной, уменьшается степень трещиноватости. Часто встречаются прослой хрупкого (что видно из анализа кавернометрии) глинистого известняка. Терригенные разности представлены метаморфизованным аргиллитом до глинистых сланцев, часто трещиноватым.

По породам девона, как правило, развиты породы коры выветривания, мощность которых может достигать 10-30 м. Представлены они преимущественно терригенными (метаморфизованные алевролиты, аргиллиты, глинистые сланцы) и терригенно-карбонатными породами (глинистый известняк, известковистый конгломерат). Отложения коры выветривания или девона несогласно перекрыты тюменской или тогурской свитами.

В карбонатных породах преобладает трещиноватые, кавернозно-трещиноватый и трещиновато-кавернозные типы пустотного пространства. При этом первый тип наиболее развит в верхней части отложений. Вниз по разрезу уменьшается доля трещинных коллекторов и растет доля кавернозных коллекторов.

Это напрямую влияет на распределение коллекторских свойств. Коэффициент пористости трещиноватых и кавернозно-трещиноватых коллекторов варьируется в пределах 0.11-0.18 д.е., редко достигает 0.24-0.26 д.е. В первую очередь это обусловлено высокой концентрацией трещин. Коэффициент проницаемости в этих зонах варьируется в достаточно больших пределах: от 0.5-3 до 100-120 мД.

Коллекторы с преобладанием кавернозной пористости характеризуются коэффициентом пористости 0.04-0.07 д.е. Коэффициент проницаемости таких коллекторов редко превышает 0.1 мД.

По данным каротажа, терригенно-карбонатные породы, представленные глинистыми известняками, обычно обладают завышенной пористостью и проницаемостью. Это обусловлено в первую очередь отсутствием точного значения объемного содержания глинистого материала, а также повышенной кавернозностью, которая зачастую не может быть учтена стандартными алгоритмами. Тем не менее повышенная кавернозность не связана с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами, а обусловлена, скорее всего, механическими свойствами самой породы, и обрушение вызвано недокомпенсацией давления бурового раствора на стенку скважины. В частности, это демонстрируется по результатам интерпретации диаграмм БКЗ, где по полученному пространственному распределению удельного

электрического сопротивления (УЭС) отмечается отсутствие зоны проникновения, а понижение УЭС в ближней зоне обусловлено кавернами [5].

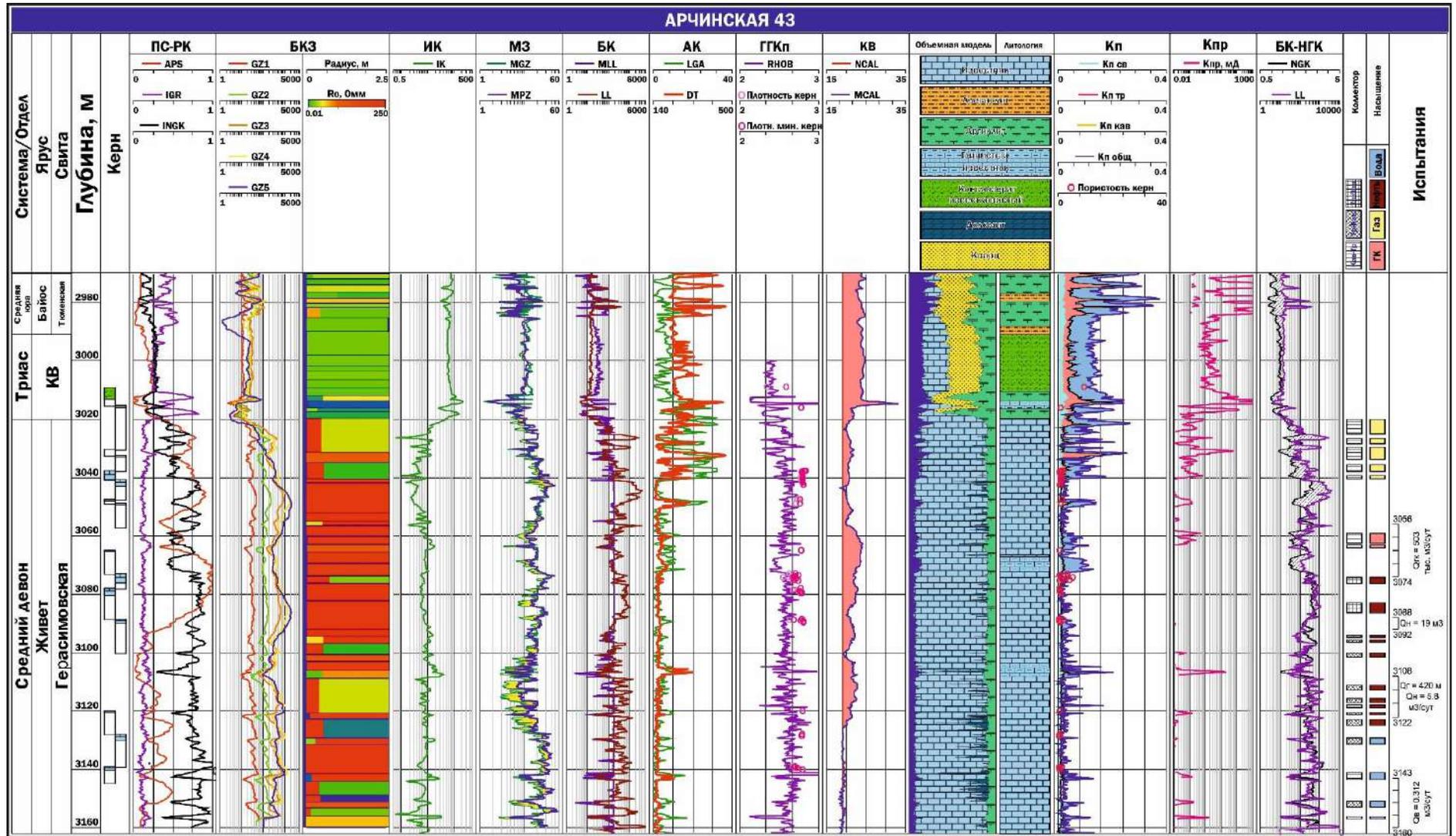


Рис. Сводный планшет данных ГИС и результатов интерпретации по скв. 41 Арчинской площади

Коллекторы в глинистых сланцах (метаморфизованных аргиллитах) обычно имеют трещиноватую природу. Коэффициент пористости редко превышает первые единицы процентов.

Определение насыщения, по данным ГИС, осложнено из-за высокоомной матрицы пород-коллекторов. Тем не менее при численной инверсии данных БКЗ коллекторы, насыщенные газом, газоконденсатом и нефтью, характеризуются УЭС пластов более 20 Ом\*м, при насыщении пластовой водой – около 9-10 Ом\*м. Также информативны данные газового каротажа, где разделение продукта от пластовой воды проводится по сумме предельных (до C<sub>6</sub>) углеводородов (УВ), газовые и газоконденсатные залежи от нефтяных – по отношению метана к тяжелым УВ.

Насыщение коллекторов обычно имеет четкую стратификацию. В верхней части разреза преобладают газовые и газоконденсатные залежи, ниже по разрезу скважины сменяются нефтяными залежами, которые повсеместно подстилаются пластами с высокоминерализованной пластовой водой. В разрезах некоторых скважин вскрыты только коллекторы без газоконденсатной шапки (скв. 44, 46). В скважине 58 получены притоки только пластовой воды. Это может говорить о гидродинамической связи залежей, хотя в разрезах скважин коллекторы, обладающие вторичной пористостью, имеют четкое разделение друг с другом.

Применительно к изучению палеозойских отложений выполнена комплексная интерпретация данных ГИС с привлечением данных ГТИ и результатов лабораторных исследований керна и дана геолого-геофизическая характеристика сложнопостроенных коллекторов Арчинского месторождения на юге Томской области.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (физика горных пород). - М: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004, - 368 с.
2. Заляев Н.З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин. - Минск: Издательство «Университетское», 1990. - 144 с.
3. Конторович В.А., Бердникова С.А., Калинина Л.М. и др. Модель геологического строения и нефтегазоносность зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений в Чузикско-Чижапской зоне нефтегазонакопления // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2006. - № 5-6. - С. 91-102.
4. Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение докембрийско-палеозойских платформенных отложений в юго-восточных районах Западной Сибири // Отечественная геология. - 2006. - № 6. - С. 62-70.
5. 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.

© Н. К. Каюров, В. Н. Глинских, К. В. Сухорукова, 2016

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫКЛЮЧЕНИЯ «БОЛЬШОГО» И «МАЛОГО» ТОКОВ В НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЕТЛЕ**

### ***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

### ***Максим Валерьевич Шарлов***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, заместитель генерального директора, тел. (3952)780-183, e-mail: smv@ierp.ru

### ***Родион Валерьевич Шарлов***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, геофизик, тел. (3952)780-184, e-mail: srv@ierp.ru

### ***Сергей Михайлович Стефаненко***

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

### ***Юрий Александрович Агафонов***

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

Представлены результаты полевого эксперимента по изучению процесса выключения «большого» (9 А) и «малого» (0,75 А) токов в горизонтальной петле размером 500 × 500 м. Показано, что между выключением «большого» и «малого» токов имеются фундаментальные отличия. Для того чтобы оценить их роль при интерпретации ранних стадий индукционных переходных процессов, необходимы специальные исследования.

**Ключевые слова:** метод ЗСБ, горизонтальная петля, выключение тока.

## **TURN-OFF WAVEFORMS OF «HIGH» AND «LOW» CURRENT IN AN HORIZONTAL TRANSMITTER LOOP**

### ***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. +7 (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

### ***Maxim V. Sharlov***

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Deputy Director, tel. (3952)780-183, e-mail: smv@ierp.ru

### ***Rodion V. Sharlov***

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Geophysicist, tel. (3952)780-184, e-mail: srv@ierp.ru

**Sergey M. Stefanenko**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Leading engineer, tel. (383)330-79-08, e-mail: StefanenkoSM@ipgg.sbras.ru

**Yury A. Agafonov**

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

The paper discusses turn-off waveforms of high (9 A) and low (0,75 A) currents measured in a 500 by 500 m transmitter loop. It is shown that turn-off waveforms of high and low current differ fundamentally. Further studies are necessary for an understanding of whether or not this difference should be taken into account in interpretation of the early time TEM response.

**Key words:** TEM sounding method, horizontal loop, current turn-off.

В большинстве случаев в качестве источника первичного поля в методах переходных процессов (МПП) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) используется незаземленная горизонтальная петля. Как известно, на переходную характеристику влияет не только геологическая среда, но также длительность «среза» ( $t_{cp}$ ) и форма выключения тока в генераторной петле, что необходимо учитывать при интерпретации индукционных переходных характеристик.

Длительность выключения тока влияет на отклик переходной характеристики по двум причинам [3]. Во-первых, индукционные эффекты зависят от длительности выключения тока. Во-вторых, и это основная причина, в зависимости от длительности выключения тока изменяется «расстояние», или временной интервал, между окончанием выключения тока и моментом, к которому «привязано» самое раннее время измерения.

В последние 10-15 лет в импульсной индуктивной электроразведке наблюдается тенденция к проведению измерений, начиная со все более ранних времен. Очевидно, снижение начального времени регистрации влечет за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле. Обычно для уменьшения  $t_{cp}$  измерения на ранних временах проводят при малом токе в генераторной петле, при этом в большинстве случаев полагают, что его выключение происходит по линейному закону.

Однако на ранних временах и/или высоких частотах петля вместе с подстилающей верхней частью разреза проявляет свойства, характерные для системы с распределенными параметрами [2]. Процесс выключения тока в такой системе может сильно отличаться от того, который постулируется в традиционной теории и практике импульсной индуктивной электроразведки.

Показано, в частности, что имеет место запаздывание выключения тока в удаленных точках провода петли по отношению к моменту выключения на входе петли, т. е. там, где она подсоединена к коммутатору тока. Для того чтобы учесть влияние этих и других эффектов, необходимо на основе

систематических исследований выяснить, как выключается ток в разных точках периметра генераторной петли в зависимости от размеров петли, тока и сопротивления резистора, подключаемого к петле для минимизации высокочастотных колебаний тока и/или напряжения.

Как правило, в генераторах прямоугольных импульсов тока, используемых в электроразведочной аппаратуре для метода переходных процессов, с целью защиты электронных ключей от перенапряжения параллельно петле подсоединяются включенные навстречу стабилитроны, лавинные диоды или другие элементы, ограничивающие напряжение на нагрузке и, соответственно, ключах. Обычно напряжение ограничения  $U_{огр}$  по порядку величины составляет сотни вольт и более. С одной стороны, это защищает электронные ключи от пробоя,

а с другой – приводит к затягиванию процесса выключения тока в петле, что увеличивает начальное время регистрации ЭДС переходного процесса и, соответственно, минимальную глубину зондирования. По этой причине при изучении верхней части разреза измерения стремятся выполнять при малых токах.

В данном случае амплитуда выбросов напряжения между зажимами петли не превышает  $U_{огр}$ , и выключение тока контролируется не параметрами электронной схемы, а самой петлей и подстилающей ее среды. В этой связи представляется актуальным изучить, как именно выключаются «большой» и «малый» токи в генераторной петле.

Такие исследования проведены летом 2015 г. в Приольхонья отрядом Иркутской электроразведочной кампании при участии сотрудников ИНГГ СО РАН, которыми была предложена научная программа этих работ. В данной статье обсуждается выключение «большого» (9А) и «малого» (0.75А) токов в петле размером 500м x 500м.

Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась аппаратура FastSnap для малоглубинных зондирования методом переходных процессов. Аппаратура включает коммутатор тока (максимальный ток  $I_{max}=10A$ ,  $U_{огр}\approx 400V$ ) и измеритель, управляемые компьютером через адаптер линии связи.

Примем, что один из зажимов петли расположен в начале отсчета, а расстояние, отсчитываемое от этого зажима вдоль провода, соответствует координате  $x$ . Тогда координата другого зажима равна периметру петли  $P$ . Измерение тока выполнено с помощью измерительного токового шунта, который включался в разрыв провода в точках с координатами  $x=0$ ,  $P/4$  и  $P/2$ , где  $P$  – периметр петли. Для минимизации высокочастотных колебаний тока и напряжения, которые возникают при отключении петли от источника, к ее зажимам был подключен резистор с сопротивлением 500 Ом, обеспечивавший режим, близкий к согласованному. Графики выключения «большого» и «малого» токов

в указанных точках периметра петли показаны на рис. 1. Как нетрудно видеть, длительность и форма выключения «большого» и «малого» токов различаются.

В первом случае наблюдается линейный спад тока. Общая длительность процесса выключения ( $t_{cp}$ ) составляет немногим более 100 мкс. Обычно при инверсии индукционных переходных характеристик предполагается, что спад тока происходит по линейному закону [3]. Это предположение в достаточной мере обосновано, поскольку, если при выключении большого тока в индуктивной нагрузке для защиты электронных ключей напряжение на них ограничивается на уровне  $U_{огр}$ , наблюдается именно линейный спад тока. Длительность линейного спада тока в петле можно оценить по формуле [1]:  $t_{cp}=LI/U_{огр}$ , где  $L$  – индуктивность петли. Измеренная в поле индуктивность петли размером 500 м x 500м составляет 5 мГн. Подстановка в выше приведенную формулу  $U_{огр}\approx 400$ В,  $L=5\cdot 10^{-3}$  Гн,  $I=9$ А дает  $t_{cp}\approx 110$  мкс, что согласуется результатами измерений (рис. 1).

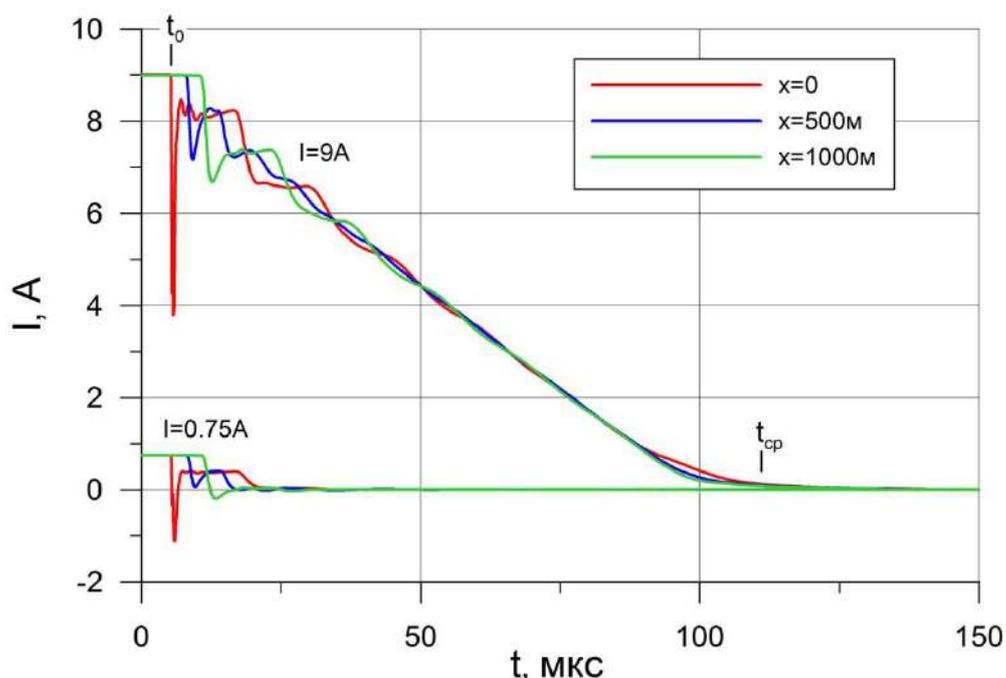


Рис. 1. Графики выключения «большого» (9А) и «малого» (0.75А) токов в различных точках периметра петли размером 500м x 500м. В момент  $t_0$  генератор импульсов тока отключает петлю от источника (аккумулятора)

В пределах линейного участка, который наблюдается на протяжении большей части времени выключения, убывание тока происходит синфазно при любом  $x$ . Эффекты запаздывания заметны только на ранних временах. Очевидно, при  $t > t_{cp}$  последствие от этих «нюансов» не играет существенной роли, и при интерпретации индукционных переходных характеристик можно принять, что выключение тока в любой точке провода петли происходит линейно и синфазно за время  $t_{cp}$ . Это означает, что при моделировании выключения «большого» тока петля может рассматриваться как контур с

сосредоточенными параметрами, а при инверсии переходных характеристик нет необходимости учитывать эффекты запаздывания.

Как можно видеть (см. рис. 1), при выключении «малого» тока эффекты запаздывания играют решающую роль, а форма выключения не имеет ничего общего с линейным спадом. Детали процесса иллюстрирует рис. 2, на котором графики выключения «малого» тока показаны в крупном масштабе.

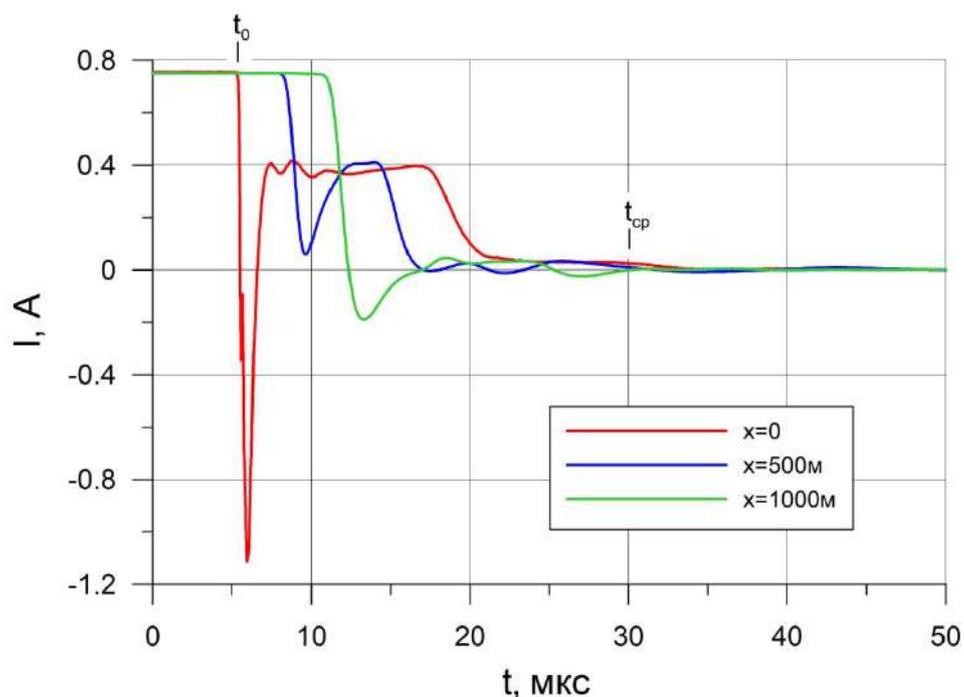


Рис. 2. Графики выключения «малого» ( $0.75 A$ ) тока в различных точках периметра петли размером  $500 \times 500 м$

Для «малого» тока можно определить общее или полное время выключения, т. е. такое, по истечении которого ток становится близким к нулю во всех точках периметра петли. Однако форма и время его выключения в разных точках петли отличаются. В этом случае процесс выключения тока контролируется не индуктивностью петли и параметрами коммутатора ( $U_{огр}$ ), а свойствами системы «провод петли – подстилающая среда», которая является системой с распределенными параметрами. Очевидно, решение прямой и, соответственно, обратной задач импульсной индуктивной электроразведки в предположении, что спад тока по всему периоду петли происходит синфазно и линейно, может приводить к ошибкам при интерпретации ранних частей переходных характеристик. Для того чтобы выяснить, насколько велики эти погрешности, нужно ли их учитывать (и если да, то каким образом), необходимы специальные исследования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. - Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1988. - 224 с.

2. Кожевников Н.О. Выключение тока в горизонтальной незаземленной петле: эксперимент и теория // Геология и геофизика. - 2016. - Т. 57. - № 3. - С. 631-641.
3. Christiansen A.V., Auken E., Viezzoli A. Quantification of modeling errors in airborne TEM caused by inaccurate system description // Geophysics. - 2011. - Vol. 76. - N 1. - P. F43–F52.
4. FastSnap [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://alpha.superioraw.com.au/>

© Н. О. Кожевников, М. В. Шарлов, Р. В. Шарлов,  
С. М. Стефаненко, Ю. А. Агафонов, 2016

## **МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДРЕНАЖНЫХ РАСТВОРОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ**

*Дмитрий Олегович Кучер*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)330-95-36, e-mail: DmitriyKucher89@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

Часть отвалов горнорудной и обогатительной промышленности России из-за определенной сложившейся гидрогеологической обстановки – открытые источники техногенного загрязнения окружающей среды, в которых основными агентами переноса загрязняющих веществ являются протекающие через отвалы растворы, реализующиеся на поверхности

в виде дренажных ручьев, а в подземные горизонты уходят потоки, фильтрующиеся в разных направлениях. Изучены и определены модели распространения токсичных элементов с водными потоками в латеральном и вертикальном масштабах при помощи геофизических методов электротомографии в сочетании с данными физического моделирования.

**Ключевые слова:** гидрогеология, хвостохранилища, фильтрация, электротомография, моделирование, дренажные растворы.

## **MODELING OF MINE DRAINAGE FILTRATION IN GEOLOGICAL ENVIRONMENT BASED ON ELECTRICAL PROSPECTING**

*Dmitry O. Kucher*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., student, tel. (383)330-95-36, e-mail Kucher.do@ocsial.com

*Vladimir V. Olenchenko*

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

Some tailings of mining and mineral processing industry in Russia due to certain existing hydrogeological conditions are open sources of man-made pollution, where the main agents of the pollutants transfer are flowing through the tailings fluids that are realized on the surface in the form of drainage streams, and filtered in different directions solutes penetrate to groundwater aquifer. Models of propagation of toxic elements from water flows in the lateral and vertical scale were studied and identified by means of geophysical methods of electrical resistivity tomography combined with the data of physical modeling.

**Key words:** hydrogeology, tailings, filtration, electrical resistivity tomography, modeling, acid drainage.

На территории России отвалы отходов горноперерабатывающей промышленности (хвостохранилища) зачастую не имеют каких-либо защитных гидротехнических сооружений. Особенно это относится к объектам, сформированным в эпоху раннего СССР. В связи с чем различные дренажные растворы, протекающие по территории хвостохранилищ, далее распространяются на близлежащие территории и загрязняют окружающую среду, а также, по данным электроразведки, проникают на глубину грунтовых вод.

Так, например, Урское хвостохранилище (Кемеровская обл.) представляет собой два отвала высотой 10-12 м, сложенных отходами цианирования первичных золото-полиметаллических руд и руд зоны окисления [3]. На протяжении 80 лет существования хвостохранилища отходы размывались протекающими по территории природными ручьями и сезонными осадками. В результате заболоченная территория, расположенная ниже хвостохранилища, покрыта снесенными отходами (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид отвалов Урского хвостохранилища

При помощи метода электротомографии были построены профили геоэлектрической зональности подповерхностного пространства на территории распространения дренажных потоков до глубины 20 м. Изменение удельного электрического сопротивления (УЭС) на разрезах отражает разную степень насыщенности проникающими дренажными растворами в межпоровом пространстве вмещающих пород. На территории сноса отходов удалось выявить природный разлом, который способствовал проникновению кислых дренажных растворов на глубину грунтовых вод (рис. 2).

Другим примером актуальности метода служит Комсомольский гидроотвал (пос. Комсомольск, Кемеровская область), образовавшийся в результате складирования отходов цианирования Комсомольского золото-извлекательного завода (рис. 3.). Хвостохранилище представляет собой котловину, заполняющуюся общим стоком золотоизвлекательного завода, количество накопленного материала отходов составляет порядка 1 млн. м<sup>3</sup>. Твердое вещество отходов состоит из кварца, полевого шпата, кальцита и

сульфидных. Над поверхностью твердой части образовалось техногенное озеро, которое пополнялось за счет поступления обеззолоченных растворов, жидкой фазы репульвированного кека и природных стоков [1].

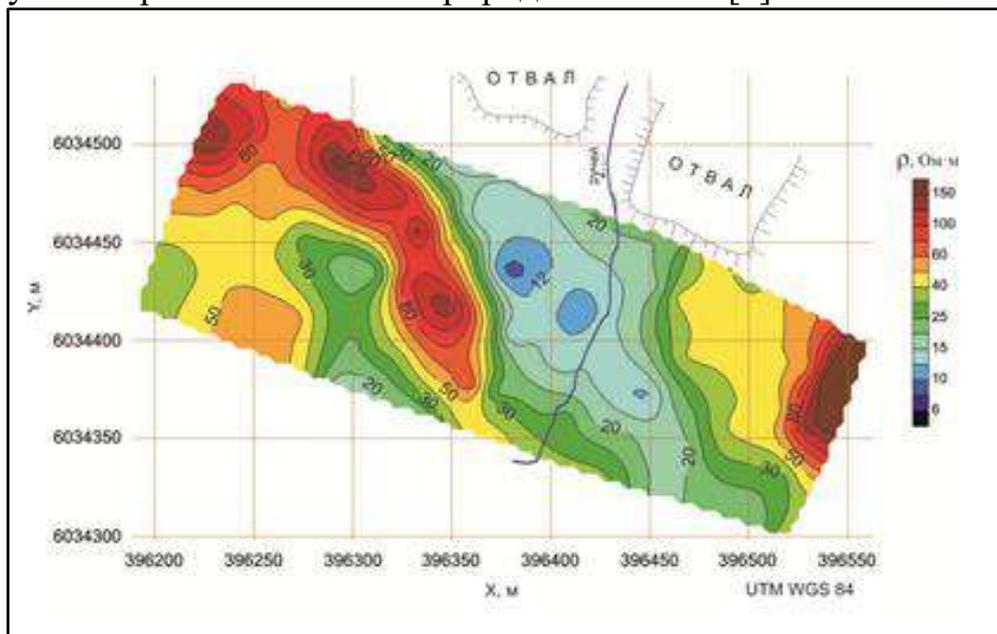


Рис. 2. Карта распределения удельного электрического сопротивления пород на глубине 10 м по данным электротомографии (Урское хвостохранилище). Область пониженного УЭС связана с разломной зоной



Рис. 3. Внешний вид Комсомольского гидротова

При помощи метода электротомографии на территории хвостохранилища была выявлена утечка растворов под стенкой дамбы, в результате чего дренажные растворы загрязняют близлежащие ручьи и грунтовые воды. На спутниковом снимке, совмещенном с картой УЭС на глубине 20 м (рис. 4.), видно, что

с северо-западной стороны дамбы под насыпью присутствует низкоомная зона, которая соответствует просачиванию дренажных растворов.

В приведенных выше примерах агентами переноса кислых растворов в основном являются естественные ручьи, оттаявшие снега, осадки, в связи с чем отсутствуют какие-либо макро-градиенты давления (гидравлического). Естественно предположить, что непосредственно в среде растворы распространяются в основном путем пропитывания грунта как в латеральном направлении, так и за счет сил капиллярного поднятия в вертикальном направлении. Важным параметром характера загрязнения окружающей территории является скорость пропитки геологической среды кислыми дренажными растворами. Скорость и характер распространения фронта зависит от многих параметров, как самих растворов, так и свойств среды. К таковым можно отнести как физические свойства среды и фильтрата (пористость, проницаемость, плотность), так и химические свойства (кислотность, соленость, содержание растворенных твердых веществ).

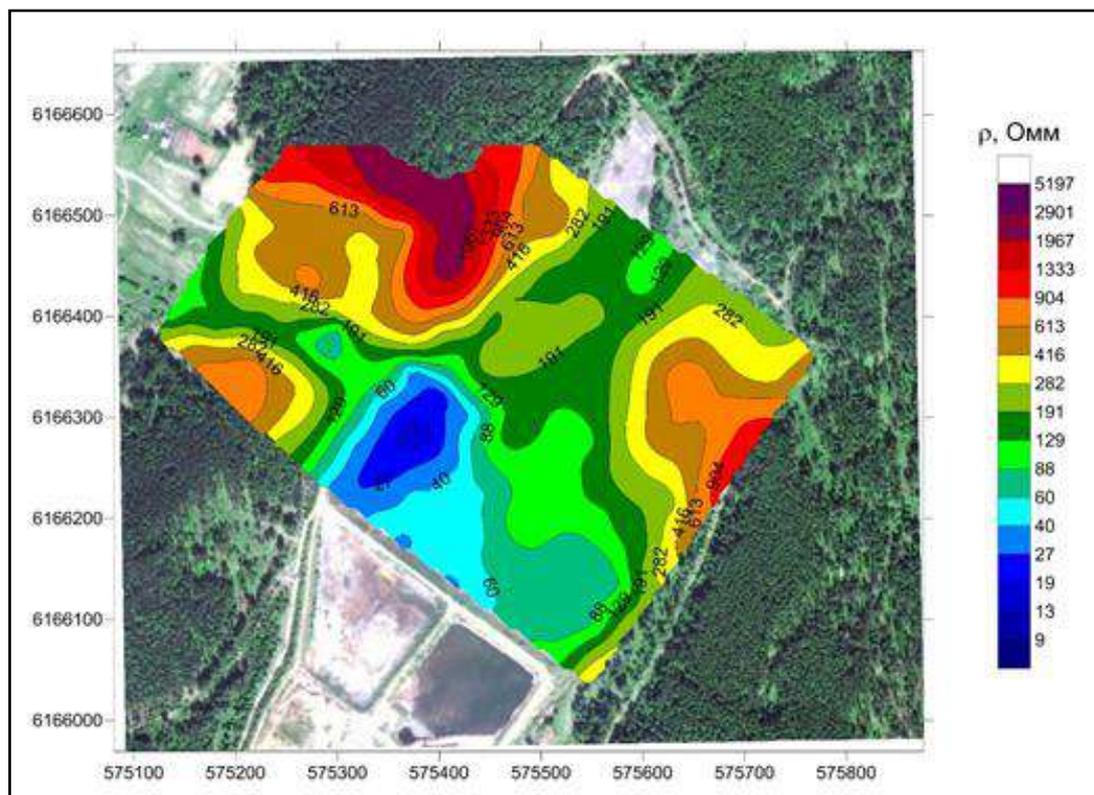


Рис. 4. Карта распределения удельного электрического сопротивления пород на глубине 20 м по данным электротомографии (Комсомольское хвостохранилище)

На основе полученных данных электротомографии можно сделать вывод, что техногенные растворы проникают на глубину подземных вод, а также происходит их унос совместно с поверхностными талыми водами, ручьями,

реками, а глубина и площадь распространения загрязнения сильно зависит от геологической структуры вмещающих пород.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саева О.П. Взаимодействие техногенных дренажных потоков с природными геохимическими барьерами: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. - Новосибирск, 2016. - 168 с.
2. Халатов С.Ю., Балков Е.В., Бортникова С.Б., Саева О.П., Корнеева Т.В. // Инженерная геофизика 2013: 9-я международная конференция и выставка (Геленджик, 22-26 апреля 2013 г.). - 2013. - С. E15
3. Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Саева О.П. Направления подземного и поверхностного стоков с хвостохранилищ горнорудного производства по данным геофизических и геохимических исследований // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13-25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": сб. материалов в 3 т. - 2015. - Т. 2. - С. 305-310.
4. Abrosimova N., Bortnikova S., Gaskova O., Yurkevich N., Ribkina E. Results of mine tailings - water interaction: A column leaching study on the example of waste materials of Komsomolsky gold processing plant // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. Surveying Geology and Mining Ecology Management (Albena, Bulgaria, 18-24, June, 2015): Conference proceedings. - 2015. – Vol. 1 (5). - P. 765-770.

© Д. О. Кучер, В. В. Оленченко, 2016

## **ДВУМЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА ВБЛИЗИ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПЛАСТА ИЛИ РАЗЛОМА**

*Дмитрий Юрьевич Кушнир*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383) 32-94-43 (доб. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

*Глеб Владимирович Дятлов*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

*Александр Игоревич Макаров*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 152), e-mail: Alexanderi.Makarov@bakerhughes.com

*Юлий Александрович Дашевский*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, директор, тел. (383)332-94-43 (доб. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

Во время бурения для оптимального расположения ствола скважины широко используются приборы электромагнитного каротажа. По данным, поступающим на поверхность, требуется оценить электромагнитные параметры среды, в которой находился прибор. Использование данных электромагнитного каротажа, особенно для интерпретации в реальном времени, обычно ограничивается локальным подбором одномерной слоистой модели среды на некотором интервале траектории скважины. На практике встречаются ситуации, в которых среда не может быть достаточно точно локально описана в рамках слоистой модели, например, в случае выклинивания пласта, субвертикального разлома, стратиграфического несогласия и др. Для интерпретации измерений приборов в таких сложных геологических структурах предлагается использовать двумерную модель среды с плоскими границами, параллельными оси простирания структуры.

В рамках двумерной геоэлектрической модели среды разработан комплекс программ для прямого моделирования измерений приборов электромагнитного каротажа, созданный на основе метода граничных интегральных уравнений. На базе прямого моделирования предложен алгоритм инверсии для определения параметров двумерной модели среды по данным электромагнитного каротажа. Ядром инверсии является метод поиска глобального минимума DIRECT. Работоспособность предложенного алгоритма инверсии продемонстрирована на синтетических данных приборов VisiTrak и AziTrak.

**Ключевые слова:** электромагнитный каротаж, интерпретация данных каротажа, двумерная геоэлектрической модели среды, ось простирания, геонавигация, метод глобальной оптимизации DIRECT, прибор AziTrak, прибор VisiTrak.

## 2D INVERSION-BASED INTERPRETATION OF SYNTHETIC RESISTIVITY DATA NEAR PINCHING-OUTS OR FAULTS

*Dmitry Yu. Kushnir*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

*Gleb V. Dyatlov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

*Alexander I. Makarov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 152), e-mail: Alexanderi.Makarov@bakerhughes.com

*Yuliy A. Dashevskiy*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Professor, Director, tel. (383)332-94-43 (ext. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

Resistivity tools are widely used while drilling for optimal well placement. Challenges, though, include processing the logging data and reconstructing the parameters of the formation around the tool. Usually, interpretation of the data comes to selection of the parameters of the 1D layered formation for which the simulated signals fit locally the measured data on a selected wellbore interval. However, in the field, more complex scenarios occur; for example, pinching-out of bed, sub-vertical faults, and unconformity. In these situations, there is no appropriate local 1D layered formation that quite fits the logging data. Therefore using locally a 2D formation model with plane boundaries parallel to some strike axis is recommended.

The software package was developed for forward simulation of the resistivity tool responses in the 2D geoelectrical formation model. Forward simulation is based on the method of boundary integral equations. An inversion algorithm was proposed for logging the data by varying the 2D formation parameters. The computational core of the inversion is the global minimum search algorithm DIRECT. The algorithm is substantiated using the synthetic logging data of the VisiTrak and AziTrak tools.

**Key words:** resistivity logging, logging data interpretation, 2D geoelectrical formation model, strike axis, geosteering, global minimum search algorithm DIRECT, VisiTrak tool, AziTrak tool.

Для повышения эффективности геонавигации, в частности, при проводке наклонных и горизонтальных скважин в пластах коллекторов малой мощности используются данные электромагнитного каротажа. Улучшение характеристик приборов электромагнитного каротажа приводит к увеличению многообразия сигналов, включая азимутально-чувствительные, с различной глубиной исследований. Прибор AziTrak имеют глубину исследований до 5 м [1]. Сверхглубинный каротажный прибор VisiTrak отражает информацию о геоэлектрических свойствах среды до 30 м [2]. Совместная интерпретация данных различных приборов, особенно в сложных геологических условиях, является актуальной задачей.

Один из стандартных способов совместной интерпретации данных электромагнитного каротажа – локальный подбор одномерной слоистой модели среды на некотором интервале траектории скважины [3]. В большинстве случаев этот способ обработки дает хорошие результаты и используется в режиме реального времени. На практике встречаются ситуации, в которых прибор находится в окрестности более сложной геологической структуры, такой как выклинивание пласта, субвертикальный разлом, стратиграфическое несогласие и др. В таких ситуациях слоистая модель является неудовлетворительной для описания среды, особенно при использовании сверхглубинных измерений.

В данной работе интерпретацию данных каротажа в более сложных геологических структурах предлагается проводить с использованием двумерной геоэлектрической модели среды с плоскими границами параллельными оси простирания структуры. Для такой модели среды разработан комплекс программ прямого моделирования и инверсии измерений приборов электромагнитного каротажа, созданный на основе метода граничных интегральных уравнений [4]. Инверсия осуществляется при помощи алгоритма поиска глобального минимума DIRECT [5]. Параметрами инверсии являются положения плоских границ среды и сопротивления областей двумерной геоэлектрической модели среды. Используемый алгоритм позволяет не только искать глобальный минимум, но и находить локальные минимумы и области эквивалентности в пространстве параметров.

В работе рассмотрены два модельных примера, основанных на двумерной геоэлектрической модели среды. Первый – выклинивания продуктивного пласта (рис. 1, слева). Результат интерпретации синтетических сигналов, полученных с помощью прямого 2D-моделирования, в рамках поинтервальной (один интервал составляет 10 м) слоистой одномерной модели среды приведен на рис. 1 (справа). Хорошее качество восстановленной модели позволяет сделать предположение о том, что произошло действительно выклинивание пласта. Положение и угол ближайшей к траектории границы, а также сопротивления областей определяются достаточно точно в рамках поинтервальной одномерной инверсии. Поэтому с помощью двумерной инверсии будем подбирать положение  $v$  и угол  $dip$  дальней границы (рис. 1, слева). Получены результаты двумерной двухпараметрической инверсии с использованием приборов AziTrak и VisiTrak и инверсии с использованием только прибора AziTrak. На рис. 2 приведена невязка на некотором шаге алгоритма DIRECT между сигналами, зависящими от параметров  $dip$  и  $v$ , и “истинными” сигналами при  $dip = 90$ ,  $v = -3$ . Под невязкой понимается среднеквадратичное отклонение всех сигналов с учетом стандартной ошибки приборов по всем точкам некоторого интервала траектории. По сгущению прямоугольников и их цвету (рис. 2, слева) видно, что при совместном использовании обоих приборов алгоритм инверсии сходится

к точному решению. Если же использовать только прибор AziTrak, то невязка во всей рассматриваемой области меньше одной стандартной ошибки прибора (рис. 2, справа), т. е. добавление случайного шума приведет к невозможности определения положения нижней границы. Таким образом, с использованием прибора VisiTrak точность определения нижней границы существенно повышается.

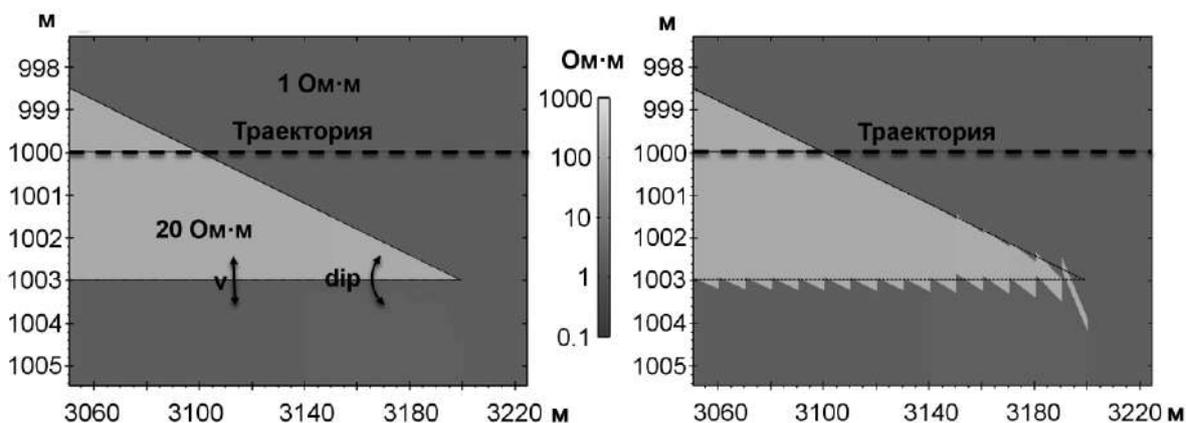


Рис. 1. Двумерная модель выклинивания пласта (слева) и результат интерпретации в рамках поинтервальной слоистой одномерной модели (справа)

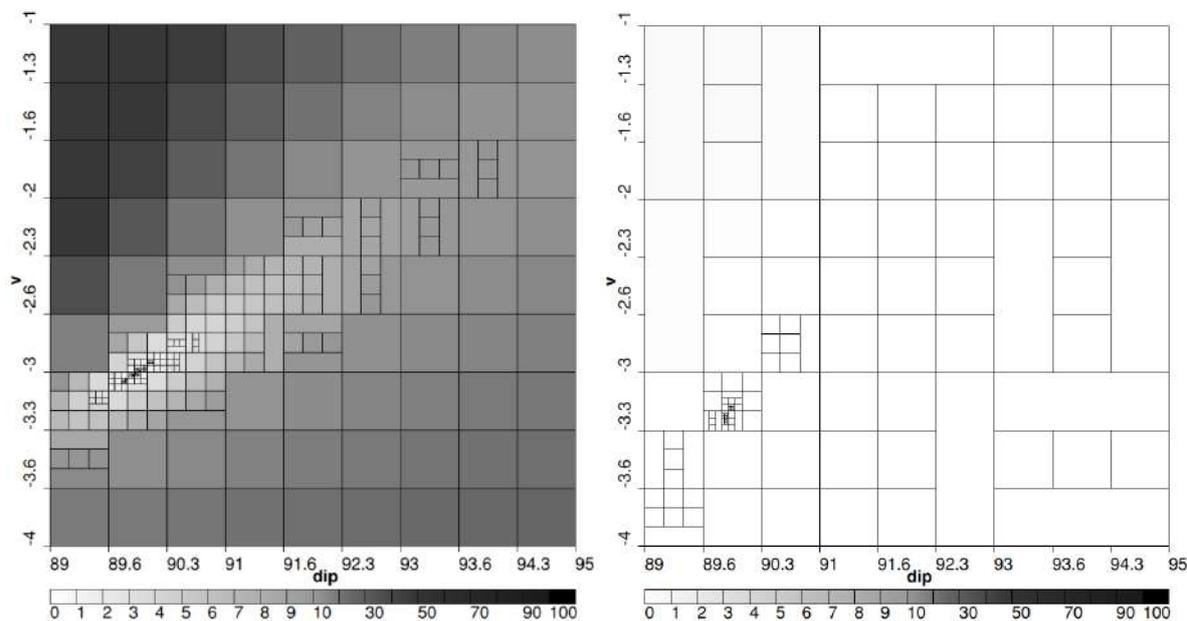


Рис. 2. Невязка в случае выклинивания пласта с использованием прибора VisiTrak (слева) и без использования (справа), единица измерения шкалы цветовой гаммы – стандартная ошибка прибора

Второй модельный пример – субвертикальный разлом (рис. 3, слева). В этом случае интерпретация синтетических сигналов в рамках поинтервальной слоистой модели в окрестности разлома не согласуется с оригинальной

моделью (рис. 3, справа). Более того, на интервале 1100-1115 м вдоль траектории невозможно точно определить, где находится продуктивный пласт, сверху или снизу. Лишь на удалении 10 м до и 20 м после разлома удастся подобрать локальную слоистую модель среды. В связи с этим обстоятельством предлагается следующая схема инверсии в двумерной модели в области разлома. Слоистая модель среды фиксируется, а положение  $h$  и сдвиг слоев  $v$  в области разлома варьируются (рис. 3, слева). Получены результаты двумерной двухпараметрической инверсии как с использованием прибора VisiTrak, так и без него. На рис. 4 приведена невязка на некотором шаге алгоритма DIRECT в зависимости

от  $h$  и  $v$ . “Истинные” сигналы получены при  $h = 0$ ,  $v = 1$ . Из рис. 4 (слева) видно, что в плоскости параметров  $h$ ,  $v$  выделяются три полосы с локальными минимумами:  $v \approx -5$ ,  $v \approx -2$  и  $v \approx 1$ . Первая полоса соответствует тому, что пласт после разлома сдвинулся вниз, вторая – не сдвинулся, третья – сдвинулся вверх. Если смотреть по величине невязки, то алгоритм сходится к значениям первоначальной модели,  $h = 0$ ,  $v = 1$ . В остальных двух полосах невязка превосходит 10 стандартных ошибок прибора. Вариант  $h = 0$ ,  $v = -5$  является зеркальным отражением первоначальной модели относительно траектории, и невязка в этом случае велика из-за несогласованности азимутально-чувствительных измерений. При использовании только прибора AziTrak алгоритм также сходится к параметрам первоначальной модели с выделением трех подобластей с локальными минимумами (рис. 4, справа). Отметим, что в этом чувствительность к параметру  $v$  падает, о чем свидетельствует наличие светлых зон на рис. 4 (справа), которых нет в левой части этого же рисунка. Чувствительность к параметру  $h$  достаточно высока в обоих случаях, так как приборы пересекают границу с большим контрастом проводимостей 100:1, а параметр  $h$  отвечает за положение этой границы.

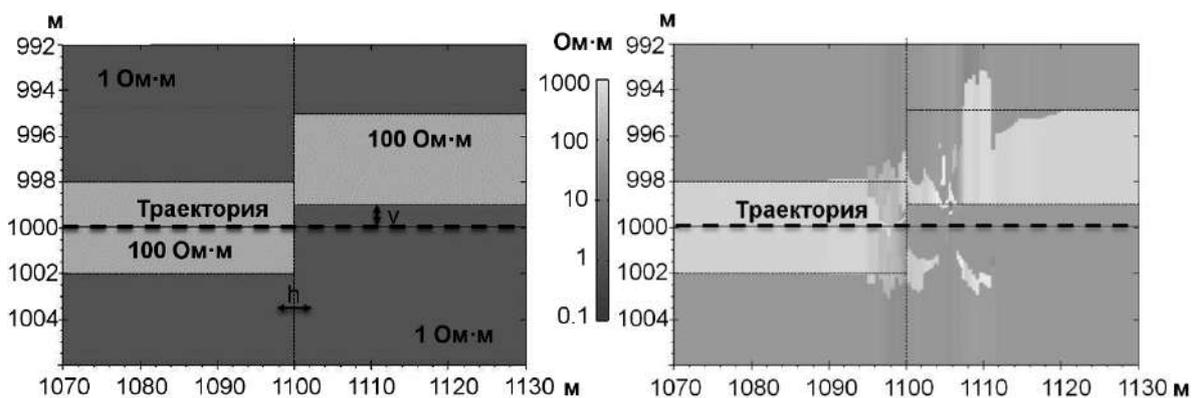


Рис. 3. Двумерная модель разлома (слева) и результат интерпретации в рамках локальной слоистой одномерной модели (справа)

В работе приведены примеры одномерной и двумерной интерпретации синтетических данных электромагнитного каротажа, полученных вблизи распространенных геологических структур: выклинивания пласта и разлома. Для данных примеров описаны схемы и параметры двумерной инверсии, в результате которой восстанавливаются параметры геоэлектрической модели. Использование сигналов приборов с глубиной исследования до 30 м позволяет определить параметры искомой модели существенно точнее.

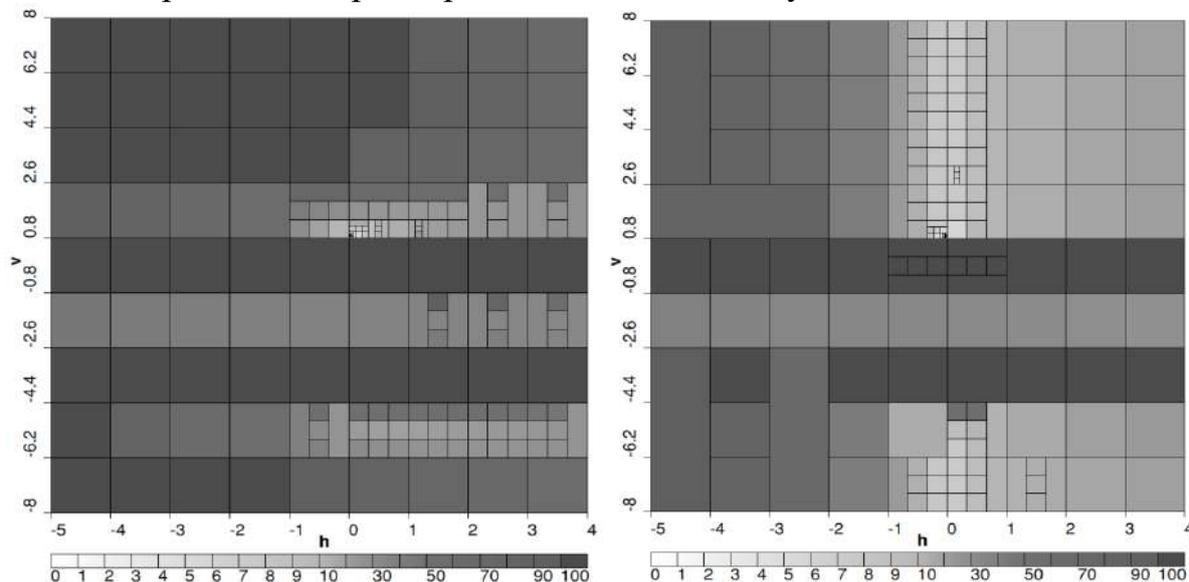


Рис. 4. Невязка в случае разлома с использованием прибора VisiTrak (слева) и без использования (справа)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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, 24-27 September, 2006.
2. 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, 18-22 May, 2014.
3. 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. - Vol. 17. - P. 109-127.
4. Dyatlov G.V., Onegova E.V., Dashevsky Yu.A. Efficient 2.5D electromagnetic modeling using boundary integral equations // Geophysics. - 2015. - Vol. 80 (3). - P 163-173.
5. Jones D.R., Perttunen C.D., Stuckmann B.E. Lipschitzian optimization without the lipschitz constant // Journal of Optimization Theory and Applications. - 1993. - Vol. 79 (1). - P. 79-157.

© Д. Ю. Кушнир, Г. В. Дятлов, А. И. Макаров, Ю. А. Дашевский, 2016

## **ОЦЕНКА ГЛУБИННОЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ МТЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОПОРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ПРОФИЛЕ 1-СБ**

### ***Анастасия Александровна Белая***

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, кандидат технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)222-42-03, e-mail: nz1@ngs.ru

### ***Елена Юрьевна Гошко***

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)230-04-98, e-mail: goshco@mail.ru

### ***Надежда Валерьевна Симанкович***

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: nadyasimankovich@gmail.com

### ***Георгий Михайлович Тригубович***

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

При интерпретации данных МТЗ в условиях, когда целевые структуры проходят вдоль профиля или пересекают его, восстановление среды с помощью 1D и 2D-инверсии может приводить к неверному геологическому прогнозу. В работе приведены результаты 1D, 2D-инверсии и 3D-интерпретации данных МТЗ вдоль участка опорно-геофизического профиля 1-СБ, проведен анализ эффективности выбранных методов, дана геологическая привязка аномалообразующих объектов разреза электросопротивлений верхней части земной коры.

**Ключевые слова:** 3D-интерпретация данных МТЗ, 2D-инверсия данных МТЗ, 1D-инверсия данных МТЗ, EM-DataProcessor.

## **THE ANALYSIS OF THE DEEP GEOELECTRIC MODEL USING MT DATA AND 3D MODELING FOR THE BASE GEOPHYSICAL PROFILE 1-SB**

### ***Anastasiya A. Belaya***

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)222-42-03, e-mail: nz1@ngs.ru

### ***Elena Yu. Goshko***

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Ph. D., Leading Researcher, tel. +7 (383) 230-04-98, e-mail: goshco@mail.ru

### ***Nadezhda V. Simankovich***

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

**Georgiy M. Trigubovich**

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

In MT data interpretation when the target structures extend along or through the profile the parameterization of medium using 1D, 2D inversion may cause incorrect geological forecast. The paper considers results for 1D, 2D inversion and 3D interpretation of MT data on the part of regional profile. The analysis of the efficiency of the selected methods is given. The geological linkage is given for anomalous objects from cross sections of electrical resistivity of the upper part of the Earth's crust.

**Key words:** 3D interpretation MT data, 2D inversion MT data, 1D inversion MT data, EM-DataProcessor.

Стандартными способами интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) являются 1D- и 2D-инверсии [1]. При этом 1D-инверсия может применяться только для восстановления самой верхней части разреза (ВЧР). 2D-инверсия в случае, если все значимые неоднородности имеют преимущественно вытянутый ортогонально профилю характер, может давать достаточно адекватный реальности результат. При этом если это не так, то применение 2D-инверсии может приводить к появлению ложных глубинных аномалий, вызванных боковым влиянием проводящих неоднородностей.

Поэтому цель данной работы состоит в том, чтобы для построенной 2D-модели провести верификацию с использованием 3D-моделирования и, выделив участки существенной невязки, провести в конкретных зонах профиля трехмерный подбор. Особое внимание в данной работе уделяется глубинным областям с аномально высокой проводимостью, поскольку даже с учетом того, что мы располагаем только данными профильных измерений, из-за достаточно больших аномалий существует возможность их адекватного трехмерного восстановления [2].

Рассмотрим результаты исследований на участке регионального профиля, план расположения физ. наблюдений представлен на рис. 1, шаг измерений составлял 1 км. Также в ходе предварительного анализа измеренные кривые МТЗ вдоль регионального профиля были разбиты на зоны согласно направлению расположения целевых структур относительно участка профиля (рис. 1), исходя из геологической информации. Для получения начального приближения исследуемой среды была проведена 1D-инверсия данных МТЗ, однако по ее результатам судить об адекватности полученного геоэлектрического разреза сложно, поскольку структуры имеют сложное расположение относительно профиля, в том числе проходят вдоль него.

Для получения более детальной картины среды далее была проведена 2D-инверсия, результаты которой представлены на рис. 2. В ходе нее были получены более четкие контуры проводящих зон, обозначенные штриховкой на рис. 2.

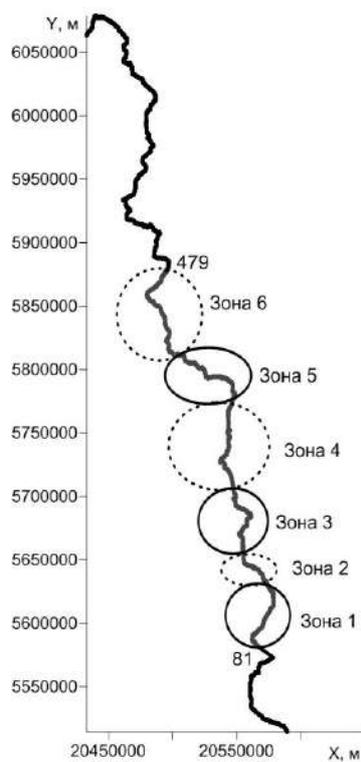


Рис. 1. План расположения физ. наблюдений

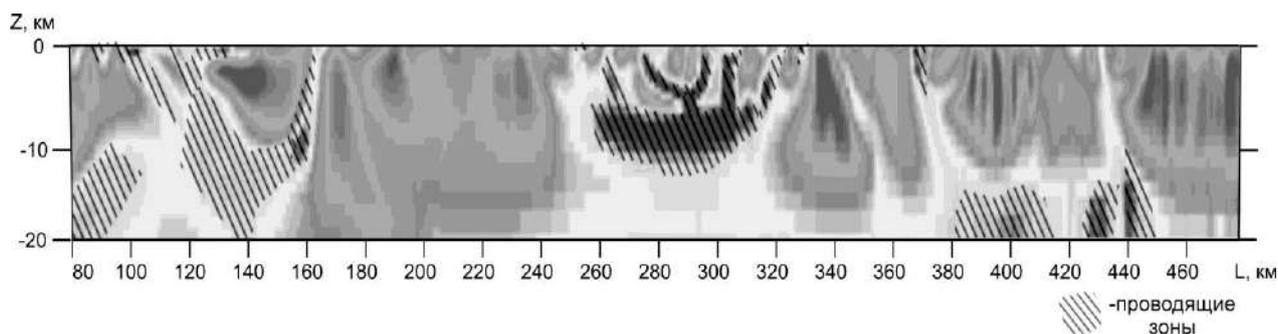


Рис. 2. Геоэлектрический разрез вдоль регионального профиля, полученный по результатам 2D-инверсии (разрез предоставлен ООО «Северо-Запад»)

Таким образом, целью 3D-интерпретации является выявление и параметризация областей аномальной проводимости в ВЧР и выделение геологических структур на глубинах до 20 км, перспективных на обнаружение минеральных ресурсов. Геоэлектрический разрез, полученный по результатам 3D-интер-претации, представлен на рис. 3.

Отметим, что сильнее всего геоэлектрические разрезы, полученные с помощью 2D-инверсии и 3D-интерпретации, отличаются в начале профиля (рис. 3), что соответствует зоне 1 (рис. 1). По результатам 3D-интерпретации в этом месте профиль проходит по краю проводящих структур (рис. 5), детальное восстановление которой с помощью 3D-моделирования позволило исключить появление ложных проводников на глубинах до 20 км (рис. 3). Такие «ложные» проводники были исключены и на других участках профиля, на рис. 3 они выделены особой штриховкой. Сложная структура также располагается ортогонально профилю в области зоны 5 и уходит к зоне 6, здесь профиль проходит по краю проводящей структуры, которая дальше простирается ортогонально профилю (рис. 5).

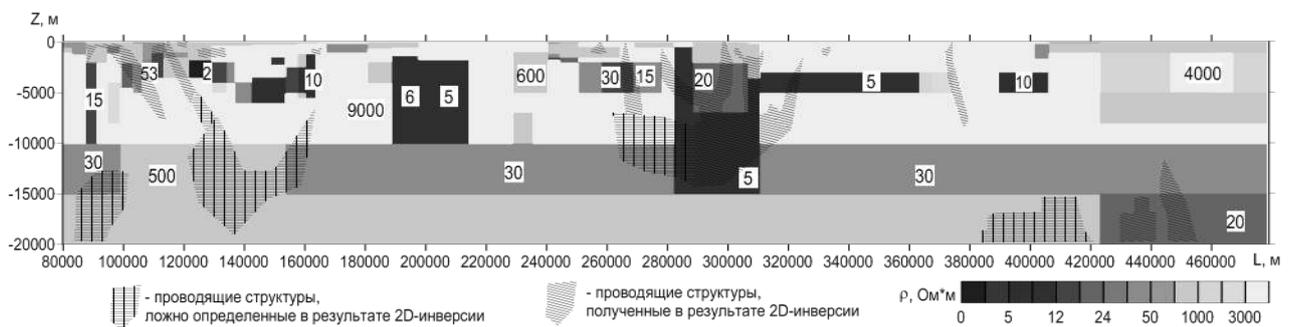


Рис. 3. Геоэлектрический разрез вдоль регионального профиля, полученный по результатам 3D-интерпретации, с наложением проводящих структур, полученных по 2D-инверсии

Геоэлектрический разрез был сопоставлен с результатами интерпретации сейсмического разреза земной коры, построенного вдоль той же линии [3], и данными новейшей государственной геологической карты третьего поколения (лист М-50, масштаб 1 : 1 000 000). Сравнение показало, что проводящие структуры, намеченные по результатам 2D-инверсии и изображенные на рис. 4 кривой штриховкой, в большинстве случаев совпадают с зонами крупных разломов: Дальнебыркинского и Пограничного в окрестности 100-го км, Куренгинского на 250-260 км, Южно-Борщовочного на 310 км, Монголо-Охотского на 365 км.

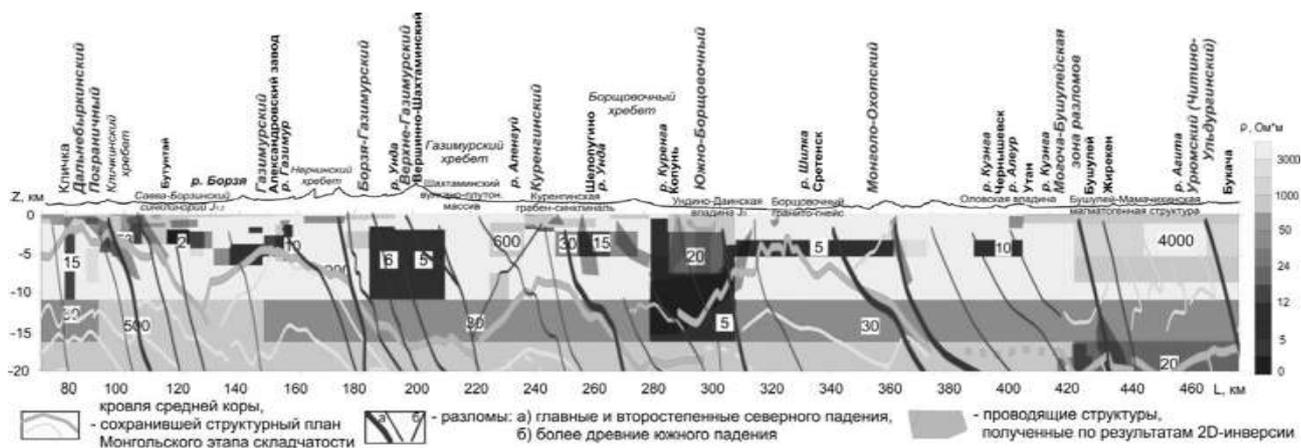


Рис. 4. Геоэлектрический разрез вдоль регионального профиля, полученный по результатам 3D-интерпретации, с наложением сейсмического разреза

Аномально проводящие блоки в верхней коре на геоэлектрическом разрезе, полученном с помощью 3D-интерпретации (рис. 3), также находят свою геологическую привязку. Так, первый проводящий блок на 80 км отвечает Тасуркайской интрузивной гранито-гнейсовой купольной структуре (рис. 4). Протягивающийся от 100 до 160 км Савва-Борзинский синклиниорий, заполненный относительно молодыми юрскими осадками, имеет под собой синхронно прогнутый до глубины 7 км проводящий слой (2-10 Ом·м), аккумулирующий, возможно, углистые, графитизированные осадки. На участке геоэлектрического разреза от 190 до 210 км находится крупный высокопроводящий (5-6 Ом·м) блок. Аномальные геоэлектрические свойства его обусловлены, вероятно, расположением в пределах геодинамически активного Монголо-Сибирского горного пояса, в коре которого происходили сдвиго-надвиговые перемещения вдоль разломов в мезозое. Глубокий (до 15 км глубиной) и широкий (от 280 до 310 км) проводящий объект расположен под Борщовочным хребтом. Это южная граница области влияния трансрегионального Монголо-Охотского коллизионного шва, вдоль которого происходило давление и аккреция Сибирского континента на Амурскую плиту в направлении с севера на юг [4]. Аномальный проводящий блок расположен в пределах Унда-Шилкинского полиметаллически-редкометального золоторудного района.

Представленный на рис. 5 геоэлектрический разрез в объеме с наложенными проводящими объектами 3D-модели демонстрирует направление протяженности структур относительно регионального профиля. По рис. 5 видно, что неоднородная проводящая структура простирается вдоль всего профиля, что значительно затрудняет ее параметризацию с помощью 2D-инверсии. Также разрез содержит геометрически сложные проводящие структуры до глубины ~5 км.



Рис. 5. Геоэлектрический разрез вдоль регионального профиля в объеме и проводящие объекты 3D-модели, полученные по результатам 3D-интерпретации

Все расчеты выполнялись в программном комплексе EM-DataProcessor. Отметим, что для более детального восстановления целевых структур в зонах 1, 5 и 6 (рис. 5), где профиль проходит по их краю, необходимо проведение дополнительных измерений, ортогональных к основному профилю.

Таким образом, проведение 3D-интерпретации вдоль опорных геофизических профилей позволяет исключить появление ложных аномалий на глубине и получить представление о простирации проводящих структур [5].

#### 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. - Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины (электронная публикация), 2012..
3. Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. О существовании в земной коре Юго-Восточного Верхоянья домеловых магматических дуг, подобных Удско-Мургальской дуге // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Материалы докладов Всероссийской научной конференции (Магадан, 24-25 ноября 2015 г.). - Магадан: ООО "Типография", 2015. - 284 с.
4. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. - 2003. - Т. 22. - № 6. С. 7-41.
5. Тригубович Г.М., Белая А.А., Чернышев А.В., Симанкович Н.В. Комплексная интерпретация электроразведочных данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе

EM-DataProcessor // XI Международные научный конгресс и выставка “Интерэкспо Гео-Сибирь–2015”: Сб. материалов в 3 т. - Т. 2. - № 2. - С. 237-242.

© А. А. Белая, Е. Ю. Гошко, Н. В. Симанкович, Г. М. Тригубович, 2016

## **АКТИВНЫЙ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА**

### ***Виктор Михайлович Соловьев***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора; 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)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

### ***Владимир Николаевич Кашун***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, главный инженер, тел. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

### ***Семен Александрович Елагин***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

### ***Анастасия Евгеньевна Шенмайер***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: shen@gs.nsc.ru

### ***Николай Александрович Серезжников***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)333-25-35, e-mail: bestyah21@gs.nsc.ru

Представлены материалы режимных вибросейсмических исследований в Северо-западной части Алтае-Саянского региона. Даны оценки точности и повторяемости волновых полей по данным мониторинга. Приведены ряды режимных вибросейсмических наблюдений за 2014 г. на ряде сейсмостанций на удалениях до 200 км от вибратора ЦВ-40. Обсуждены причины выявленных вариаций времен пробега продольных волн по данным мониторинга.

**Ключевые слова:** вибратор ЦВ-40, коррелограммы, дебаланс, вибросейсмический мониторинг, вариации времен пробега волн.

## **ACTIVE VIBROSEISMIC MONITORING IN ALTAY-SAYAN REGION**

### ***Victor M. Solovyev***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, Deputy director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

### ***Vladimir N. Kashun***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, Chief Engineer, tel. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

***Semen A. Elagin***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, 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, Koptyug Prospect 3, Junior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: shennastya@gs.nsc.ru

***Nikolai A. Serezhnikov***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Junior Engineer, tel. (383)333-25-35, e-mail: bestyah21@gs.nsc.ru

Provided materials represent regime vibro-active monitoring in the North-West part of Altay-Sayan region. Given the accuracy of assessment and monitoring wave-field data on regime vibro-seismic observation series at distance up to 200 km from heavy weight CV-40 vibrator. Several reasons of variations in time travel reported.

**Key words:** CV-40 heavy-weight vibrator, correlogram, debalance, vibro-seismic monitoring, variations in time travel.

Одним из высокоэффективных методов геофизического мониторинга, по мнению многих исследователей, в ближайшие годы может стать активный вибросейсмический мониторинг с мощными вибраторами, развиваемый в Сибирском отделении Российской академии наук [1, 3]. Связано это как с широкими возможностями вибросейсмического метода по изучению напряженно-деформированного состояния среды в очаговых зонах готовящихся землетрясений, так и со значительным техническим переоснащением мониторинга. Главный объем мониторинговых работ с мощными вибраторами, безусловно, выполнен в Алтае-Саянском регионе (рис. 1). За тридцатипятилетний период исследований накоплен значительный экспериментальный материал по регистрации волновых полей от мощных вибраторов, изучению физических процессов в «ближней» и «дальней» зонах от дебалансных 40-100-тонных вибраторов, а также ряды длительных вибросейсмических наблюдений [1-3].

Технология работ. Вибросейсмические наблюдения от 40 100-тонных вибраторов выполнялись на профильной и площадной сети и станциях режимных наблюдений (рис. 1) с целью отработки технологии экспериментальных вибросейсмических исследований, изучения волновых полей от мощных вибраторов и накопления рядов наблюдений в режимных точках. При работе со 100-тонным вибратором применялись дебалансы со статическими моментами 0.126 и 0.177 т•м; при работах с 40-тонным вибратором они составляли 46.2кг•м (средние дебалансы) и 56.8кг•м (тяжелые дебалансы). Диапазоны частот зондирования выбирались в соответствии с планируемыми экспериментами и составляли, как правило, 5.469-8.496 Гц для вибратора ЦВМ-100, 6.25-9.57 и 7.91-11.23 Гц для вибратора ЦВ-40. Контроль за излучаемым сигналом осуществлялся с использованием датчиков, установленных на платформе и под вибратором (в ближней зоне) [1-3]. Время накопления сигналов составляло в среднем 40-60 мин. Высокая точность

временной синхронизации процессов излучения и приема обеспечивалась с помощью навигационной системы GPS.

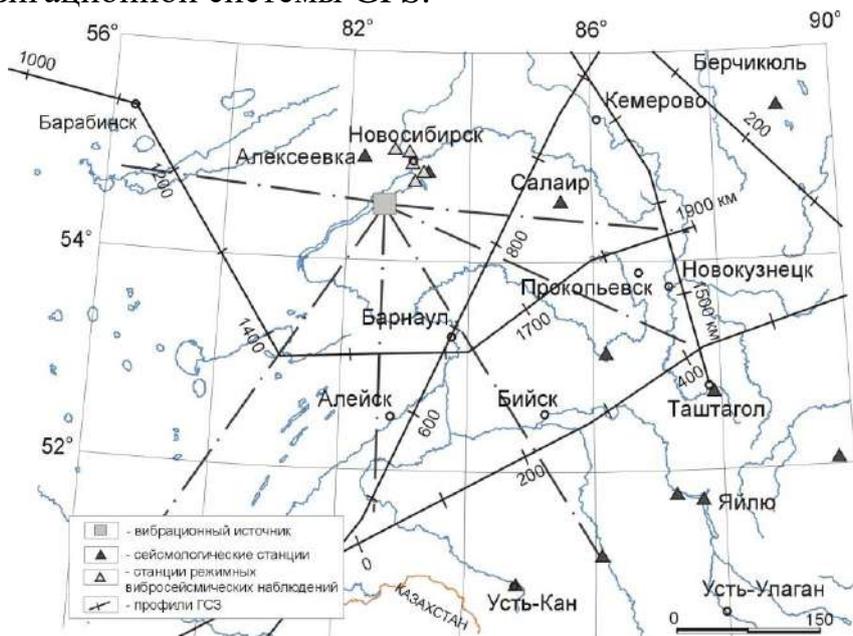


Рис. 1. Схема вибросейсмических наблюдений в Алтае-Саянском регионе

В результате проведенных работ с мощными виброисточниками в северо-западной части Алтае-Саянского региона зарегистрированы волновые поля как продольных, так и поперечных волн от опорных границ в земной коре и поверхности Мохоровичича на удалениях от 0 до 445 км; на станциях режимной сети (в разные периоды времени это были Крохалевка, Матвеевка, Центр, Бердск, Ключи, Алексеевка, Салаир) накоплены длительные ряды наблюдений [1-3].

**Повторяемость.** Вопросу повторяемости (фазовой и амплитудной) вибрационных сигналов от стационарных 40-100-тонных вибраторов посвящено большое количество работ [1-3 и др.]. Исследовались монохроматические сигналы и сигналы с разверткой частоты (свип-сигналы). В качестве главных выводов данных исследований можно отметить высокую амплитудную и фазовую идентичность сигналов от мощных вибраторов, позволяющую регистрировать лунно-солнечные вариации [1]. Специальными многодневными экспериментами в стационарном сейсмологическом павильоне "Ключи" на удалении ~50 км от вибратора было установлено, что повторяемость вибросейсмических воздействий (исследовалась разность времен повторных сеансов опорных Р-и S-волн от поверхности кристаллических пород) можно оценивать как  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  с. Анализ графика разности времен продольной волны от повторных сеансов (с перерывом в 6-8 часов) за длительный четырехлетний период показывает, что средние значения отклонений (по модулю) также составляют примерно 0.001-0.002 с. Это на порядок меньше выявляемых здесь годовых вариаций кинематических параметров по результатам режимных вибросейсмических наблюдений [1, 3].

Ниже, на рис. 2, приведены примеры рядов режимных наблюдений за 2014 г. на сейсмологических станциях, которые одновременно являются станциями режимных наблюдений.

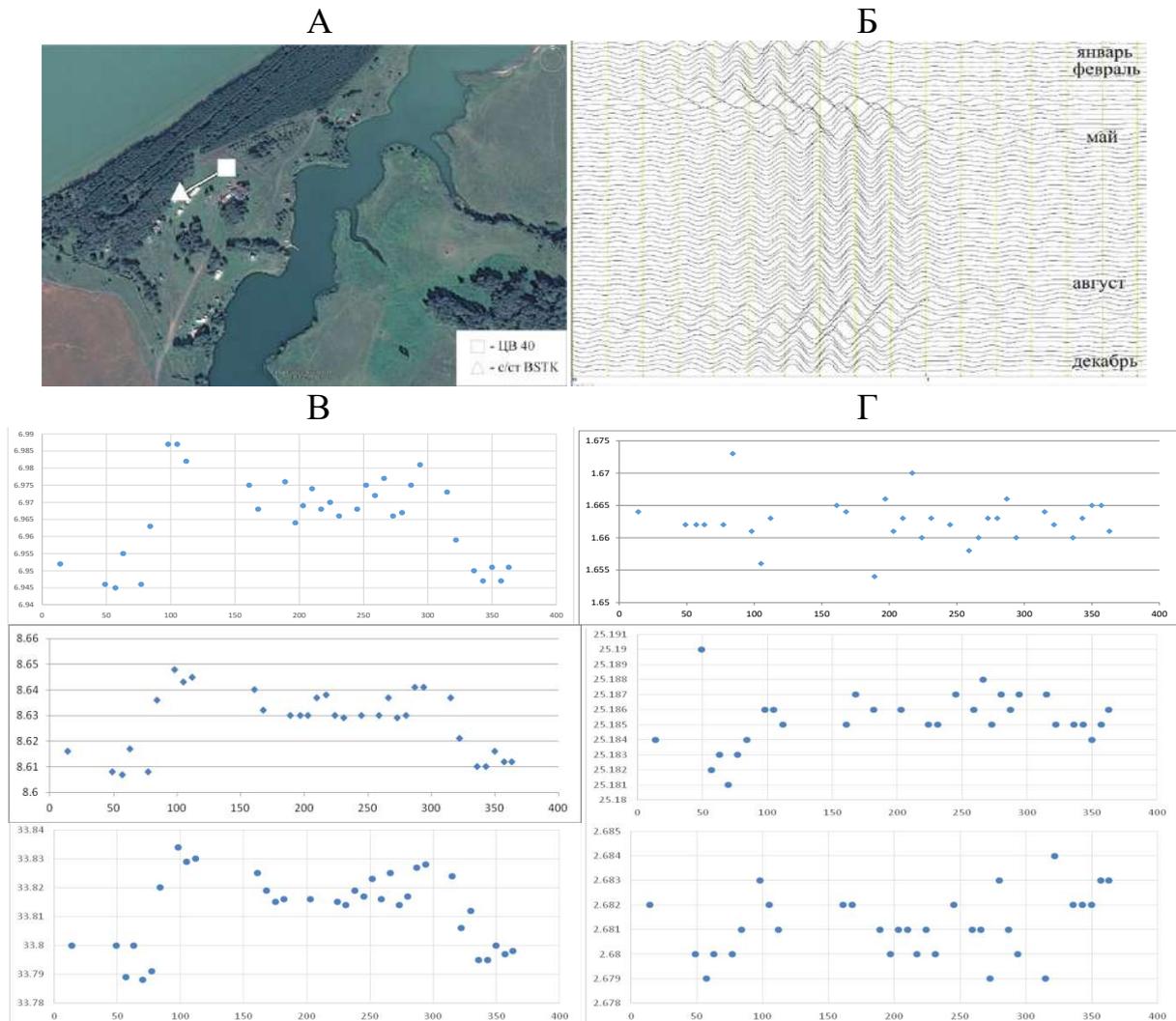


Рис. 2. К анализу результатов вибросейсмического мониторинга в Алтае-Саянском регионе. А – Быстровский вибросейсмический полигон, Б – ряды наблюдений на с/ст BSTK вблизи вибратора за 2014 г., В – (сверху вниз) ряды наблюдений на сеймостанциях Алексеевка, Ключи и Салаир за 2014 г., Г – (сверху вниз) разность времен пробега волн на сеймостанции Ключи и Алексеевка, Салаир и Ключи волнами P2 и P1 на с/ст Ключи (на рис. 2, В, 2, Г по оси X – календарное время в днях, по оси Y – времена, в секундах)

Анализ результатов мониторинга за 2014 г. показывает (как и ранее [1-3]) на сильную сезонную изменчивость волновых полей. В особенности это заметно по данным с сеймостанции, установленной ~в 100 метрах от вибратора ЦВ-40 (рис. 2, А, Б). Как видно из рис. 2, Б, отмечается высокая повторяемость (кинематическая) волновых полей в зимнее и летнее время и сильное изменение в межсезонье (весна, осень). Анализ материалов в дальней зоне (на

сейсмостанциях, рис. 2, В) показывает, что времена пробега продольной волны изменяются от зимы к лету на всех сейсмостанциях приблизительно на 0.04 с. При этом разность времен пробега волн на сейсмостанции Ключи и Алексеевка, Салаир

и Ключи (рис. 2, Г) не превышает 0.01 с и практически не зависит от времени года. Разность же времен пробега между волнами Р2 и Р1 на сейсмостанции Ключи (коровой отраженной волной (Р2) и преломленной волной от фундамента (Р1)) вообще не превышает 0.005 с (снизу на рис. 2, Г). Уменьшение вариаций времен пробега с разных сейсмостанций, и в особенности для разных волн на одной сейсмостанции, может говорить о сильных изменениях волновых полей именно в районе источника, что явно прослеживается на рис. 2, Б. Выявленные сезонные вариации в районе виброисточника ЦВ-40 связаны, по всей видимости, с промерзанием и оттаиванием грунта в окрестности виброисточника, о чем свидетельствует уменьшение времен пробега волн в зимнее время. Могут быть и другие причины. Ранее [1, 3] вариации рядов режимных наблюдений от 100-тонного вибратора связывались с сезонными изменениями в среде из-за сезонных изменений уровня Новосибирского водохранилища. Этот вопрос требует дальнейших исследований, как и вопрос о выявлении значимых вариаций временных рядов в сейсмически активных зонах. Так, анализ рядов на сейсмостанции Салаир в 2013 г. не выявил значимых вариаций в период мощного техногенного землетрясения 19.06.2013г с  $M=6.1$  в районе карьера «Бачатский», находящегося на удалении ~20 км от с/ст Салаир. Отсутствие значимых вариаций в рядах наблюдений на с/ст «Салаир» до и после землетрясения может быть обусловлено именно техногенной природой землетрясения, произошедшего не в кристаллических породах в средней части коры, а в осадочных отложениях на небольшой глубине. Требуются дальнейшие исследования в этом направлении.

Дальнейшие перспективы мониторинговых работ в Алтае-Саянском регионе связаны с расширением апертуры наблюдений и главным образом с использованием стационарных сейсмостанций на участках сейсмогенных зон на юге Алтая. Так, в ряде экспериментов получены записи преломленной волны от границы Мохоровичича на удалении в 455 км от виброисточника на сейсмостанции Яйлю (рис. 1), что открывает перспективы мониторинга не только земной коры, но и верхней мантии сейсмоактивных зон Алтая.

Все это убедительно доказывает возможность и перспективность использования мощных вибраторов для активного мониторинга сейсмоопасных зон, крупных особо опасных инженерных объектов типа атомных электростанций, хранилищ ядерных отходов и др.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, «Гео», 2004. - 350с.

2. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды // Геология и геофизика. - 1999. - № 3. - С. 474-486.

3. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Жемчугова И.В. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области. Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума. - Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. - С. 64-70.

© В. М. Соловьев, В. Н. Кашун, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, Н. А. Серезников, 2016

УДК 550.834

## **ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СТРУКТУР ЗАБАЙКАЛЬСКОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА В СТВОРЕ ОПОРНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ 1-СБ**

### ***Виктор Михайлович Соловьев***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора; 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)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

### ***Виктор Сергеевич Селезнев***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, директор; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, 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 проспект, 67, доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом сейсморазведки, тел. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

### ***Алексей Владимирович Лисейкин***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отряда, тел. (383)333-20-21, e-mail: leha@gs.nsc.ru

### ***Илья Евгеньевич Романенко***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: romanenko.ilyuha@gs.nsc.ru

### ***Семен Александрович Елагин***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

### ***Анастасия Евгеньевна Шенмайер***

Алтае-Саянский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» 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 опорном геофизическом профиле 1-СБ в Забайкалье. Показано, что от взрывов и мощных вибрационных источников зарегистрированы продольные и поперечные волны от опорных границ в земной коре и поверхности Мохоровичича. Установлены высокие значения скоростей продольных волн по границе Мохоровичича (~8.4 км/с) при небольшой мощности коры (~40 км) и чрезвычайно неоднородная верхняя кора по данным продольных и поперечных волн.

**Ключевые слова:** профиль ГСЗ, продольные и поперечные волны, скорости *P*- и *S*-волн, глубинный сейсмический разрез.

## **FEATURES OF SEISMIC STRUCTURES OF THE TRANSBAIKAL PART OF THE CENTRAL ASIAN OROGENIC BELT ALONG THE 1-SB GEOPHYSICAL PROFILE**

### ***Victor M. Solovyev***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Deputy director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

### ***Victor S. Seleznev***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Director; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Senior Researcher, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

### ***Alexander S. Salnikov***

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Russia, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Doctor of Science, Head of seismic prospecting department, e-mail: seispv@sniiggims.ru

### ***Aleksey V. Liseikin***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Head of party, tel. (383)330-20-21, e-mail: leha@gs.nsc.ru

### ***Ilya E. Romanenko***

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, 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, Koptyug Prospect 3, 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, Koptyug Prospect 3, Junior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: shennastya@gs.nsc.ru

The data of deep seismic researches along the 1-SB geophysical profile in the Transbaikal are presented. It is shown that the P- and S-waves from the reference boundaries in the crust and the Moho from the explosions and powerful vibration sources were recorded. It is determined that values of the velocities of P-waves along the Moho are increased (~8.4 km/s) wherein the Earth's crust is thin (~40 km) and the upper part of the crust is high-heterogeneous based on the data of P- and S-waves.

**Key words:** DSS profile, P- and S-waves, velocities of seismic waves, deep seismic section.

Территория Восточного Забайкалья относится к интенсивно развивающимся регионам с высоким промышленным потенциалом. Повышенный интерес к ресурсам этих дальневосточных земель и их масштабному освоению на современном этапе стимулируется энергетической стратегией правительства России и строительством магистрального трубопровода для экспортных поставок нефти в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. С 2014 г. на данной территории Роснедра выполняют комплексные геолого-геофизические исследования на опорном геолого-геофизическом профиле 1-СБ (Восточный участок) (рис. 1, А, Б), включающие методы ОГТ, КМПВ, ГСЗ, МТЗ и др., направленные на изучение крупных металлогенических провинций Восточного Забайкалья, оценку общего ресурсного потенциала, а также на обоснование долгосрочных и краткосрочных программ по оценке минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов и системное обновление фундаментальной геолого-геофизической информации о строении и динамике недр. [3]. Ниже представлена информация о результатах глубинных сейсмических исследований (ГСЗ) на южной части профиля 1-СБ, реализованных в 2014-2015 гг. (рис. 1А, Б).

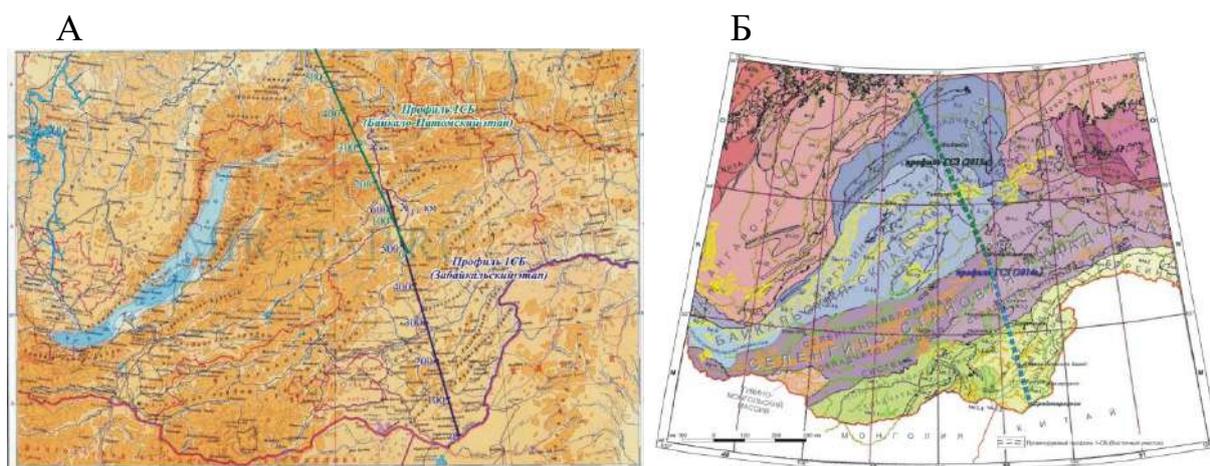


Рис. 1. Физико-географическое положение и схема тектонического районирования в полосе профиля 1-СБ (Восточный участок, Забайкальский этап)

Работы ГСЗ на профиле выполнялись по методике точечных дифференциальных сейсмических зондирований [1, 2]. Была реализована достаточно плотная система наблюдений, с расстояниями между источниками (взрывы массой 3-6 тонн, мощные вибраторы) в среднем 15-30 км и между регистрирующими станциями (РОСА, Байкал) в среднем 4-5 км (с группами вертикальных приборов СВ-5 и Sersel SG-5) и 20 км (с трехкомпонентными приборами GS-20DX). Дальность регистрации на ряде участков достигала 400-500 км (рис. 2).

Анализ волнового поля показывает (рис. 2), что на коррелограммах и взрывных записях уверенно выделяются волны в первых вступлениях от границ в верхней части земной коры (осадочного чехла), поверхности кристаллических пород и поверхности Мохоровичича. Скорости  $P$ -волн в первых вступлениях в пределах профиля в целом изменяются от  $4.2 \div 5.7$  км/с на удалениях

0-15 км до 6.0-6.3 км/с на удалениях 120-180 км (рис. 2). На удалениях свыше 180-190 км в первых вступлениях начинают регистрироваться волны с высокими значениями кажущихся скоростей в 8.2-8.5 км/с, по кинематическим, динамическим характеристикам и области прослеживания отнесенным к преломленным волнам от поверхности Мохоровичича ( $P_{np}^M$ -волнам). В последующей части записи выделяются интенсивные отраженные волны от поверхности Мохоровичича (рис. 2, Б) и в дальней части сейсмограмм – поперечные аналоги опорных волн (рис. 2, А).

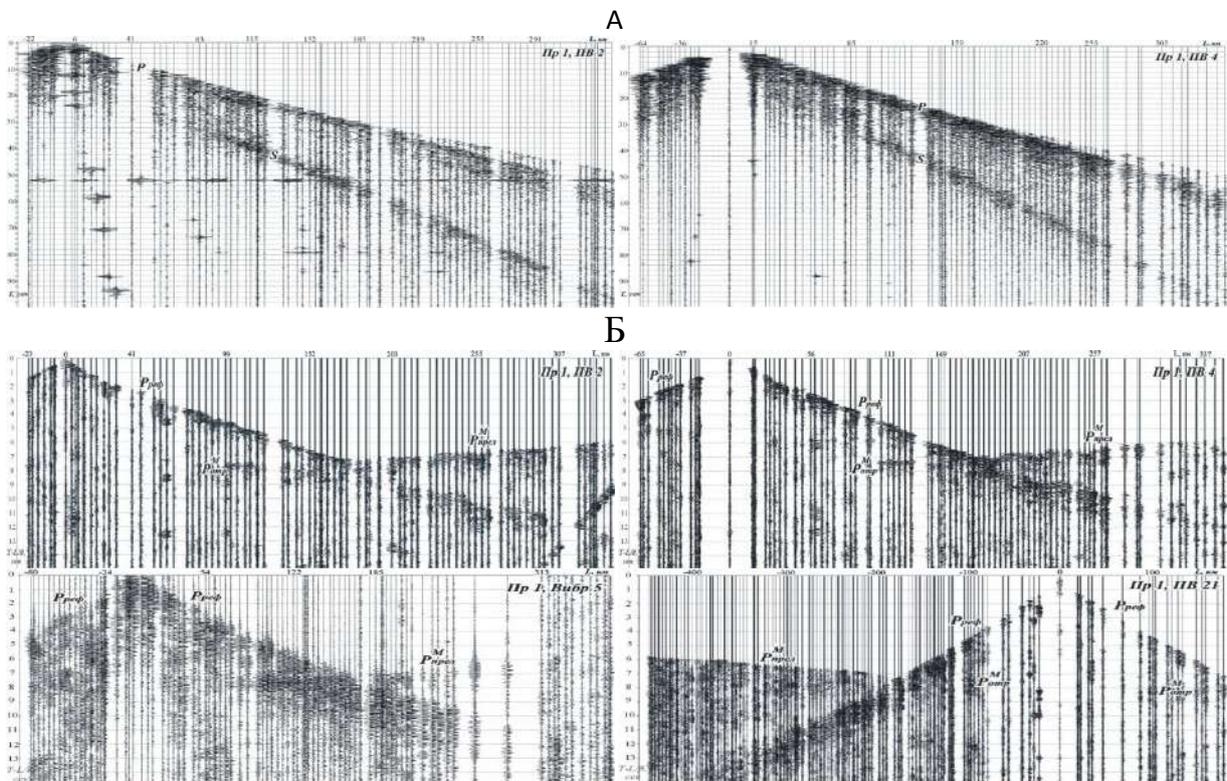


Рис. 2. Примеры обзорных сейсмических записей (А) и редуцированных годографов (Б) от взрывов и вибраторов, полученные при полевых работах на профиле 1-СБ, Восточный участок (Забайкальский этап) в 2014 г.

Интерпретация данных  $P$ -и  $S$ -волн выполнялась традиционными в ГСЗ способами [1, 2]. По данным рефрагированных  $P$ - и  $S$ -волн строились томографические разрезы земной коры; по данным преломленных и отраженных продольных и поперечных волн от границы М- определялись средние (эффективные) скорости  $P$ - и  $S$ -волн в земной коре, положение поверхности Мохоровичича и распределение воле нее значений скоростей упругих волн. Глубинный сейсмический разрез по данным продольных волн на исследуемом профиле представлен на рис. 3.

К главным особенностям глубинного сейсмического разреза на Восточном участке профиля 1-СБ следует отнести столообразный уровень залегания поверхности Мохоровичича (на глубинах  $\sim 40$  км) с высокими граничными скоростями в 8.3-8.5 км/с и чрезвычайно неоднородную верхнюю часть земной коры с высокоскоростными блоками (в 6.3-6.5 км/с).

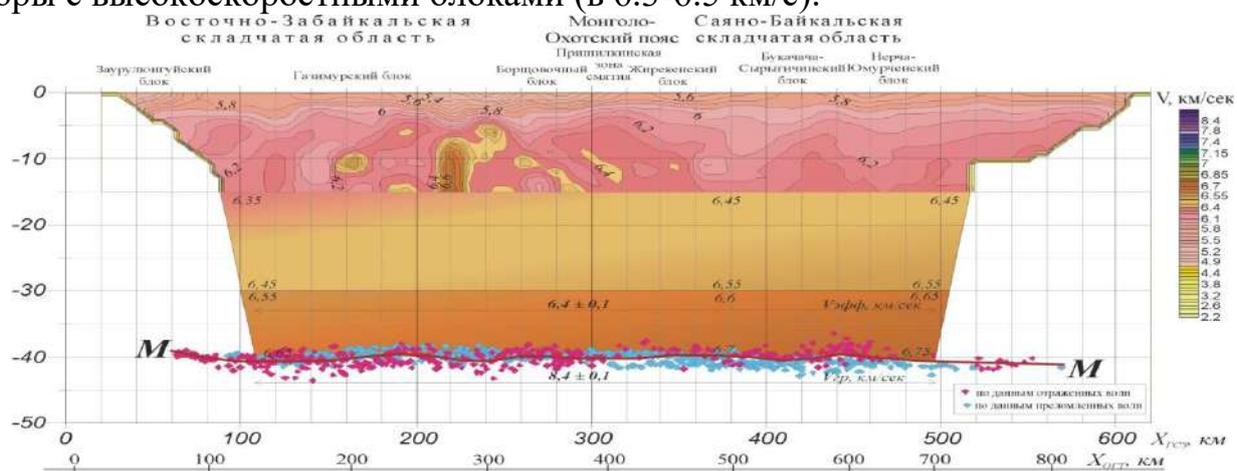


Рис. 3. Глубинный сейсмический разрез по профилю 1-СБ, Восточный участок, Забайкальский этап

Эффективная скорость распространения сейсмических волн в земной коре составляет  $6.40 \pm 0.1$  км/с. Значения пластовых скоростей в средней и нижней частях земной коры составляют соответственно  $6.4 \div 6.5$  и  $6.6 \div 6.7$  км/с.

По данным  $S$ -волн на исследуемом профиле получены дополнительные сведения о глубинном строении земной коры и верхней мантии. По соотношению скоростей  $P$ - и  $S$ -волн в верхней коре профиля выделяются значительные участки пониженных значений отношений  $V_p/V_s$  (в 1.60-1.70) и пониженных значений коэффициента Пуассона (менее 0.25), перспективные на размещение рудных полезных ископаемых. Интегральные значения скоростей  $S$ -волн во всей толще земной коры на профиле 1-СБ составляют 3.70-3.75 км/с, а отношения скоростей  $P$ - и  $S$ -волн – 1.71-1.73. Граничные скорости  $S$ -волн по

границе  $M$  для центральной части профиля составляют 4.85-4.90 км/с, а отношение скоростей  $P$ - и  $S$ -волн – 1.70-1.73.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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  $P$ - и  $S$ - волнах. - Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. - 199 с.

2. Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Изучение земной коры и верхней мантии в Байкальской рифтовой зоне методом глубинного сейсмического зондирования // Физика Земли. – 1999. - №7-8. - С. 74-93.

3. Эринчек Ю.М., Липилин А.В., Сержантов Р.Б., Кашубин С.Н., Мильштейн Е.Д. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин // Сб. докладов междунар. науч. конф., посвященной 100-летию академика Н.Н. Пузырева. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. - С. 282-288.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников,  
А. В. Лисейкин, И. Е. Романенко, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, 2016

## **РЕГИСТРАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА (СЕЙСМОСТАНЦИЯ ТАЛАЯ, БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ СИСТЕМА)**

### ***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, зав. лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***Екатерина Ивановна Грибанова***

Сибирский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, 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, e-mail: 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, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

### ***Владимир Михайлович Семибаламут***

Сибирский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, директор

### ***Сергей Владимирович Панов***

Сибирский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, инженер

### ***Михаил Дмитриевич Парушкин***

Сибирский филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, инженер

### ***Сергей Федорович Панин***

Кемеровский филиал Межотраслевого научного центра горной механики и маркшейдерского дела, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 63а, зав. лабораторией

Изучение периодических деформаций земной коры необходимо для решения различных задач геофизики в широком пространственном и временном спектре. Измерения деформаций проводятся различными методами в штольнях и скважинах. В работе представлены результаты лазерных измерений на комплексной станции Талая (Байкальский регион). Приводятся примеры регистрации собственных колебаний Земли, собственных колебаний – сейш озера Байкал и земно-приливных вариаций.

**Ключевые слова:** лазерный деформограф, измерения в штольне, собственные колебания Земли, сейши Байкала, приливные деформации.

## **GEOPHYSICAL PROCESS REGISTERED BY LASER EXTENSOMETER (TALAYA SEISMOLOGY STATION, BAIKAL REGION)**

### ***Vladimir Yu. Timofeev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***Ekaterina I. Gribanova***

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Reasearcher

### ***Dmitrii G. Ardyukov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

### ***Anton V. Timofeev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Junior Researcher, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

### ***Vladimir M. Semibalamut***

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Director

### ***Sergei V. Panov***

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Engineer

### ***Michel D. Parushkin***

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Engineer

### ***Sergei F. Panin***

VNIMI, 650000, Russia, Kemerovo, Sovetskii Prospect 63a, Head of the Laboratory

Current study of crust strain are impotent for geophysics tasks in time and in space. Different methods were used for deformation's measurements into underground gallery and into well. Strain laser measurement results at Talaya station (Baikal region) are present. We show examples of tidal variation.

**Key words:** laser extensometer in underground gallery; free oscillations, seiches, Earth tides; Baikal Lake.

Лазерный деформограф на станции Талая (юго-западная часть Байкальской рифтовой системы) может быть использован как эффективный инструмент для изучения собственных колебаний Земли, сейшей озера Байкал, приливных деформаций Земли [1]. Рассмотрим примеры использования приборного лазерного комплекса, установленного в 90-метровой штольне сейсмостанции. Собственные колебания Земли – одна из важных областей геофизического поиска [2, 3]. В экспериментальном плане собственные колебания стыкуют сейсмологию и гравиметрию. Из анализа записи деформографа (Моха, Германия) после Суматранского землетрясения (26.12.2004 г.,  $M = 9$ ) известны, например, периоды собственных колебаний от 57 мин.; 35,5 мин.; 25,8 мин.;

20 мин.; 13,5 мин.; 11,8 мин.; 8,4 мин. и меньше [4]. Обратимся к записям лазерного деформографа, полученным на станции Талая в период катастрофического землетрясения в Японии (11 марта 2011 года,  $M = 9.1$ ). Измерения выполнялись в ортогональных азимутах ( $-24^\circ N$  и  $66^\circ N$ ), проходящих по штрекам штольни. Наиболее чистая запись получена по разностной деформации (базы в двух азимутах одинаковы – 25 м) (рис. 1). Спектры деформации представлены на рис. 2. В спектрах выделяются частоты крутильных и сфероидальных колебаний. Благодаря тому, что земное ядро жидкое, а крутильные колебания являются поперечными колебаниями (аналогично поперечным волнам), они связаны лишь с твердыми областями Земли и определяются распределением плотности и модуля сдвига в оболочке (мантии) и коре. Известно, что благодаря изучению собственных колебаний из двух моделей Земли: а) модели Гутенберга со слоем пониженных скоростей сейсмических волн на глубинах 50 км ÷ 250 км и модели б) Джеффриса, не обладающей таким слоем, – собственные колебания весьма убедительно отдают «предпочтение» модели Гутенберга. Различные частотные интервалы определяются свойствами различных областей земных недр, являются важной частью информации для построения модели строения Земли. Затухание колебаний – источник сведений о вязких свойствах отдельных слоев Земли. Следовательно, собственные колебания позволяют изучать не только интегральные свойства земного шара, подобно приливам в теле Земли, но и дифференциальные, а лазерный деформограф может служить важной частью аппаратного комплекса для их изучения.

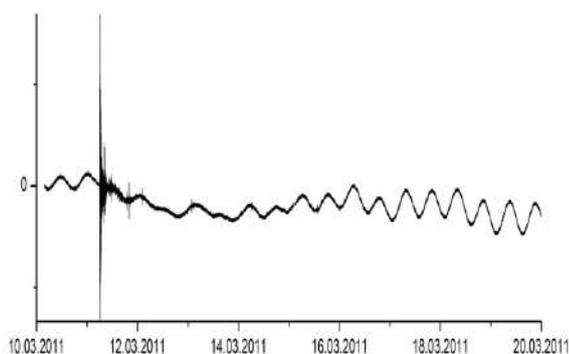


Рис. 1. Нефильтрованный сигнал разности деформографов в двух азимутах:  $-24^\circ N$  и  $66^\circ N$ , эффект землетрясения 11.03.2011: приливные и собственные колебания

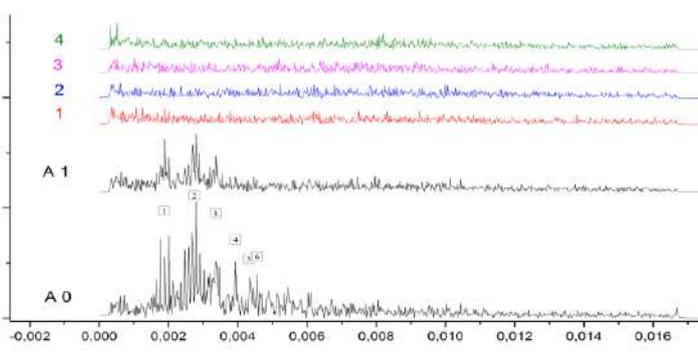


Рис. 2. Спектры для разности, А0 – сразу после землетрясения, А1 – сдвиг на 3 часа, (1) через сутки и т. д. Выделяются отдельные пики в полосе частот от 0,0003 до 0,0060 Гц (в минутах 57; 35,5; 25,8; 20; 13,5; 11,8; 9,0; 6,1; 4,9; 4,2; 3,8 и 3,6)

Рассмотрим собственные колебания озера Байкал – колебания уровня воды – сейши, которые, нагружая земную поверхность (дно озера Байкала), вызывают деформации земной коры. Эти эффекты можно регистрировать лазерным

деформографов в штольне сейсмостанции Талая [5-8]. Из причин, вызывающих стоячие волны – сейши на озере Байкал, выделяются двухнедельная модуляция прилива, сильные землетрясения и резкие изменения атмосферного давления (рис. 3).

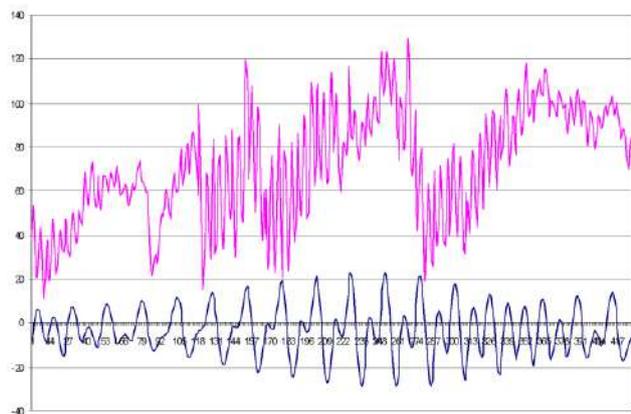


Рис. 3. Вариации уровня озера Байкал (пункт Листвянка, 430 часов записи) с исключением приливного эффекта – сейши (верхний график, в мм) и теоретическая приливная кривая (нижний график). Генерация сейш вызвана максимальными вариациями прилива. Двойная амплитуда первой моды сейш достигает 60 мм в пункте Листвянка

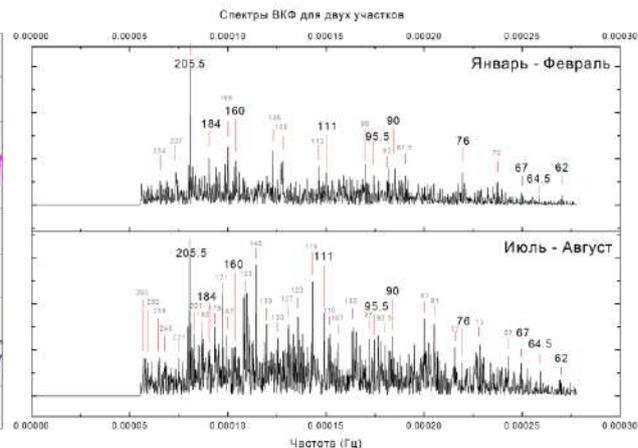


Рис. 4. Спектры для зимнего и летнего периодов наблюдений лазерным деформографом в штольне сейсмостанции Талая

По записям уровня воды озера для пункта Листвянка (рис. 3), исключив приливные вариации из наблюдений уровня, сделан спектральный анализ и получены следующие периоды сейш: 4 ч 33 м, 2 ч 33 м, 1 ч 28 м, 1 ч 06 м. Узловые линии сейш находятся на расстоянии 280 км, 130 км, 360 км, 540 км соответственно от южной части озера (поселка Култук). Амплитуды сейш у пункта Култук достигают 14 см.

Теоретически периоды сейш связаны соотношением:  $T_n = 2l / (n\sqrt{gH})$ , где  $l$  – длина озера,  $H$  – его средняя глубина,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$  и  $n$  – мода. Амплитуда сейш имеет сезонные вариации. Первая мода сейш хорошо проявляется в записях уровня озера в пункте Листвянка и в данных ледовых измерений смещений. Периодическая нагрузка на дно озера на уровне 1 КПа проявляется в различных видах высокоточных геофизических измерений. Так, спектральный анализ результатов наблюдений лазерным деформографом на станции Талая показал наличия линий сейш в результатах (рис. 4). Были проанализированы спектры для зимнего и летнего периодов наблюдений (рис. 4). Среди полученных частот, помимо отмеченных в Листвянке (периоды 4,55 часа; 2,55 часа; 1,47 часа и 1,1 часа), выделяются колебания с периодом 3,4 часа (205,5 минут). Летний

спектр частот богаче, что, возможно, связано с фильтрационными свойствами слоя льда на озере Байкал в зимний период. В дальнейшем эти экспериментальные результаты можно использовать для построения динамической модели озера Байкал. Периоды, связанные с явлением сейш, следует учитывать при анализе и интерпретации деформограмм. Из значимых эффектов озера Байкал можно упомянуть также нагонные волны, вызванные сильными ветрами, – «Култук», «Баргузин» и т. д., но эти явления нами в данной работе не анализируются.

Приливные деформации Земли охватывают всю планету от ее центра до поверхности, имеют амплитуду единиц  $10^{-8}$ , а приливная сила точно рассчитывается [9]. Отражение эффектов полости, локальных особенностей земной коры и в приливных деформациях для станции Талая достигают 10 % в амплитуде и  $9^\circ$  в фазовом сдвиге [10].

Рассмотрим вариации приливных параметров во времени. Наибольший интерес при анализе приливных колебаний представляет 12-часовая гармоника (волна M2), так как информация, содержащаяся в этом сигнале, менее зашумлена, в то время как 24-часовая приливная гармоника, как правило, искажается суточными вариациями метеорологических параметров. Результаты приливного анализа проведены с помощью программы ETERNA.3.0. по ежегодным данным разностной деформаций. На рис. 5 приведены вариации фазового сдвига (отличие от нормального состояния  $+65,4^\circ$ ) за период с 1990 по 2015 г. Как можно отметить по результатам анализа, многолетние вариации параметров лежат в пределах нескольких градусов. Вариации фазового сдвига после Култукского землетрясения (27.08.2008, M = 6.5, в 25 км от станции Талая) сгладились (рис. 5), что, видимо, отражает состояние геологической среды района.

В эпохи сильных землетрясений вариации приливных параметров достигают  $3\div 4\%$  в амплитуде и  $1\div 3^\circ$  в сдвиге фаз. Аномалии могут быть вызваны изменением гидродинамических условий в зоне глубинного разлома (в  $1\div 3$  км от пункта наблюдений) и деформированием земной коры в эпоху сильного землетрясения.

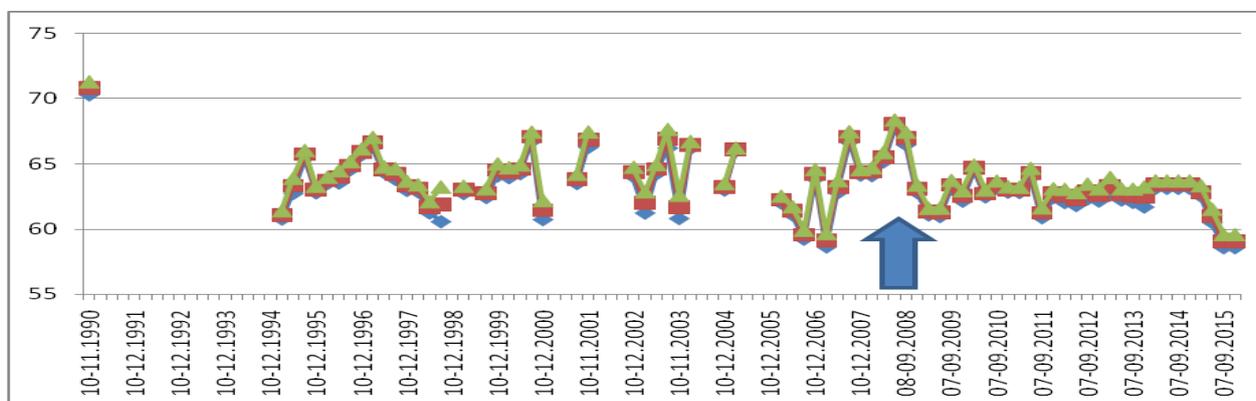


Рис. 5. Фазовый сдвиг (1990-2015 гг.), нормальное значение 65.4°

В результате следует отметить, что многолетние наблюдения с аппаратурным комплексом – лазерный деформограф – в штольне с-ст Талая показали высокую эффективность при регистрации различных периодических явлений. Определение параметров собственных колебаний Земли, сейш озера Байкал и земных приливов проведено на высоком метрологическом уровне и соответствует международному уровню геофизических исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли. - 1992. - № 1. - С. 85-91.
2. Стейси Ф. Физика Земли. - М.: Мир, 1972. - 342 с.
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. - 191 с.
4. Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann. Strainmeters at Moxa observatory, Germany. // Journal of Geodynamics. - 2006. - Vol. 41. - P. 205-212.
5. Атлас Байкала. М.: РАН, 1993. - 160 с.
6. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. - Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1987. – 167 с.
7. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Гранин Н.Г., Жданов А.А., Кучер К.М., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. Деформация ледового покрова, приливные и собственные колебания уровня озера Байкал // Физическая мезомеханика. Спец. выпуск. - 2010. - Т. 13. - С. 58-71.
8. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В. Деформация ледового покрова озера Байкал при климатических и приливных воздействиях // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. - 2012. - Т. 12. - Вып. 4. - С.127-137.
9. Melchior P. The tides of the planet Earth. - 2<sup>nd</sup> ed. Pergamon Press, Oxford, 1983. - 641 p.
10. Timofeev V.Y., Ardyukov D.G., Gribanova E.I., van Ruymbeke M., Ducarme B. Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station) // Marees Terrestres; Bulletin d'informations, Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles, ВІМ 144, 15 Decembre. - 2008 - P. 11615-11634.

© В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев,  
В. М. Семибаламут, С. В. Панов, М. Д. Парушкин, С. Ф. Панин, 2016

## **ПРИЛИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ**

### ***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, зав. лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***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, e-mail: 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, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

### ***Сергей Федорович Панин***

Кемеровский филиал Межотраслевого научного центра горной механики и маркшейдерского дела, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 63а, зав. лабораторией

### ***Елена Валерьевна Бойко***

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: boykoev@ipgg.sbras.ru

### ***Екатерина Ивановна Грибанова***

Сибирский Филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, научный сотрудник

Исследование эффекта приливной модуляции слабых сейсмических событий проводится с использованием банков данных землетрясений по Байкальскому и Алтае-Саянскому регионам. Получена модуляция глубиной 10–20 % сейсмического процесса для событий

5–8 класса на частотах приливных волн S1, Mm и Mf. Приводятся результаты анализа техногенной активизации в районе Бачатского разреза (Кузбасс).

**Ключевые слова:** банк сейсмичности Байкальского, Алтае-Саянского регионов, приливная модуляция, техногенные землетрясения, Бачатский разрез.

## **TIDAL MODULATION OF WEAK SEISMISITY**

### ***Vladimir Yu. Timofeev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***Dmitrii G. Ardyukov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

**Anton V. Timofeev**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Junior Researcher, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

**Sergei F. Panin**

VNIMI, 650000, Russia, Kemerovo, Sovetskii Prospect 63a, Head of the Laboratory

**Elena V. Boyko**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Researcher, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

**Ekaterina I. Gribanova**

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Reasearcher

Using information about seismicity of Altay-Sayan and Baikal region we study tidal modulation effect. Modulation at 10–20 % level (tidal waves S1, Mm and Mf) have been analyses for seismic events at 5–8 class. We present the analysis results for technical effect at Bochatsky mine (Kyzbass).

**Key words:** banks of seismic activity for Baikal and Altay-Sayan region, Tidal modulation, technical seismic effect, Bochatsky mine.

Связь приливных вариаций деформации Земли и периодичности сейсмического процесса исследуется уже в течение многих десятилетий. Изучение этой связи предпринималось с разными целями. Основной мотивацией, как правило, являлось желание ответить на вопрос: может ли приливная волна быть триггером крупного землетрясения? Имеются результаты, как показывающие корреляцию процессов, так и обратные [1-4]. Наиболее логичным нам кажется подход, когда для исследования процесса используются большие объемы информации о землетрясениях региона (желательно, все имеющиеся). Очевидно, что в этом случае мы практически исследуем процесс на слабых энергиях, так как в банке данных о сейсмических событиях максимальное количество землетрясений – это слабые события. Для анализа данных о землетрясениях применялась специальная программа приливного анализа HiCum. Рассмотрение модуляции общего количества сейсмических событий для Байкальской рифтовой зоны и Алтае-Саянского региона и ее количественная оценка являются целью данной работы. Рассматриваются также особенности процесса в Кузбассе для техногенных событий.

Сигналы от систематических движений, такие как земной прилив, крайне малы (деформации до  $5 \cdot 10^{-8}$ ), и любой эффект сложно обнаружить. В более ранних исследованиях спектральный анализ был излюбленным инструментом для обнаружения таких сигналов. В нашем случае мы знаем периоды разных компонент сигнала с астрономической точностью. К тому же очень длинные серии записей дают нам возможность обнаружить очень слабые сигналы со значительным отношением сигнал-шум. Метод накопления гистограмм [5, 6]

был первоначально разработан в Королевской обсерватории в Бельгии. Его целью являлась графическое отображение поведения нелинейностей, записанных с различных датчиков.

Сигнал, который, на первый взгляд, проявляется как зашумленный, имеет временную базу, разделенную на серии временных периодов постоянной длины. Выбранный временной период рассматривается как имеющий влияние на параметры исследуемого вопроса. Этот временной период по определению равен интервалу шириной  $2\pi$ , или 360 градусов. Для каждого периода создается гистограмма размером до 360 секторов размером в 1 градус (максимум разбиение обычно от 72 до 120 шагов), и когда результаты с каждого временного периода синхронизированы и сложены, результирующий по среднему эффект синтезирует картину вариаций в зависимости от выбранной волны (рис. 1).

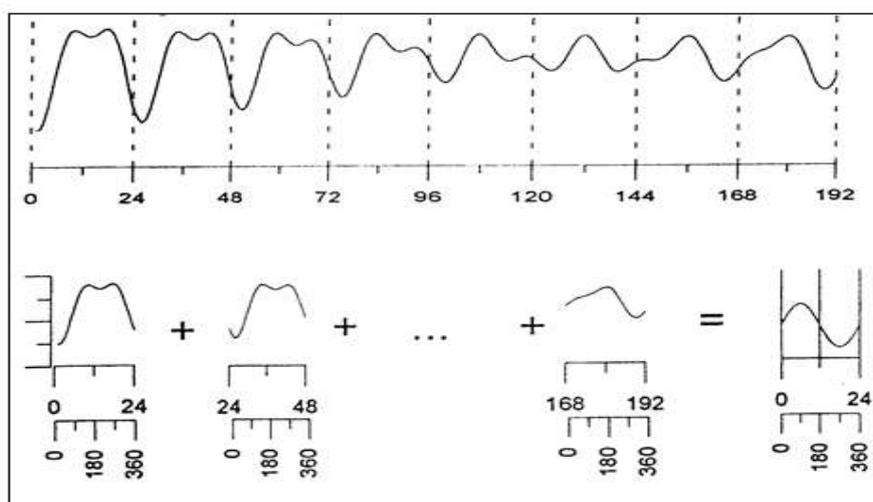


Рис. 1. Принцип метода NiCum, приложенного к восьмидневной записи приливного сигнала (часовая шкала). Серия разрезается на временные интервалы постоянного размера, связанного с периодом выбранной волны по Аргументу Дудсона (например,  $360^\circ$  для 24 часового периода волны S1). Полученные гистограммы просто добавляются к среднему по выбранной компоненте

Метод имеет несколько преимуществ перед спектральным анализом в извлечении информации там, где имеется в наличии комплексное взаимодействие многих параметров окружающей среды. Точность метода была проверена на данных, сгенерированных компьютером. Метод был разработан для анализа данных, подобных приливным эффектам, где временной период точно известен. Используя метод NiCum, определяются параметры основных синусоидальных волн, их гармоника и любые нелинейности из слабого исходного сигнала и при высоком уровне шума. При планировании этих исследований мы исходили из целесообразности гладкой аппроксимации полученных сейсмограмм функцией

$$f(t) = A_0(1 + m \sin(\omega t + \varphi)). \quad (1)$$

Эту функцию можно рассматривать как результат амплитудной модуляции низкочастотного периодического сигнала  $A_0 \cos \Omega t$  высокочастотным сигналом  $1 + m \sin(\omega t + \varphi)$  при  $\Omega \rightarrow 0$ :  $f(t) = \lim_{\Omega \rightarrow 0} A_0(1 + m \sin(\omega t + \varphi)) \cos(\Omega t)$ . Поэтому отклик такого типа будем называть модуляцией сейсмичности, а параметр  $m$  – глубиной модуляции (рис. 2). Эту величину будем давать в процентах. Если  $A_{\max}$  и  $A_{\min}$  – максимальная и минимальная амплитуда сигнала  $f(t)$ , то

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (2)$$

Приливный анализ банка данных по сейсмическим событиям для Алтае-Саянского и Байкальского регионов (1970-1993 гг.) позволил выделить параметр модуляции сейсмического процесса (рис. 2 и 3) приливной силой (от 5 до 20 %). Эффект проявляется на слабых энергиях (класса 5 ÷ 8) в областях сейсмической активности и в зонах будущего сильного землетрясения с форшоковой активностью за несколько лет до события.

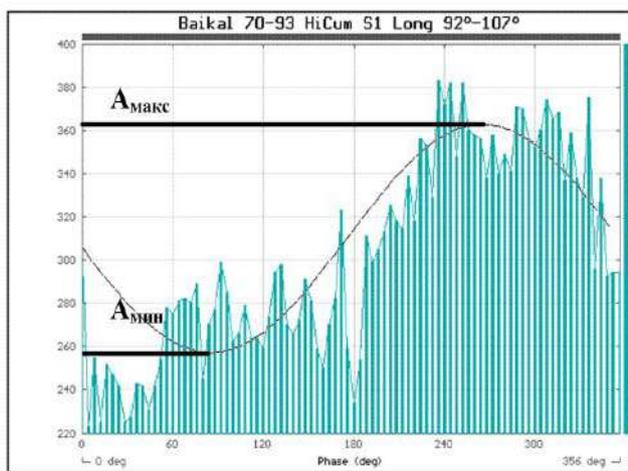


Рис. 2. Гистограмма волны на частоте S1 для блока земной коры с размерами по долготе с 92° по 107° по банку данных Байкальской рифтовой системы. Глубина модуляции процесса – 18 %

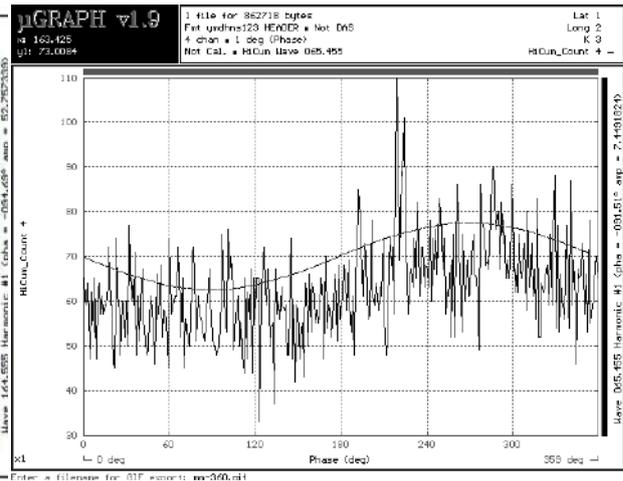


Рис. 3. Гистограмма для периода Mm (лунный месяц) по данным 1970-1991 гг., Алтае-Саянский регион. Параметр разбиения – 360. Глубина модуляции процесса – 11.5 %

Физическая модель явления [7] основана на теории трещинообразования с использованием параметров: напряжение и скорость деформации. Например, анализ данных в зоне Бусингольского землетрясения (27.12.1991, координаты 51.0° N, 98.0° E, магнитуда  $M = 6.5 \div 7.0$ ) показал, что здесь за несколько лет до землетрясения установился высокий уровень модуляции (до 30 %), который после события спадает в течение года.

Использование эффекта для вероятностной оценки грядущего события возможно при наличии регулярно пополняемого регионального банка землетрясений, начиная с 5-6 класса.

Другим важным полем применения описанного выше подхода является использование метода HiCum для анализа техногенных событий и горных ударов на рудниках и шахтах. Исследование процесса афтершоковой активности в районе Бачатского разреза (рис. 4) показало наличие модуляции процесса для волны Mf (период – 13.661 суток). В этом случае глубина модуляции составила 8.9 % (рис. 5).

В свете вышесказанного отметим, что наиболее перспективным применением метода приливной модуляции должно быть его использование для анализа и предсказания периодов сейсмической активности, горных ударов в шахтах и исследования зон сильных землетрясений.

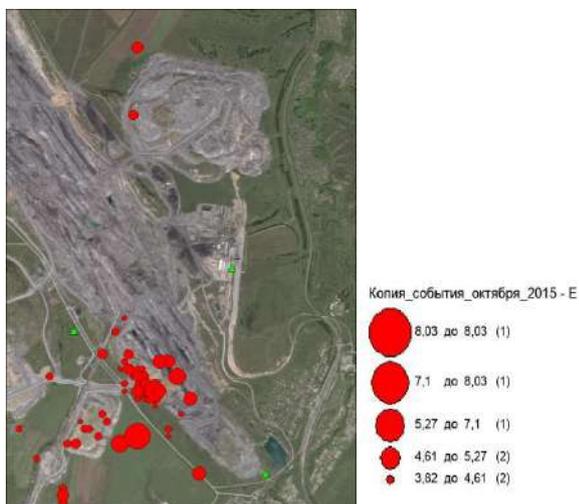


Рис. 4. Схема Бачатского разреза и эпицентров землетрясений октября 2015 г. Протяженный объект в центре – разрез с поперечными размерами 2 км, вокруг – терриконы (координаты объекта – 54.26°N и 86.16°E)

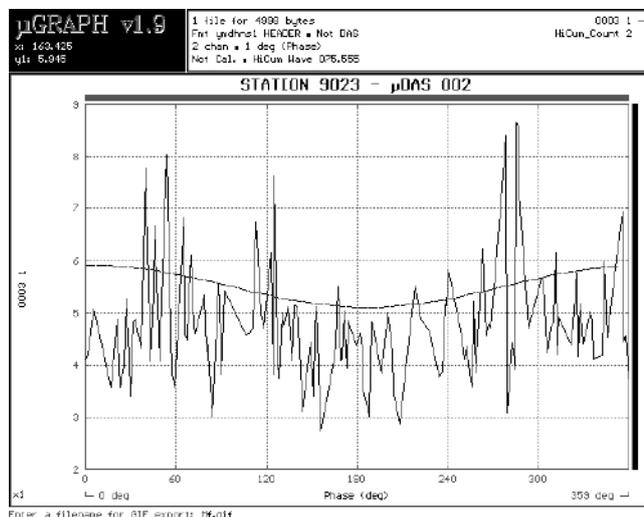


Рис. 5. Приливная волна Mf (период – 13.661 суток), глубина модуляции – 8.9 %, Бачатский разрез (700 событий с июля 2013 по декабрь 2015 г., после землетрясения 2013/07/ 24 14-49-04; 54.263°N, 86.161°E, класс: 8.65)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bartels J. Random Fluctuations, Persistence and Quasi-persistence in Geophysical and Cosmical periodicities // Terr.Magn.Atmos.Electricity. - 1938. - Vol. 40(1). - P. 1-60.
2. Стейси Ф. Физика Земли. - М.: Мир, 1972. - 342 с.
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. - М.: Наука, 1983. - 415 с.
4. Emter D., Zurn W., Schick R., Lombardo G. Search for Tidal Effects on Volcanic Activities at Mt. Etna and Stromboli // Proceedings of the Tenth International Symposium on Earth Tides. - 1985. - P. 765-774.

5. Zurn W., Rydelek P.A. Revisiting the phasor-walkout method for detailed investigation of Harmonic Signals in Time Series // Surveys in Geophysics. - 1994. - Vol. 15. – P. 409-431.

6. Ruymbeke M. Van, Beauducel Fr., Somerhausen A. The Enviromental Data Acquisition System (EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium // Journal of the Geodetic Society of Japan. - 2001. - Vol. 47 (1). - P.100-120.

7. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., ван Раумбеке М., Ардюков Д.Г., Лаврентьев М.Е., Седусов Р.Г., Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири // Физическая мезомеханика. - 2008. - Т.11. - № 4. - С. 81-93.

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев,  
С. Ф. Панин, Е. В. Бойко, Е. И. Грибанова, 2016

УДК 550.837.312

## **ИЗУЧЕНИЕ ТАЛИКОВЫХ ЗОН ПОД ТЕРМОКАРСТОВЫМИ ОЗЕРАМИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ (ПО ПОЛЕВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ТРЕХМЕРНОМУ ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ)**

*Алексей Николаевич Фаге*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (905)951-23-66, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru

*Ирина Владимировна Суродина*

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, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

*Игорь Николаевич Ельцов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, заместитель директора, тел. (383)363-80-39, e-mail: yeltsovin @ipgg.sbras.ru

Мобильность и оперативность исследования методом электротомографии [1] важны при изучении труднодоступных районов, в том числе Крайнего Севера. При этом часто необходимо верифицировать полученную в результате инверсии геологическую модель, используя лишь доступные в полевых условиях ресурсы. Современные графические процессоры обладают высокой производительностью и существенно ускоряют обработку данных даже на полевом ноутбуке, поэтому растет востребованность программ решения прямых и обратных задач, использующих ресурсы графических процессоров – GPU.

**Ключевые слова:** электротомография, трехмерное численное моделирование, графический ускоритель, таликовая зона, термокарстовое озеро.

## **ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY INVESTIGATION OF TALIK ZONES BENEATH THERMOKARST LAKES (BASED ON FIELD MEASUREMENTS AND 3D COMPUTER MODELING)**

*Alexey N. Fague*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Junior research associate at the laboratory of electromagnetic fields, tel. (905)951-23-66, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru

***Irina V. Surodina***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Senior Researcher at borehole geophysics laboratory, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

***Igor N. Yeltsov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of science, deputy director, tel. (383)363-80-39, e-mail: yeltsovin @ipgg.sbras.ru

Electrical resistivity tomography mobility and speed [1] are important during investigations of remote regions, including Far North. It is a common situation when inversion results need to be verified on spot using only resources currently at hand. The power of modern graphics processors allows for significant increase in data processing speed even on notebooks. Therefore there is an increasing demand for programs that solve direct and inverse problems utilizing GPUs.

**Key words:** electrical resistivity tomography, 3D computational modeling, graphics processing unit, talik zone, thermokarst lake.

Высокая разрешающая способность электротомографии позволяет выявлять особенности геологического строения, недоступные другим методам электроразведки, но, как и для других методов геоэлектрики, современное развитие электротомографии определяется новыми аппаратными разработками и программно-алгоритмическими средствами для прямого моделирования и интерпретации полевых данных. Верификация получаемых в результате инверсии геоэлектрических разрезов (прямое моделирование) особенно актуальна для Северных районов, где температурные параметры геологической среды варьируются в широких пределах и, как следствие, сильно меняются ее электрические свойства. Развитие современной вычислительной техники, в частности появление графических процессоров, позволяет вести обработку данных на ноутбуке в полевых условиях. Поэтому важной задачей является создание инструментария для быстрого решения прямых и обратных задач с максимальным использованием возможностей графических процессоров.

В ходе работ в дельте р. Лена в 2014, 2015 г. наличие большого числа водоемов на профилях исследования приводило к появлению зон низкого удельного электрического сопротивления (УЭС) на геоэлектрическом разрезе. При этом ввиду разницы значений УЭС до трех порядков эти зоны на геоэлектрическом разрезе представляются как обширные пятна, выходящие далеко за пределы ожидаемых границ. Чтобы определить, насколько сильно высокий контраст изучаемой среды, создаваемый массивными проводящими объектами, влияет на способность построить правдоподобную геологическую модель по результатам инверсии, было применено трехмерное численное моделирование.

Трехмерное моделирование для задач вертикального электрического зондирования и электротомографии сводится к моделированию распределения электрического потенциала точечного источника в сложно построенной среде. Представим потенциал электрического поля  $U$  в виде суммы аномального

потенциала  $U^a$  и первичного потенциала  $U^0$ , связанного с источником поля, расположенным в однородной среде с проводимостью  $\sigma^0$ :

$$U = U^0 + U^a, \quad (1)$$

Для аномального потенциала  $U^a$  справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{div}(\sigma \nabla U^a) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma_0) \nabla U^0), \quad (2)$$

где  $\sigma(x, y, z)$  – проводимость в среде. При удалении от источника потенциал затухает как  $1/R$ , где  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , поэтому для функции  $U^a$  вдали от источников  $U^a|_{x \rightarrow \pm X} = 0, U^a|_{y \rightarrow \pm Y} = 0, U^a|_{z \rightarrow \pm Z} = 0$ .

Дискретизация уравнения конечно-разностным методом [2] и последующая его симметризация приводит к системе линейных алгебраических уравнений

$$AU^a = b, \quad (3)$$

где  $A$  – действительная, симметричная, сильно разреженная, положительно определенная матрица. После решения системы (3) получим аномальный потенциал. Затем с помощью уравнения (1) находим полный потенциал. Для нахождения разности потенциалов в приёмных электродах и кажущегося сопротивления необходимо решить несколько таких задач для различного положения токовых электродов. Для решения систем линейных уравнений (3) был выбран итерационный метод сопряженных градиентов (CG), поскольку в данном случае мы имеем разреженные, симметричные матрицы больших размеров (от 1,5 до 2,5 млн. сеточных узлов). Для повышения скорости сходимости был использован оригинальный подход построения предобуславливающей матрицы на основе аппроксимации обратной матрицы, предложенный в [3] и библиотека функций CUBLAS CUDA NVIDIA. В результате мы получили полностью параллельный алгоритм метода PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), максимально использующий возможности графических процессоров [4]

Разработанная программа в настоящий момент активно используется для верификации полевых данных 2014-2015 гг., в том числе результатов исследования многолетнемерзлых пород в дельте р. Лена, Булунский улус, Республика Саха (Якутия). Работы производились в августе 2014 г. вблизи Научно-исследовательской станции НИС о. Самойловский и стали первым опытом использования аппаратуры СКАЛА-48 в дельте р. Лена. Объект исследования был выбран совместно с коллегами из Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI) – озеро Рыба на острове Самойловский, оно имеет относительно большую для тундровой зоны глубину (7 метров) и не промерзает до дна в зимний период. Данная особенность предполагает наличие таликовой зоны непосредственно под самим озером. Совместно с коллегами из AWI была поставлена научная задача: оценить возможности метода электротомографии для определения наличия талика под озером. Сложность исследования заключалась в том, что таликовая зона,

согласно имеющимся данным бурения, а также результатам моделирования [5], ограничена линией уреза воды. Таким образом, единственно возможный вариант исследования – провести электроразведочную линию через водоем. В общей сложности (с учетом топких берегов) в воде находились 10 из 48 электродов электроразведочной косы, с шагом между ними 5 м (45 м профиля в воде из общих 235 м). Остальные электроды были заземлены в проводящий деятельный слой.

На результатах инверсии (0) хорошо видна проводящая аномалия в интервале 140-200 м по профилю, значения УЭС 70-400 Ом·м. Ее конфигурация полностью соответствует данным моделирования таликовых зон под незамерзающими озерами (мощность более 20 м, субвертикальные границы, находящиеся под урезом воды), выполненными немецкими коллегами [5]. Однако результаты инверсии требуют проверки, поскольку очевидно, что масса воды, образующая мощный проводник, влияет на геоэлектрический разрез. Для верификации данных исследования была построена модель среды (на 0 приведена зона непосредственно под электроразведочной линией).

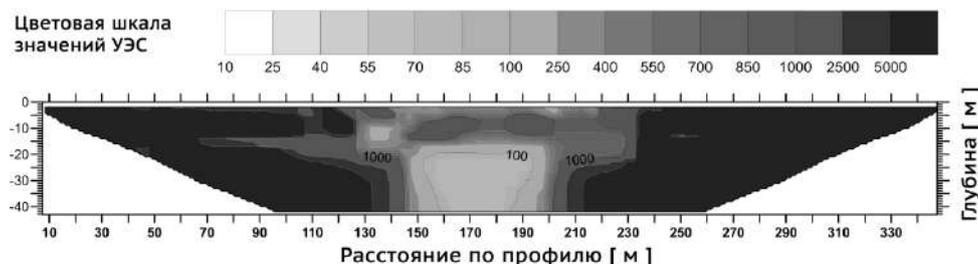


Рис. 1. Результаты инверсии полевых данных, полученных в ходе исследования оз. Рыба, о. Самойловский, республика Саха (Якутия)

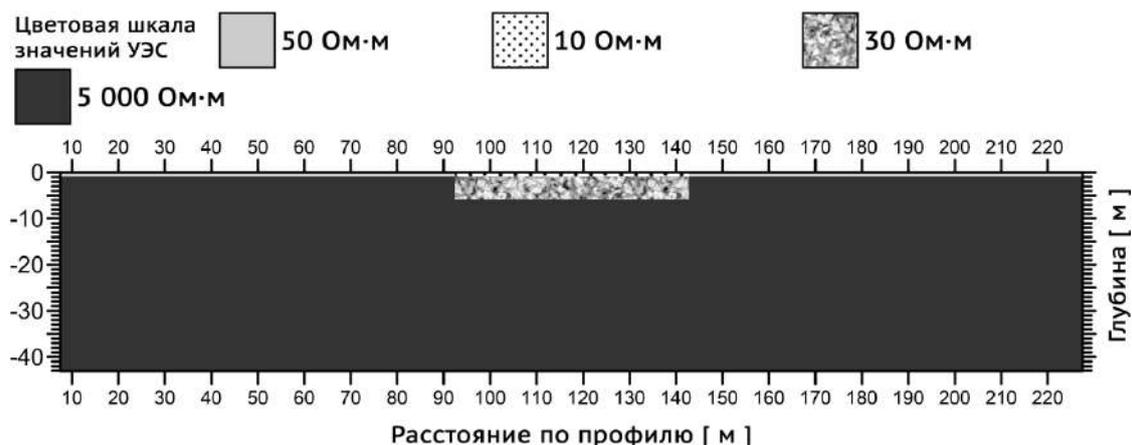


Рис. 2. Модель изучаемой среды: деятельный слой мощностью 1 м (50 Ом·м), озеро глубиной 1 м (10 Ом·м), талик мощностью 5 м (30 Ом·м), вечная мерзлота (5000 Ом·м)

Кроме того, для сравнения была рассчитана модель среды без таликовой зоны. Результаты инверсии расчетных данных приведены на 0.

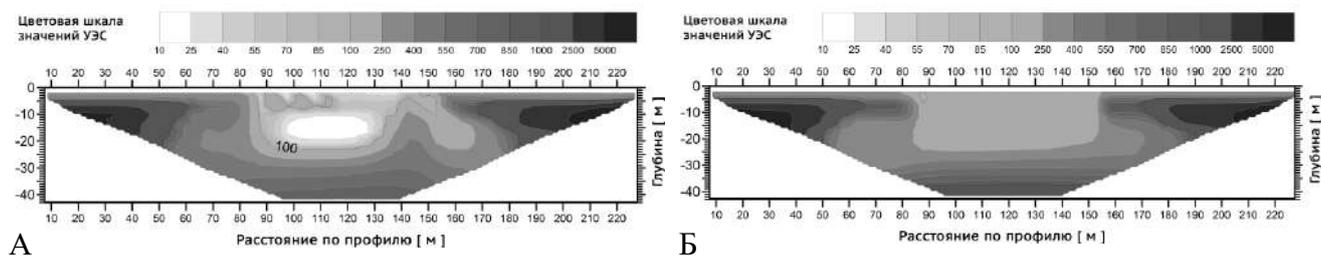


Рис. 3. Инверсия модельных данных, разрез А – талик присутствует, разрез Б – талик отсутствует

Разность данных инверсии позволила оценить влияние таликовой зоны на результаты измерений (0).

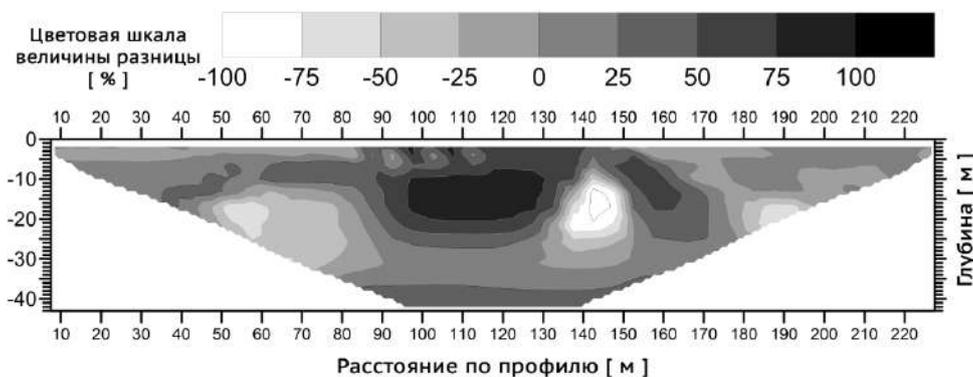


Рис. 4. Относительная разница данных инверсии модели с таликовой зоной и без нее, %

Моделирование показало, что таликовая зона оказывает существенное влияние на результаты измерений (относительная разница между значениями УЭС в аномальной зоне в интервале 90-140 м по профилю составляет не менее 75 %). Однако идентификация таликовой зоны и тем более определение ее параметров лишь по результатам геофизических измерений методом электротомографии требует наличия обширных статистических данных по объектам исследования, а также базы рассчитанных моделей среды.

В работе показано, ответ на вопрос о наличии/отсутствии талика можно дать при сравнительном анализе данных натурного и численного эксперимента. Поскольку разработан высокопроизводительный инструментарий трехмерного моделирования на GPU полевого ноутбука, задача может быть решена непосредственно в поле.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Loke M.H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, a Practical Guide to 2D and 3D Surveys by Loke // <http://www.geoelectrical.com>, 1999.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1979. - 655 с.

3. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) Journal [http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume\\_18](http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18).

4. Суродинa И.В, Нестерова Г.В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015. Сборник статей EAGE. - 2015. - С. 79-88.

5. West J.J., Plug L.J. Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice // Journal of Geophysical Research. - 2008. - Vol. 113. - P. F01009. - doi:10.1029/2006JF000696.

© А. Н. Фаге, И. В. Суродинa, И. Н. Ельцов, 2016

## ФОРМУЛА КОУЛА-КОУЛА И ФРАКТАЛЬНОСТЬ СРЕДЫ

*Владимир Викторович Филатов*

Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 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 особенности процессов вызванной поляризации во фрактальной среде. Рассмотрена связь фрактальных параметров среды с параметрами частотной дисперсии, входящими в формулу Коула-Коула, и с процессами релаксации.

**Ключевые слова:** вызванная поляризация, релаксация, фрактал, самоподобные процессы, частотная дисперсия.

## COLE-COLE EQUATION AND FRACTAL MEDIA

*Vladimir V. Filatov*

Joint-stock company «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, Doctor of Science, main scientific associate, tel. (383)222-47-22, e-mail: filatov@sniiggims.ru

Features of processes of the induced polarization in fractal medium are discussed. Relation of fractal parameters of the medium with the Cole-Cole parameters of a frequency dispersion and with relaxation processes are considered.

**Key words:** induced polarization, relaxation, self-similar process, fractal, frequency dispersion.

Электрические свойства – одна из комплексных проблем в исследовании конденсированных сред. Особое место здесь занимают вопросы, связанные с поляризационными эффектами, обусловленными процессами переноса заряда. Большие сложности возникают при попытках разделить вклады в измеряемые величины различных механизмов транспорта заряда. Согласно теории Дебая, идеальный объект характеризуется одним временем релаксации, но, как правило, даже однородные объекты с трудом описываются этой теорией. Большой интерес для исследователей представляет природа релаксационных процессов, связанных с неоднородностью среды.

Известно, что 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. Этим обусловлено появление при описании таких явлений феноменологических подходов, в которых теория явления не зависит от реальной физической кинетики процесса, но которые позволяют использовать для конденсированных сред относительно небольшое количество параметров.

Один из наиболее известных вариантов такого подхода 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».

Процессы, обладающие подобными свойствами, называются эредитарными и известны уже давно. Основные принципы эредитарности сформулировал итальянский математик В. Вольтерра, посвятивший развитию идеи эредитарности в применении к физическим и экологическим задачам ряд научных работ [11]. Он же предложил использовать для описания эредитарных процессов интегральные уравнения, носящие его имя, – уравнения Вольтерры.

В современной электроразведке начало применения принципов эредитарности можно связать с работой В.В. Кормильцева [2], в которой он ввел дисперсию в уравнения электродинамики, записав выражение для тока в виде:

$$j(t) = \sigma(0)E(t) + \int_0^t K(t-\tau)E(\tau) \tau \, d\tau, \quad (1)$$

тем самым заложив основы такого феноменологического подхода.

Функция памяти  $\hat{E}(\tau)$  здесь характеризует процесс релаксации проводимости среды, но этот процесс и описывающие его уравнения практически не изучались и свелись к использованию формулы Коула-Коула при описании дисперсии электрических свойств.

Модель Коула-Коула была заимствована геофизиками из теории несовершенных диэлектриков, что было вполне оправдано. Геофизические среды являются проводниками электрического тока с низкой электропроводностью. Такие проводники можно рассматривать одновременно как диэлектрики с утечкой электрического тока [3, 1]. В теории диэлектрической релаксации достаточно подробно рассмотрены математические модели, позволяющие описать отклик, который представляется более сложным, чем простой закон Дебая, в частности, описываемый соотношением Коула-Коула, в котором частотная дисперсия определяется функцией комплексной восприимчивости.

$$\chi(\omega) = \frac{1}{1 + (i\omega\tau_0)^c} \quad (2)$$

Модель Коула-Коула определяется одним временем релаксации. В реальной среде гетерогенность зачастую определяет множество времен релаксации. При этом можно выделить два случая. Сначала рассмотрим вариант, когда среда обладает свойством самоподобия.

В последние годы при описании свойств неоднородных сред все больше внимания уделяется методам и представлениям фрактальной геометрии,

стараятся учитывать новый инвариант – самоподобие (или в более общем случае – самоаффинность), присущее многим законам природы и бесчисленным явлениям в ней.

Модели, базирующиеся на этих представлениях, и лежат в основе обоснования дисперсии электрических свойств гетерогенных сред в работах [4, 5]. Среда при этом представляется в виде иерархической совокупности соподчиненных кластеров.

Схемы, рассмотренные в этих работах (с учетом замечания, приведенного выше), формально могут быть использованы для обоснования зависимостей типа Коул-Коула и в случае изучения поляризационных явлений в гетерогенной геологической среде.

Отметим, что для случая вызванной поляризации обоснование применимости формулы Коула-Коула было рассмотрено М.С. Ждановым [12], что способствовало более широкому ее распространению.

Подход, связанный с использованием фрактальных представлений о среде, позволяет по-новому взглянуть на проблемы частотной дисперсии. Рассмотрим два момента, связанных с описанием процесса релаксации удельной проводимости в диспергирующей среде. Обратимся к уравнению (1). Процесс релаксации определяется ядром интегрального оператора, представляющим собой фактически функцию «памяти». Можно показать [4], что в среде, обладающей свойствами самоподобия, в общем случае функция памяти имеет следующую структуру:

$$K(t, \tau) = \frac{1}{\tau^2} F\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где  $\tau$  – время релаксации,  $F(t)$  – некоторая безразмерная гладкая функция.

Фрактальная модель фактически приводит к множеству релаксационных процессов, каждый из которых обладает своей функцией "памяти". При этом эффективный релаксационный процесс во всей системе есть сумма всех процессов самоподобного (фрактального) множества.

Используя Меллин-преобразование, можно аналитически рассчитать релаксацию процессов самоподобного (фрактального) множества, не конкретизируя вида функции памяти  $F(t)$ .

Для примера рассмотрим конкретную модель фрактальности среды, в которой иерархия кластеров описывается соотношением

$$R_l = R_0 \eta^l \quad \tau_l = \tau_0 \xi^l \quad -L_1 \leq l \leq L_2 \quad \eta, \xi > 1,$$

где  $R_l$  – число, определяющее размер кластера данного уровня;  $\tau_l$  – соответствующее время релаксации. В этом случае можно записать выражение для комплексной восприимчивости в виде [7, 8]:

$$\chi(\omega) = \frac{1}{1 + R(i\omega)},$$

где

$$R(i\omega) = \left[ \sum_{k=-L_1}^{L_2} C_k(d_f)(i\omega\tau_0)^{-d_f+i\Omega k} \right]^{-1}, \quad d_f = \frac{\ln \eta}{\ln \xi} \quad - \quad \text{“пространственно-временная”}$$

фрактальная размерность,  $C_k$  – величина, определяемая значениями Меллин-образа функции памяти  $F$ ,  $\Omega = \frac{2\pi}{\ln \xi}$ .

Если в разложении ограничиться нулевой гармоникой, то комплексная восприимчивость приобретает вид стандартной зависимости Коула-Коула (2):

$$\chi(\omega) = \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{d_f}},$$

где показатель  $s$  определяется величиной фрактальной размерности  $d_f$ , а время релаксации

$$\tau = [C_0^{-1}(d_f)]^{1/d_f} \tau_0$$

Таким образом, в случае фрактальной среды множество времен релаксации самоподобных множеств кластеров может быть сведено к обычной модели Коула-Коула с временем релаксации, определяемым параметрами самоподобия.

Другой вариант, когда исследуемая среда имеет сложную многокомпонентную структуру, в которой каждая компонента по-разному реагирует на приложенное внешнее поле, причем релаксация каждой компоненты слабо зависит от того, как происходит релаксация в других частях вещества. В этом случае можно сказать, что релаксация каждой компоненты идет по своему избранному каналу, а в среде как в едином целом развивается релаксационный процесс одновременно по нескольким каналам. В такой многоканальной релаксации необходимо вводить функцию памяти для каждого канала. В этом случае [7]

$$\chi(\omega) = \frac{1}{1 + \left[ \sum_{n=1}^N (i\omega\tau_n)^{-\nu_n} \right]^{-1}}$$

Зависимость комплексной восприимчивости от суммы вкладов компонент мультифазной среды отмечена и в работе [12], хотя и в несколько иной форме.

Еще один аспект, связанный со спецификой процессов во фрактальной среде, обусловлен возможностью описания таких процессов уравнениями в дробных производных. В работах, опирающихся на фрактальную модель среды, показано, что процессы релаксации во фрактальной среде описываются уравнениями с дробными производными [9].

Как правило, это уравнения типа «уравнения сверхмедленной релаксации»:

$$\frac{d^c u(t)}{dt^c} + \frac{1}{\tau_0^c} u(t) = 0, \quad c < 1, \quad ,$$

где оператор дробного дифференцирования определяется выражением

$$\frac{d^c u(t)}{dt^c} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{\Gamma(1-c)} \int_0^t \frac{u(\tau)}{(t-\tau)^c} d\tau \right].$$

Как уже отмечалось, именно такой подход, позволяет получить зависимость Коула-Коула в достаточно общем случае. Решения уравнений в дробных производных задаются обобщенными функциями. В данном случае решение выражается функцией Миттаг-Леффлера [6]:

$$\eta(t) = \eta_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(t/\tau_0)^{cn}}{\Gamma(cn+1)}, \quad t > 0, 0 < c \leq 1. \quad (4)$$

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, характеризующая весовой вклад разномасштабных структурных элементов [10].

Нахождение РВР предполагает решение интегрального уравнения вида

$$v(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) F(t, \tau) d\tau,$$

где  $g(\tau)$  – функция РВР,  $F(t, \tau)$  – известная функция, представляющая свертку модельного спада поляризационного процесса с реальным сигналом в источнике. В работе [10] в качестве функции  $F$  рассматривается дебаевский спектр. При этом в самом простом случае интегральное уравнение можно записать как

$$v(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) t [\exp(-t/\tau)] d\tau.$$

Идеальным было бы использовать в качестве ядра функцию (4), но с точки зрения практики это обернется достаточно громоздкими вычислениями. Но если вернуться к функции (4), можно отметить одно из ее асимптотических приближений. Это экспоненциальный закон Уильямса-Уотса [9], где показатель степени определяется фрактальной размерностью среды:

$$e_\nu(t) : \exp \left[ -\frac{\lambda t^\nu}{\Gamma(1+\nu)} \right].$$

Использование этого выражения в качестве ядра вместо дебаевских экспонент позволяет получить параметры РВР более точно. Это можно увидеть из рисунка 1, где показаны РВР для варианта дебаевского ядра и ядра, построенного на основе экспоненциального закона Уильямса-Уотса.

Таким образом, использование фрактальной модели среды и уравнений в дробных производных позволяет взглянуть на вопросы обоснования параметров, входящих в формулу Коула-Коула с более общих позиций, в частности, на вопросы связи этих параметров со свойствами неоднородной среды. Концепция функции памяти позволяет при определенных условиях поставить вопрос о восстановлении процесса релаксации электрических свойств среды, не задаваясь его конкретным видом, что, в свою очередь, может позволить расширить круг решаемых прогнозных задач.

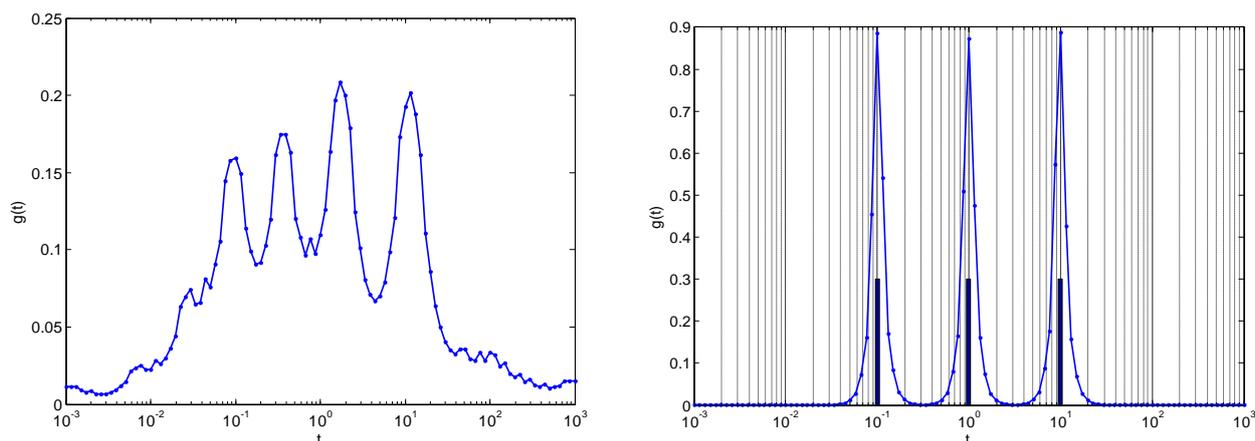


Рис. 1. Результат восстановления РВР для суммарной модели с тремя различными параметрами Cole-Cole ( $\tau_0$  равняется 0.1, 1, 10): а) – вариант дебаевского спектра; б) – вариант экспоненциального закона Уильямса-Уотса

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М. Феноменология вызванной поляризации // Геофизика. - 2013.- №1. С. 80-83.
2. Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. - Свердловск: УНЦ АН СССР, 1981. - 44 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - 620 с.
4. Новиков В.В., Комкова О.А. Диэлектрическая релаксация Коул-Коула // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2004. - № 5. - С. 61-64.
5. Хамзин А.А., Нигматуллин Р.Р., Попов И.И. Микроскопическая модель недебаевской диэлектрической релаксации. Закон Коула-Коула и его обобщение // Теоретическая и математическая физика. - 2012. - Т. 173. - № 2. - С. 314-331.
6. Goreno R., Loutchko J., Luchko Yu. Computation of the Mittag-Leffer function and its derivatives // Fract. Calc. Appl. Anal. - 2002. - Vol. 5. - P. 491-518.
7. Khamzin A.A., Nigmatullin R.R, Popov I.I Log-periodic corrections to the Cole-Cole expression in dielectric relaxation // Physica A. - 2013. - Vol. 392. - № 1. - P. 136-148.
8. Khamzin A.A., Nigmatullin R.R, Popov I.I Description of the anomalous dielectric relaxation in disordered systems in the frame of the Mori-Zwanzig formalism // Journal of Physics: Conference Series. - 2012. - Vol. 394. - P. 012013-1-6.
9. Mainardi, F. and Goreno, R. Time-fractional derivatives in relaxation processes: a tutorial survey // Fract. Calc. Appl. Anal. - 2007. - Vol. 10. - P. 269-308.

10. Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophys. J. Int.* - 2007. - Vol. 170. - P. 31-43.
11. Volterra V. *Theory of Functionals and of Integral and Integro-differential Equations.* London. Blackie & Son. - 1931. - 226 p.
12. Zhdanov M. Generalized effective-medium theory of induced polarization // *Geophysics.* - 2008. - Vol. 73. - N 5. - P. F197–F211.

© *В. В. Филатов, 2016*

## **ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ СРЕД**

### ***Антон Владимирович Чернышев***

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

### ***Георгий Михайлович Тригубович***

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

### ***Яков Фридрихович Ковальский***

НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Чернышевское шоссе, 16, старший научный сотрудник, тел. (411-36)9-09-33, e-mail: KovalskiyYaF@alrosa.ru

### ***Александр Владимирович Куклин***

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

### ***Евгений Валерьевич Крупнов***

ООО ГП «Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 30/1, заместитель директора по геофизике, тел. (383)222-82-32, e-mail: krupnov@sibgeotech.ru

При поиске объектов под поляризующимся экраном с использованием петель малого размера часто не удается зафиксировать проявление целевого объекта вследствие влияния ВП. Технология площадных зондирований от закрепленного источника в сочетании с выделением аномалий ВП с использованием петель малых размеров позволяет восстанавливать параметры ВП экрана с точностью, достаточной для достоверного восстановления индукционного сигнала от закрепленного источника, и проводить 3D-интерпретацию без учета ВП.

**Ключевые слова:** электроразведка становлением поля, индукционно-вызванная поляризация, 3D-инверсия, EM-DataProcessor.

## **TEM RESOLUTION IMPROVING IN THE STUDY OF POLARIZING MEDIUMS**

### ***Anton V. Chernyshev***

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

### ***Georgiy M. Trigubovich***

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

***Yakov F. Kovalskiy***

ALROSA Co. Ltd, 678174, Russia, Mirny, Chernyshevskoe Shosse 16, Senior Research Associate, tel. (411-36)9-09-33, e-mail: KovalskiyYaF@alrosa.ru

***Aleksandr V. Kuklin***

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

***Evgeniy V. Krupnov***

LTD «Sibgeotech», 630087, Russia, Novosibirsk, K. Marks Prospect 30/1, room 905, Deputy Director for Geophysics, tel. (383)222-82-32, e-mail: krupnov@sibgeotech.ru

When searching for objects under polarized screen using small loops it is often fail to find the target due to the IP effect. Technology of areal soundings with fixed transmitter in conjunction with IP anomalies extraction using small size loops allow to recover the IP parameters of the screen that are precise enough for reliable recovery of the induction component from fixed source. It allows to conduct the 3D inversion of the data obtained without IP account.

**Key words:** TEM soundings, induction induced polarization, 3D-inversion, EM-DataProcessor.

При исследованиях поляризующихся сред с малыми размерами установок часто поляризационная часть сигнала превосходит индукционный аномальный сигнал от целевых объектов, снижая тем самым эффективность ЭМ-исследований. Уменьшения влияния ВП можно добиться путем увеличения размеров генераторного контура [1, 2, 4]. При этом для поиска небольших по размерам объектов необходимо проведение площадных измерений по плотной сети наблюдений. При такой системе наблюдений неоднородная поляризующаяся верхняя часть разреза (ВЧР) может оказывать существенное влияние и должна быть учтена. Выходом в данной ситуации является использование комбинированной технологии проведения измерений с двумя размерами источника: источник с малым размером служит для восстановления параметров ВП в верхней части разреза, а источник с большим размером отвечает за индукционную составляющую сигнала, по которой уже проводят 3D-инверсию без учета ВП [3, 4].

Рассмотрим модель проводящего объекта на глубине 20 м с размерами в плане 200×150 м и сопротивлением 100 Ом·м, расположенного в горизонтально-слоистой среде с параметрами, приведенными в таблице. При этом будем считать, что верхняя часть разреза, представленная первым слоем, имеет изменяющиеся сопротивление и поляризуемость.

*Таблица*

Мощность (м)	Сопротивление, Ом·м
20	80
150	300

100	500
60	50
200	10
10000	1500

На рис. 1. представлены распределения проводимости ( $\sigma$ ) и поляризуемости ( $\eta$ ) первого слоя в плане. Постоянная времени  $\tau$  и степенной фактор  $s$  были заданы постоянными:  $\tau=0,1$  мс и  $s=1$ . Расчеты проведены в программном комплексе EM-DataProcessor [3].

Рассмотрим комбинацию измерений с источниками двух размеров:  $500 \times 500$  м и  $100 \times 100$  м. При этом исследования от закрепленного источника  $500 \times 500$  м проводятся по площадной технологии с шагом между точками измерений в 50 м.

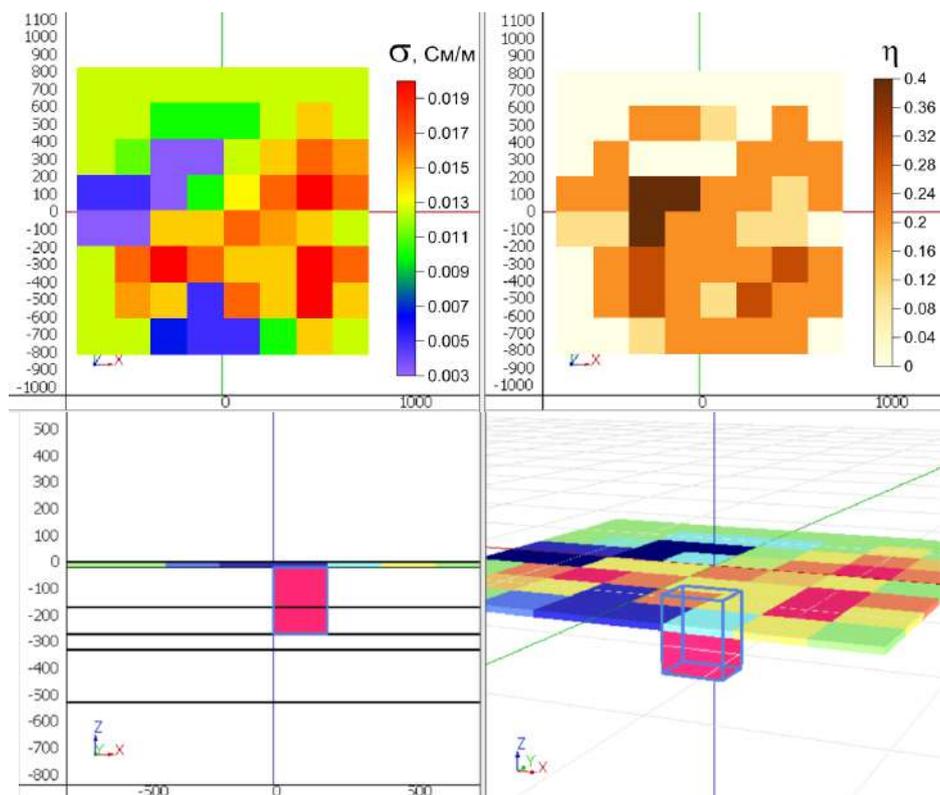


Рис. 1. Модель с неоднородной по проводимости и поляризуемости ВЧР

Для параметризации неоднородной поляризуемой ВЧР рассмотрим систему измерений с источником  $100 \times 100$  м по всей исследуемой площади. От каждого положения источника измеряется 5 точек: 1 в центре и 4 на выносе для определения наличия ВП в исследуемой области.

Поскольку вне генераторного контура сигнал ВП затухает гораздо быстрее, чем в центре, это позволяет идентифицировать наличие ВП в среде путем сравнения сигналов в центре петли и вне петли. Если же ограничиться только центральными точками, наличие ВП можно будет определить только в случае явного уменьшения сигнала вплоть до смены знака, что отвечает большим значениям поляризуемости среды. При малых же значениях

поляризуемости вполне вероятна ситуация, когда по сигналу определить наличие ВП невозможно.

В результате восстановления параметров горизонтально-слоистой модели среды по данным от петель  $100 \times 100$  м было получено распределение параметров первого слоя, приведенное на рис. 2.

Отметим, что система наблюдений с петлями  $100 \times 100$  м была выбрана искусственно смещенной относительно эпицентров поляризующихся объектов, что, очевидно, ухудшает качество восстановления параметров ВЧР, однако этого оказывается достаточно при восстановлении индукционной составляющей сигналов от источника с большими размерами.

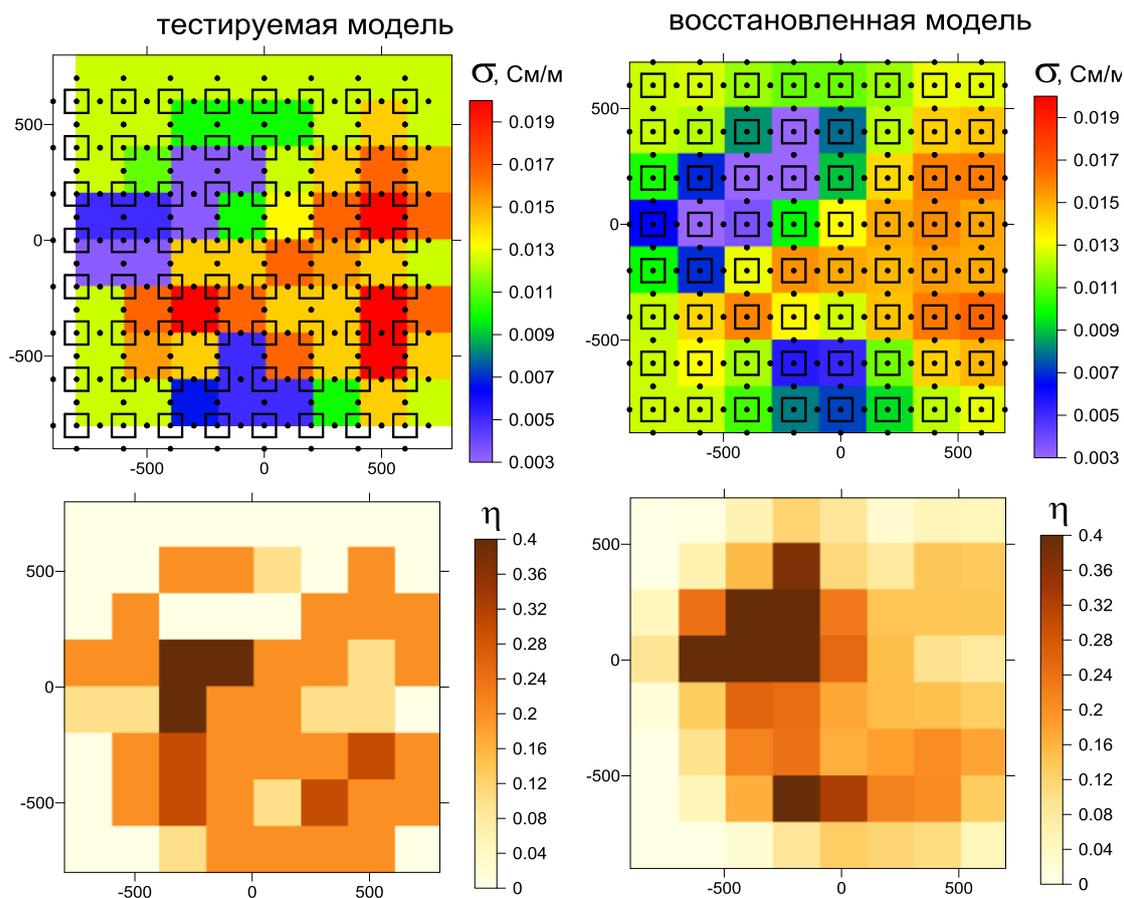


Рис. 2. Тестируемая и восстановленная модель первого слоя, а также схема измерений с петлями  $100 \times 100$  м

Следующим этапом является учет ВП полученной модели ВЧР в данных, полученных с источником  $500 \times 500$  м.

Обозначим сигнал, вычисленный для источника  $500 \times 500$  м от восстановленной 3D-модели первого слоя с ВП, как  $E_{IP}$ , а для той же модели без учета ВП – как  $E$ . Разница этих сигналов  $\Delta E_{IP} = E_{IP} - E$  и будет «сигналом ВП», который требуется вычесть из исходного («экспериментального») сигнала с целью дальнейшей интерпретации без учета ВП.

На рис. 3 приведено распределение нормированного аномального сигнала для исходной модели с ВП, нормированного аномального сигнала после вычитания сигнала ВП и нормированного аномального сигнала для исходной модели без ВП. Нормировка аномального сигнала проводится на сигнал от вмещающей среды в центре источника. Аномальный сигнал получен путем вычитания из суммарного сигнала поля от вмещающей горизонтально-слоистой среды (таблица). Как видно из рисунка, влияние ВП практически полностью убрано.

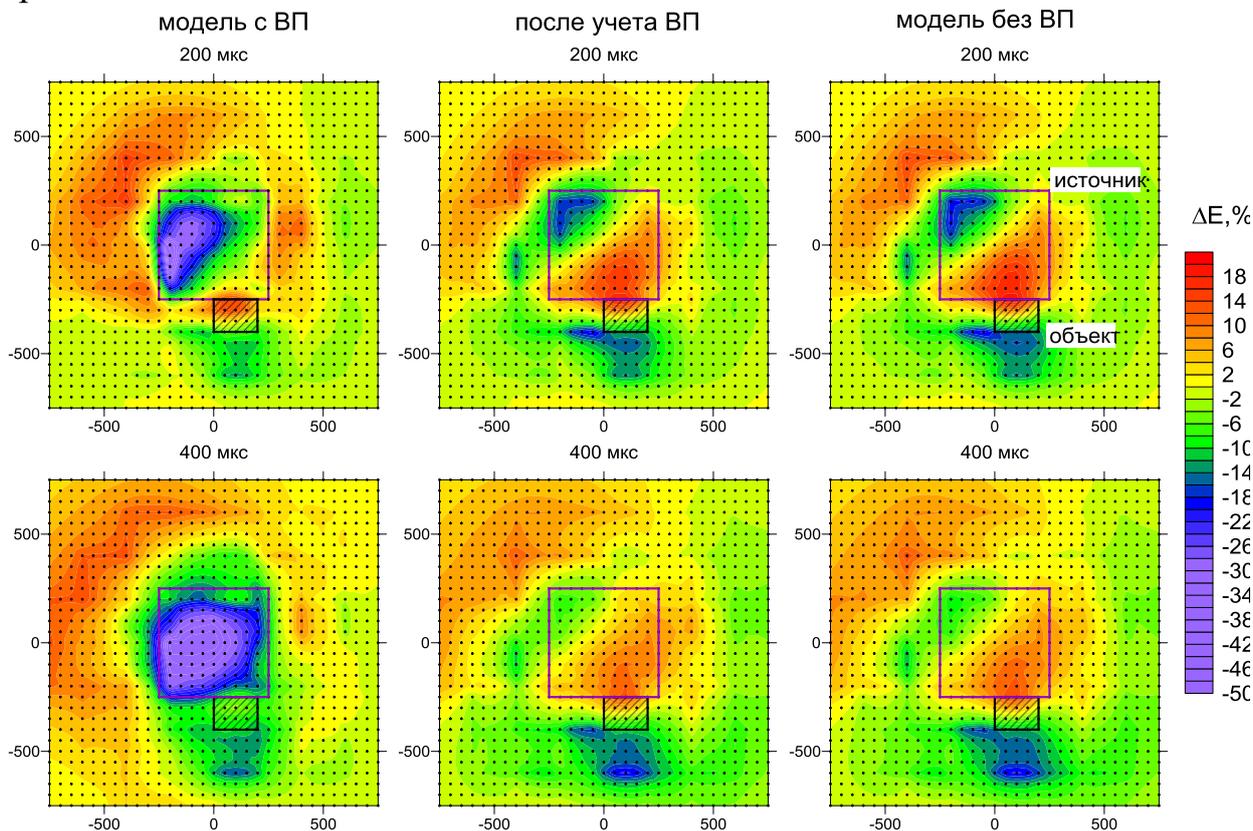


Рис. 3. Результат выделения индукционной составляющей сигнала от двухпараметрической модели ( $\sigma$ ,  $\eta$ ) в сравнении с сигналом от исходной однопараметрической модели ( $\sigma$ )

Таким образом, способ учета параметров поляризации ВЧР на основе дополнительных измерений с источником малых размеров позволяет проводить картирование параметров поляризации и корректировать сигнал от источника больших размеров с целью дальнейшей трехмерной интерпретации без учета ВП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Что главное в геофизике: гео или физика? // Геофизика. - 2015. - № 2. - С. 69-78.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учетом 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 // “Гео-Сибирь – 2014”. Междунар. научн. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. - Новосибирск: СГГА, 2014. - Т. 2. - № 3. - С. 95-101.

4. 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.

© А. В. Чернышев, Г. М. Тригубович, Я. Ф. Ковальский,  
А. В. Куклин, Е. В. Крупнов, 2016

УДК 550.837+551.248.2

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ УЧАСТКА МУХОР-ТАРХАТА В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ ГОРНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

*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. (913)788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@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

На участке Мухор-Тархата в западной части Чуйской впадины с 2007 г. по настоящее время проводятся регулярные измерения несколькими модификациями метода зондирования становлением поля (ЗС) для получения более полной информации о вариациях электрофизических параметров разреза (УЭС, электрической анизотропии). Уже показано, что вариации геоэлектрических параметров существенно зависят не только от сейсмического воздействия, но и от строения территории исследования, размещения разломных структур относительно пунктов наблюдений [1]. Геоэлектрическое строение этого участка, характеристики разломных нарушений получены по данным ЗС и электротомографии.

**Ключевые слова:** геоэлектрическое строение, зондирование становлением поля, электротомография, разломная структура, вариации геоэлектрических параметров.

## **FEATURES OF GEOELECTRIC STRUCTURE ON THE SITE MUKHOR-TARKHAN OF CHU BASIN IN GORNY ALTAI ACCORDING TEM AND ERT DATA**

*Aleksandr E. Shalaginov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Junior Researcher, tel. (913)788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

*Nina N. Nevedrova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Leading Researcher, tel. (913)890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

On the site Mukhor-Tarkhan in the western part of Chu basin regular measurements are carried out from 2007 to present, in several modifications of the TEM for more information about the variations of geoelectric parameters of the section (resistivity, electric anisotropy). Already shown that variations of geoelectric parameters greatly depend on not only the seismic action, but also the structure of the study area, the placement of fault structures with respect to observation points [1]. Geoelectric structure of the site, characteristics of fault disturbances are obtained by TEM and ERT data.

**Key words:** geoelectric structure, transient electromagnetic sounding, ERT, fault structure, variations of geoelectric parameters.

Исследования методами геоэлектрики выполняются в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. с  $M=7.3$ , которое произошло в ближайшем горном обрамлении Чуйской впадины Горного Алтая. На участке, расположенном в районе пос. Мухор-Тархата западной части Чуйской впадины, осуществляются регулярные наблюдения за изменениями геоэлектрических параметров под воздействием происходящих сейсмических процессов афтершокового периода, а также уточняется геоэлектрическое строение (рис. 1).

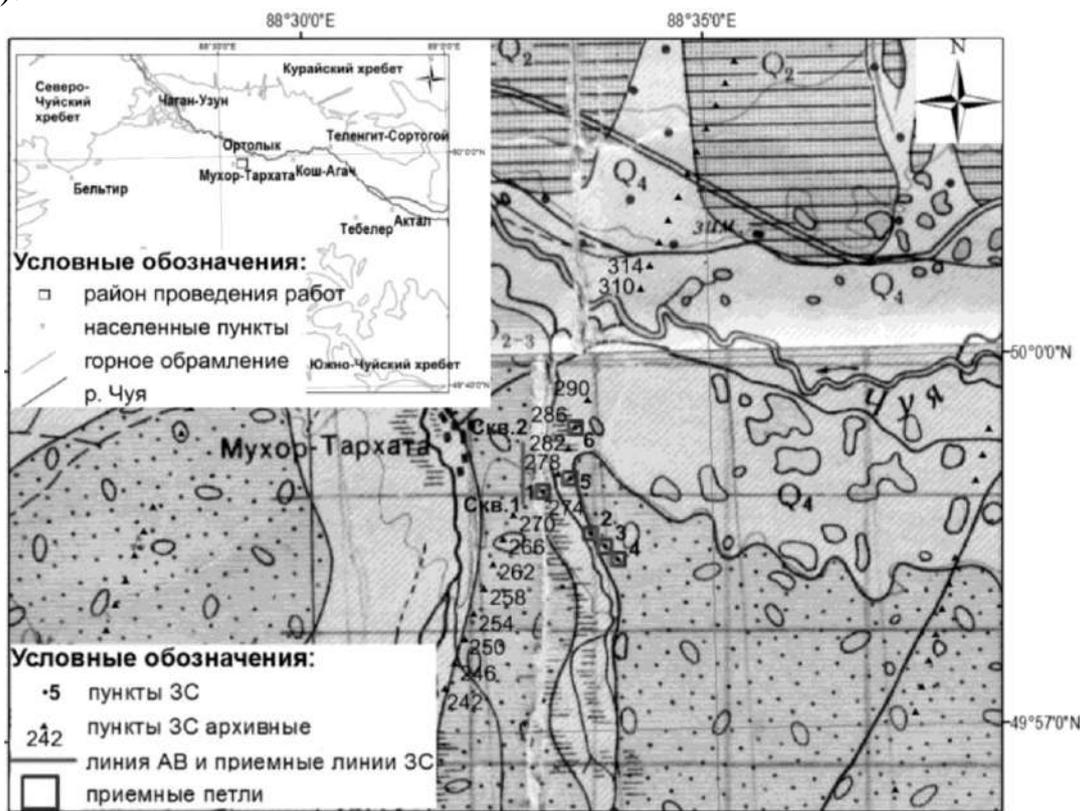


Рис. 1. Участок регулярных наблюдений в районе п. Мухор-Тархата Чуйской впадины Горного Алтая

По результатам предшествующих исследований построена основная геоэлектрическая модель Чуйской депрессии, получены оценки УЭС и толщин горизонтов осадочного чехла, характеристики верхней части фундамента до

разрушительного Чуйского землетрясения, выполнена геолого-стратиграфическая привязка полученных геоэлектрических горизонтов [2]. В 2014-2015 гг. выполнен значительный объем полевых работ на участке Мухор-Тархата методами ЗС и электротомографии. В результате добавления этих новых данных получено более полное представление об его геоэлектрическом строении [3].

Детальная карта глубин до фундамента построена по данным ЗС с соосными установками с использованием ЗС 2014-2015 гг. и архивных ЗС 1980-х гг. (рис. 2). Видно, что в центральной части исследуемого участка выделяется область прогиба, которая соответствует положению русла р. Мухор и разломной структуре, предположительно проходящей по правому берегу. На геоэлектрических разрезах по профилям ЗС А-А и Б-Б, пересекающих участок с юго-запада на северо-восток, наблюдается блоковое строение осадочной толщи с погруженным блоком в зоне предполагаемого разлома.

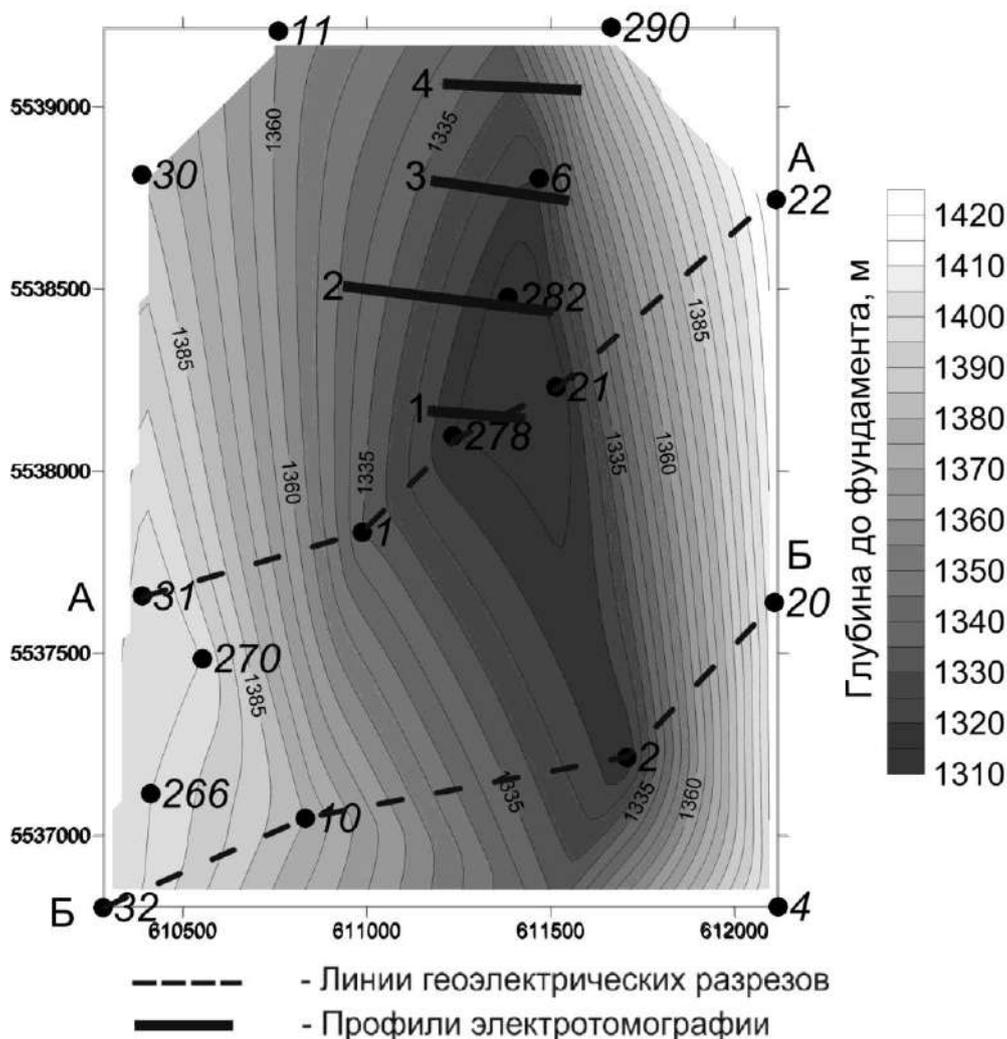


Рис. 2. Карта глубин до фундамента на участке исследования по полевым данным современных и архивных измерений методом ЗС с соосными установками

Для подтверждения разломной структуры и определения ее приповерхностных геоэлектрических характеристик, интервалов удельного сопротивления, геометрических размеров (ширины, наклона сместителя) выполнены измерения методом электротомографии по четырем параллельным профилям, расположенным перпендикулярно течению р. Мухор в районе пикетов регулярных наблюдений ЗС 5 и 6 (рис. 2).

В восточной части геоэлектрических разрезов электротомографии выделяется проводящая наклонная зона, которая прослеживается практически от дневной поверхности до глубины в 40 м и с учетом геологических данных интерпретируется как разломная структура (рис. 3). Ширина разломной зоны до глубины 20 м непостоянна и изменяется для разных профилей от 20 до 40 м, угол наклона сместителя соответствует 40-50°, УЭС зоны до 100 Ом·м. На глубине более 20 м ширина зоны, по данным всех профилей электротомографии, увеличивается и имеет стабильную ширину около 100-150 м, что согласуется с данными ЗС.

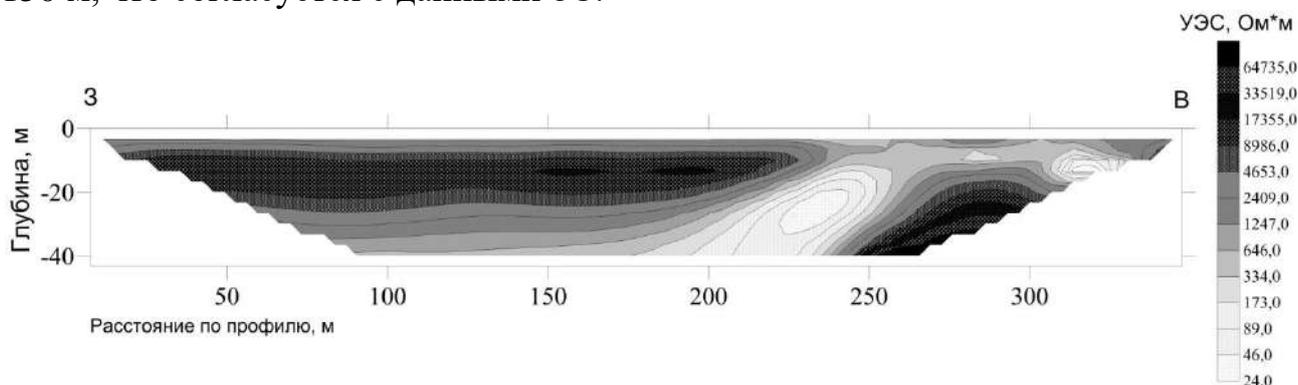


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по данным электротомографии (профиль 3) в районе пос. Мухор-Тархата

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе интерпретации комплекса данных ЗС и электротомографии получены новые сведения о геоэлектрическом строении участка Мухор-Тархата. Для определения местонахождения и параметров разломной структуры опробована методика с использованием данных методов ЗС и электротомографии: по данным ЗС оконтурен участок предполагаемой разломной зоны, а по данным электротомографии определено ее приповерхностное геоэлектрическое строение.

Таким образом, присутствие разломной зоны подтверждается геологическим истолкованием данных геоэлектрики (современных и архивных ЗС, электротомографии). Сведения о строении участка будут использованы для анализа результатов электромагнитного мониторинга.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофизический журнал. - 2012. - Т. 34. - № 4. - С. 209-223.

2. Неведрова Н.Н. и др. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. - 2001. - Т. 42. - №9. - С. 1399-1416.

3. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение участка регулярных наблюдений за электромагнитными параметрами в Чуйской впадине Горного Алтая // Вестник алтайской науки. - 2015. - № 2. - С. 310-318.

© А. Е. Шалагинов, Н. Н. Неведрова, 2016

## ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРИЖАТИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДА В СКВАЖИНЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*Сергей Владимирович Яскевич*

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 динамических проблем сейсмологии, e-mail: yaskevichsv@gmail.com

*Антон Альбертович Дучков*

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией динамических проблем сейсмологии, e-mail: duchkova@ipgg.sbras.ru

В проектах по скважинному микросейсмическому мониторингу в России часто обсуждается низкое соотношение сигнал/шум. В работе с помощью интерферометрии проанализировано несколько наборов реальных данных скважинного микросейсмического мониторинга. Целью было оценка прижатия приборов к стенкам скважины и исключение влияния этого фактора на качество данных как основного. Данные характеризовались низким соотношением сигнал/шум. Результаты интерферометрии говорят о хорошем прижатии. Следует отметить, что для одного набора данных, предположительно с очевидной проблемой прижатия на одном из приемников, проблема прижатия с помощью исследуемого метода выявлена не была. Также в рамках исследования показано, что интерферометрия может быть использована в качестве теста для анализа достаточности снижения уровня жидкости в наблюдательной скважине.

**Ключевые слова:** микросейсмический мониторинг, обработка данных, интерферометрия, прижатие прибора, затухание, слабый сигнал.

## RECEIVERS COUPLING ASSESSMENT WITH INTERFEROMETRY APPROACH

*Sergey V. Yaskevich*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Researcher, e-mail: yaskevichsv@gmail.com

*Anton A. Duchkov*

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, Ph. D., Head of the Laboratory, e-mail: duchkova@ipgg.sbras.ru

For projects of downhole microseismic monitoring in Russia, often low signal to noise ratio is discussed. We analyzed several datasets with interferometric approach to exclude receivers coupling as the issue of poor data and interferometry analysis shows good clamping or coupling quality in our datasets even for the dataset with coupling issue. We show on the real data that borehole receiver clamping problems are not always recovered by interferometry. In some cases interferometry may be used as a good test for analysis of weather liquid level reduction was sufficient.

**Key words:** microseismic monitoring, data processing, interferometry, coupling, clamping.

## ВВЕДЕНИЕ

Микросейсмический мониторинг является популярной технологией, которая широко используется в практических приложениях добычи нефти и газа за рубежом и в России. Частота ее применения обусловлена тем, что различные операции, сопровождающие добычу сырья или закачку, вызывают значительную сейсмическую активность, которую можно регистрировать, а путем обработки зарегистрированных данных извлекать ценную информацию о состоянии, качественных или количественных признаках, выполняемых операциях.

Скважинные микросейсмические системы наблюдений, как правило, позволяют осуществлять сейсмическую запись с высоким соотношением сигнал/шум. Считается, что сейсмические приемники размещены в тихой (относительно наземных систем наблюдений) обстановке глубоких скважин, близко

к наблюдаемым процессам. Обычно сейсмоприемники прижаты к стенке ствола скважины с помощью прижимного механизма, с отношением этого усилия прижима к массе зонда, равным 10 или больше. Технологически приемники должны быть очень хорошо прижаты для записи сигнала с частотой до 200-500 Гц. Когда приемники размещены в глубокой скважине, трудно проверить, что прижимной механизм хорошо работает. Кроме того, проблемой являются не только прижим, а также ряд параметров, таких как неровности поверхности стенок скважины, качество цементажа и, возможно, некоторые другие. Основной трудностью выявления проблемы с установкой приборов является то, что для контроля качества установки необходимо проанализировать запись высокочастотного микросейсмического события, а последние начинают появляться, когда возможности поменять что-либо в установке уже нет.

Недавно Y. Vaezi и M. Van der Baan [1] предложили использовать интерферометрию для оценки качества прижима сейсмического зонда. Методы интерферометрии широко обсуждаются в современной сейсморазведке и сейсмологии [2, 3]. Постулируется, что записи шума содержат записи от событий, отношение сигнал/шум для которых намного ниже 1. Из этих записей можно восстановить прямые волны от одного приемника до остальных, если они одновременно записывали фоновый шум в течении промежутка времени с помощью достаточно простой обработки, объединенной под названием «интерферометрия». В микросейсмических приложениях было показано, что с помощью интерферометрии можно очень грубо калибровать скоростную модель для продольных волн [4]. Y. Vaezi и M. Van der Baan [1] выдвинули гипотезу о том, что чем более низкочастотный фильтр (пропускающий) используется, чтобы получить прямую волну из сумм кросс-корреляций записей, тем больше проблем с качеством прижима. Авторы называют частоту

пропускания ФНЧ, при которой появляется отчетливая фаза прямой волны “emerging frequency”, частотой появления, и чем она выше, тем лучше прижатие прибора.

В работе мы проанализировали данные скважинного микросейсмического мониторинга с помощью интерферометрии по методике, описанной в [1].

## МЕТОД

Представим последовательность применяемых процедур.

1. На первом этапе из данных каждого сейсмоприемника удаляются средний и линейный тренды.

2. Далее наблюдаемые трассы корректируются за отклик приборов.

3. Далее важным этапом является выбор ширины временного окна, на котором впоследствии производится кросс-корреляция (окно должно быть достаточным, чтобы обеспечить появление сигналов прямых волн на результатах кросс-корреляций).

4. Далее отдельные окна нормируются во временной области, чтобы уменьшить влияние землетрясений, нестационарных источников шума и инструментальных помех на кросскорреляционные функции (для этого применяется 1-битная нормировка (замена наблюдаемых амплитуд их знаком)).

5. Для очистки данных от влияния стационарных помех применяются процедуры спектрального отбеливания. При этом спектр сигнала нормируется на свое сглаженное представление.

6. На следующем этапе выбирается опорный геофон, с которым рассчитываются кросс-корреляции трасс, записанных всеми остальными сейсмоприемниками.

7. Результаты кросс-корреляций складываются, результат фильтруется и нормируется на максимум для каждой кросскорреляционной функции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

В данной статье мы имеем дело с тремя наборами данных, наблюдаемыми 210-метровой расстановкой скважинных трехкомпонентных приборов, всего восемь сейсмоприемников. Во всех случаях наблюдательная скважина вертикальна, в основном обсуждаются два набора и упоминается третий. В обработке участвовали 5 минут непрерывной записи, нарезанные на временные интервалы по 10 секунд. Мы применили последовательность обработки, описанную в предыдущем разделе. Сами данные были записаны до начала гидроразрыва.

Первый из наборов данных был обработан нами полностью по стандартной методике обработки данных микросейсмического мониторинга. Одной из проблем было малое количество высокоамплитудных микросейсмических событий, запись одного из них представлена на рисунке 1 (эта запись не входила в выборку для интерферометрии). Для этого набора данных результаты

интерферометрии приведены на рис. 1 с параметрами фильтра [2-5-60-80] и на рис. 2 без фильтра (слева) и с фильтром [2-5-30-40] (справа). Мы кросс-коррелировали записи только вертикальной компоненты; базовым приемником был выбран четвертый.

Также в этом наборе данных наблюдалось большое количество трубных волн, которых, однако, не было в пятиминутной выборке, которая анализировалась. На неотфильтрованных данных преобладает энергия трубных волн с кажущейся скоростью 1,5 км/с, после фильтрации мы получим четкую фазу

*P*-волн со скоростью, соответствующей акустическому каротажу, эта фаза также явно выделяется для обоих параметров фильтра.

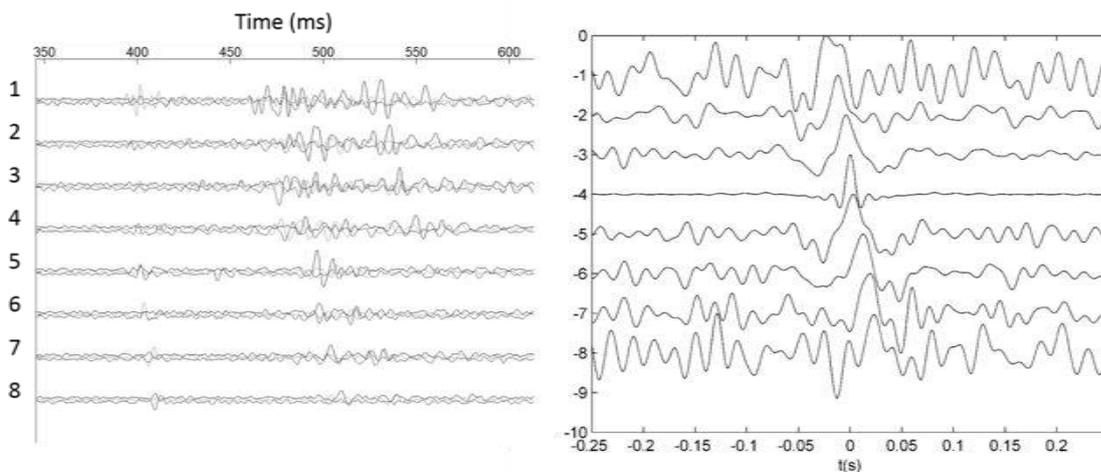


Рис. 1. На левом рисунке пример триггер файла для первого набора данных: три компоненты на приемник 1-2-3 соответствуют X, Y, Z; справа нормированные функции кросс-корреляций с параметрами фильтра 2-5-60-80, четвертый приемник выбран в качестве базового

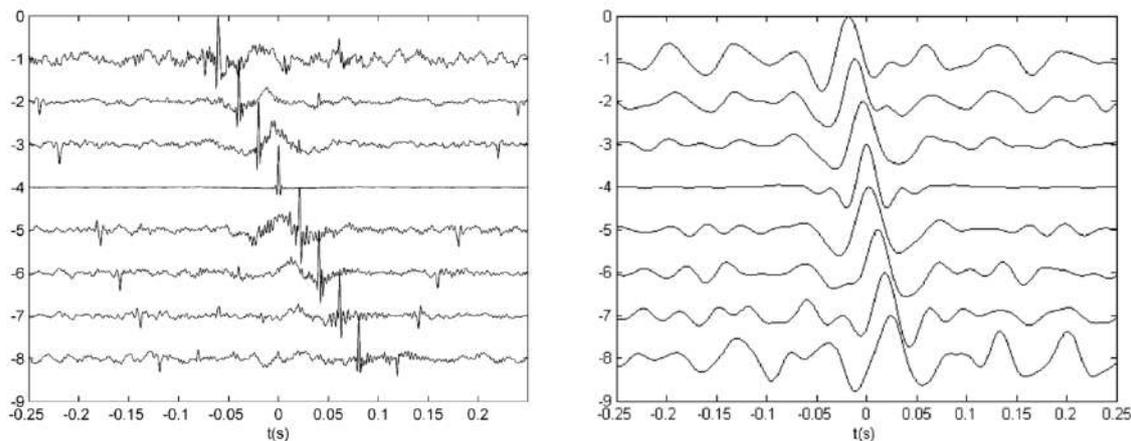


Рис. 2. Для первого набора данных слева нормированные функции кросс-корреляций без фильтра; справа с фильтром 2-5-30-40

На рис. 3, 4 показаны результаты аналогичной обработки второго набора данных, только в качестве базового был выбран первый сейсмоприемник. На примере записи микросейсмического события для этого набора данных можно наблюдать проблему прижима 4-ого геофона (дребезг горизонтальной компоненты) (см. рис. 3 (слева)). Мы не видим отражение этого в полученных результатах интерферометрии. Результаты интерферометрии аналогичны результатам по первому набору данных, только трубные волны распространяются только вниз. При наблюдении третьего набора данных в наблюдательной скважине был значительно понижен уровень жидкости, и в результатах применения интерферометрии не содержится трубной волны вовсе. Это делает проблематичным сравнение его с первыми двумя наборами данных, где спектры прямой и трубной волн накладываются друг на друга.

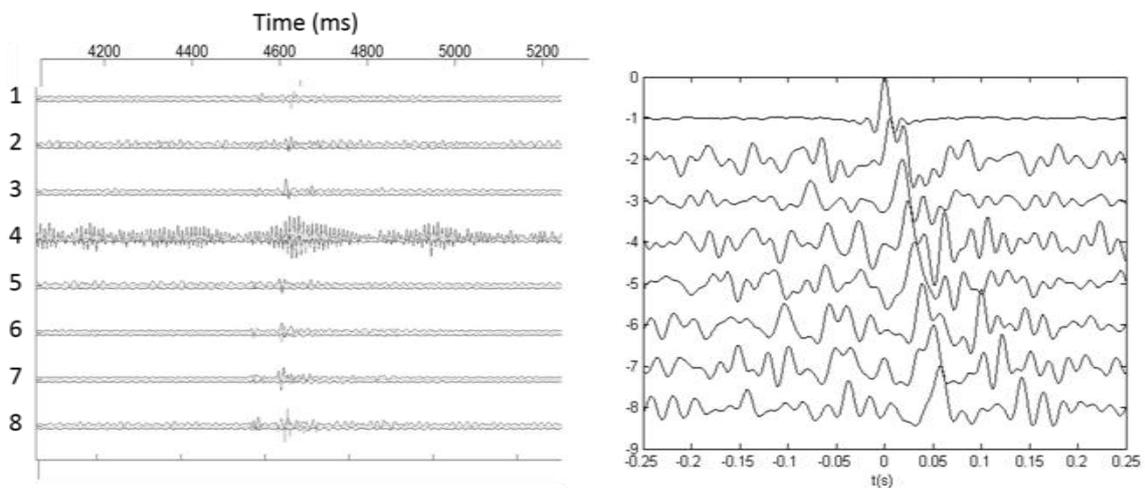


Рис. 3. На левом рисунке пример триггер файла второго набора данных: три компоненты на приемник, 1-2-3 (внутри троек) соответствуют X, Y, Z; справа нормированные функции кросс-корреляций с параметрами фильтра 2-5-60-80 , первый приемник выбран в качестве базового

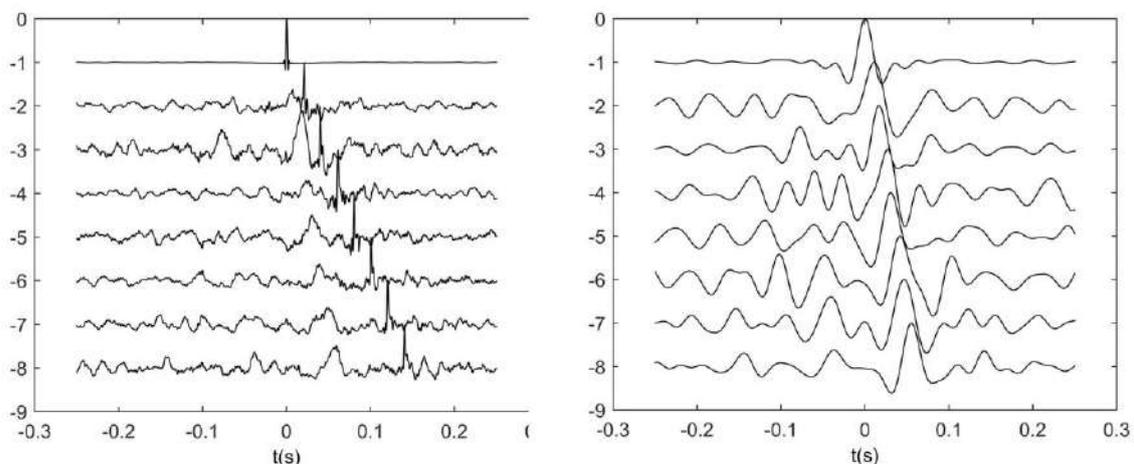


Рис. 4. Слева нормированные функции кросс-корреляций второго набора без фильтра; справа с фильтром 2-5-30-40

## ВЫВОДЫ

В нашем исследовании мы применили методику интерферометрии для нескольких реальных наборов данных скважинного микросейсмического мониторинга. Целью было понять, связано ли низкое количество наблюдаемых микросейсмических событий с качеством установки приборов в скважины.

Интерферометрия не показывает серьезных проблем прижатия в анализируемых массивах данных и говорит о необходимости поиска других причин недостаточного количества обнаруженных микросейсмическими событиями.

В работе с помощью интерферометрии были воспроизведены четкие фазы прямых *P*- и трубных волн. Для двух из трех наборов данных кросс-корреляции необходимо было фильтровать для получения отдельных трубной и прямой волн. Считается, что появление трубной волны не характеризует качество установки прибора в скважине, поэтому здесь выбираемые параметры фильтрации не отражают качество установки приборов, так как в основном они определяют возможность отделить трубную волну от прямой.

Для одного из наборов данных мы наблюдали умеренные проблемы, предположительно связанные с прижатием у одного из сейсмоприемников, интерферометрия, в свою очередь, не показывает каких-либо проблем для этого конкретного геофона в изучаемой частотной области. Предположительно, с помощью такой методики проблемы не выявляются.

С другой стороны, использование интерферометрии может послужить подсказкой для снижения уровня жидкости в наблюдательной скважине, чтобы снизить интенсивность трубных волн.

Работа была поддержана грантом РФФИ N 16-35-60087

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vaezi Y., Van der Baan M. Interferometric assessment of clamping quality of borehole geophones // *Geophysics*. - 2015. - Vol. 80(6). - P. WC89-WC98.
2. Wapenaar et al. Tutorial on seismic interferometry: Part 1 Basic principles and applications // *Geophysics*. - 2010. - Vol. 75(5). - P. 75A195-75A209.
3. Schuster G.T. *Seismic interferometry*. - Cambridge University Press, 2009.
4. Grechka V., Zhao Y. Microseismic interferometry // *The Leading Edge*. - 2012 - Vol. 31(12). - P. 1478-1483.

© С. В. Яскевич, А. А. Дучков, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>О. Б. Бочаров, А. И. Макаров, А. П. Мосин, А. В. Серяков.</i> Влияние технологических операций на данные индукционного каротажа в процессе бурения.....	3
2. <i>А. С. Сердюков, В. В. Оленченко, А. В. Яблоков, Г. С. Чернышов, П. А. Дергач.</i> Исследование строения и свойств приповерхностных слоев связных грунтов на основе сейсмических данных.....	8
3. <i>А. С. Сверкунов, Н. И. Паули, А. И. Попов.</i> Аппаратурно-программный комплекс серии «Импульс-ВП».....	13
4. <i>А. А. Сафиуллина, А. А. Власов.</i> Автоматическое построение трехмерных геоэлектрических моделей по результатам одномерной интерпретации с помощью диаграмм Вороного.....	18
5. <i>М. Г. Рохина, Н. Н. Неведрова.</i> Применение геоинформационных технологий для интерпретации и анализа данных нестационарного электромагнитного зондирования (на примере нефтегазоносного участка Восточной Сибири).....	23
6. <i>Н. О. Кожевников, Ю. А. Агафонов, Е. Ю. Антонов, И. В. Буддо.</i> Проявления магнитной вязкости пород трапповой формации при работах методом ЗСБ на Сибирской платформе.....	28
7. <i>Ю. И. Колесников, К. В. Федин.</i> Обнаружение подземных пустотелых объектов по записям микросейсм: натурный эксперимент.....	33
8. <i>Ю. И. Колесников, К. В. Федин.</i> Обнаружение ослабленных зон в целиках горных выработок по данным пассивных сейсмоакустических измерений.....	38
9. <i>Н. О. Косогова, Д. В. Баранов, А. А. Власов, Д. В. Тейтельбаум.</i> Информационное средство хранения, мониторинга и первичной обработки данных забойной телеметрической системы измерений в процессе бурения.....	43
10. <i>П. С. Лапин.</i> Макросейсмические проявления сильных землетрясений, современная геодинамика и нефтепроявления Предалтайской равнины.....	48
11. <i>А. А. Лапковская, В. В. Оленченко, Г. С. Дьякова.</i> Геоэлектрическое строение каменного глетчера сукорского оползня-обвала (Горный Алтай).....	53
12. <i>А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, Д. В. Кречетов.</i> О мониторинге состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе совместного анализа изменений ее собственных частот и уровня водохранилища.....	58

13. <i>А. И. Макаров, А. Н. Василевский, И. Н. Ельцов, Г. В. Дятлов, Ю. А. Дашевский.</i> Оценка возможностей метода определения глубины трещины гидроразрыва пласта с использованием многократных измерений электрического (низкочастотного) поля.....	63
14. <i>С. Ю. Малышков, В. Ф. Гордеев.</i> Регистратор импульсных электромагнитных полей для геофизической разведки .....	68
15. <i>А. В. Мамаева, Е. Н. Махнач.</i> Разработка геоэлектрической модели рифовых комплексов в пределах восточного борта Курейской синеклизы по данным магнитотеллурических зондирований.....	73
16. <i>И. В. Михайлов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина.</i> Алгоритм совместной двумерной инверсии данных электромагнитного и электрического каротажа .....	78
17. <i>Д. И. Михальченко.</i> Анализ эффективности теплоизолированной лифтовой колонны газовой скважины в криолитозоне на основании численного теплотехнического моделирования.....	82
18. <i>Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, А. В. Панов, Н. А. Мирошниченко.</i> Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива при обработке Таштагольского железорудного месторождения по результатам 3D-моделирования.....	87
19. <i>Н. Н. Неведрова, П. В. Пономарев, И. О. Шапаренко.</i> Геоэлектрические модели разломных структур Чуйской впадины по данным электротомографии.....	92
20. <i>Д. А. Неклюдов, М. И. Протасов.</i> Быстрое двухточечное трассирование лучей для 3D межскважинной томографии с учетом ограниченности спектра зондирующего сигнала.....	97
21. <i>В. А. Киндюк, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов.</i> Интерпретация каротажных данных с использованием единой электрогидродинамической модели прискважинной зоны .....	102
22. <i>Т. В. Нефедкина, Р. И. Вылегжанин, Е. Ж. Ракишева, П. А. Лыхин, А. М. Айзенберг.</i> Влияние кривизны отражающей границы на АVO-отклик закритических РР отражений и его теоретическое описание .....	107
23. <i>М. Н. Балдин, А. Ю. Белоносов, М. В. Прямов, В. М. Грузнов.</i> Опыт геохимической съемки с пассивными концентраторами на сильно обводненной территории Тевризского газоконденсатного месторождения.....	113
24. <i>Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев, В. В. Романенко, С. Б. Субботин.</i> Температурный режим «атомного» озера (Семипалатинский испытательный полигон).....	117
25. <i>Д. В. Борисов.</i> Применение ГИС в задачах визуализации залегающих пластов для определения перспективных нефтегазоносных территорий .....	123

26. <i>А. Н. Василевский, О. Б. Бочаров, К. М. Эдвардс.</i> Применение скважинной гравиразведки для оценки уплотнения и проседания резервуара.....	127
27. <i>Л. А. Гагарин, И. И. Христофоров, К. И. Бажин, Л. С. Лебедева, Н. В. Торговкин, В. А. Куваев, И. Е. Мисайлов.</i> Оценка оползневых процессов в скальных породах в Южной Якутии .....	132
28. <i>Н. А. Голиков, Т. И. Ельцов, С. Н. Мелкозерова, М. Й. Шумскайте, А. С. Юнашева.</i> Поведение электрофизических параметров и ЯМР-характеристик грунтовых композитов, кондиционированных криогелем, при циклическом изменении температуры.....	138
29. <i>Е. С. Горностаева, А. С. Калганов, В. В. Оленченко, Е. Ю. Юдицких.</i> Применение электротомографии методом вызванной поляризации при решении рудопоисковых задач на Сыпчугурской рудоносной площади (Забайкальский край).....	143
30. <i>П. В. Громыко, В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин.</i> О причинах увеличения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции .....	148
31. <i>А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова.</i> Газоаэрозольный перенос элементов из хвостохранилища Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская область).....	152
32. <i>В. Н. Доровский, Ю. В. Перепечко.</i> Измерение пористости и проницаемости формации. Радиальные скважинные волны.....	157
33. <i>А. Н. Дробчик, А. А. Дучков, Н. А. Голиков.</i> Автоматизация лабораторного эксперимента на примере измерения акустических свойств гидратосодержащих образцов.....	162
34. <i>А. А. Дучков, А. Д. Дучков, А. Н. Дробчик, Н. А. Голиков, М. Е. Пермяков.</i> Лабораторное изучение акустических свойств неконсолидированных образцов, содержащих гидраты метана .....	167
35. <i>П. Г. Дядьков, О. А. Кучай, Ю. М. Романенко.</i> Особенности сейсмотектонических деформаций при подготовке и реализации землетрясения Мауле (Чили), 27.02.2010 Г., Mw = 8,8 .....	172
36. <i>Т. И. Ельцов, Н. А. Голиков.</i> Измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов коллектора в диапазоне частот от 1 кГц до 1 гГц.....	177
37. <i>А. А. Еманов, Е. В. Лескова, А. В. Фатеев, А. Ф. Еманов.</i> Оценка сейсмической опасности г. Анжеро-Судженска Кемеровской области и прилегающих территорий.....	182
38. <i>А. В. Злобинский, В. С. Могилатов.</i> Комплексные работы электроразведочными методами, использующими электромагнитные поля ТЕ- и ТМ-поляризации .....	187
39. <i>И. Н. Злыгостев, Н. Ю. Степанова, А. Ю. Бондаренко.</i> Разработка концепции системы для решения навигационных задач на борту беспилотного летательного аппарата .....	192
40. <i>Е. В. Касаткина, И. Ю. Кулаков, А. Н. Василевский.</i> Источники питания супервулкана Тоба по сейсмическим данным.....	197

41. <i>Н. К. Каюров, В. Н. Глинских, К. В. Сухорукова.</i> Характеристика сложнопостроенных палеозойских коллекторов Арчинского месторождения (Томская область) по данным ГИС .....	202
42. <i>Н. О. Кожевников, М. В. Шарлов, Р. В. Шарлов, С. М. Стефаненко, Ю. А. Агафонов.</i> Особенности выключения «большого» и «малого» токов в незаземленной горизонтальной петле .....	207
43. <i>Д. О. Кучер, В. В. Оленченко.</i> Модель распространения дренажных растворов в геологической среде по данным электроразведки.....	212
44. <i>Д. Ю. Кушнир, Г. В. Дятлов, А. И. Макаров, Ю. А. Дашевский.</i> Двумерная интерпретация синтетических данных электромагнитного каротажа вблизи выклинивания пласта или разлома .....	217
45. <i>А. А. Белая, Е. Ю. Гошко, Н.В. Симанкович, Г. М. Тригубович.</i> Оценка глубинной геоэлектрической модели по данным МТЗ с использованием 3D-моделирования на опорно-геофизическом профиле 1-СБ .....	223
46. <i>В. М. Соловьев, В. Н. Кашун, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, Н. А. Серезников.</i> Активный виброрейсмический мониторинг Алтае-Саянского региона.....	229
47. <i>В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников, А. В. Лисейкин, И. Е. Романенко, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер.</i> Особенности сейсмического строения структур Забайкальской части Центрально-Азиатского складчатого пояса в створе опорного геофизического профиля 1-СБ .....	234
48. <i>В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, В. М. Семибаламут, С. В. Панов, М. Д. Парушкин, С. Ф. Панин.</i> Регистрация геофизических процессов с помощью лазерного деформографа (сейсмостанция Талая, Байкальская рифтовая система) .....	239
49. <i>В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, С. Ф. Панин, Е. В. Бойко, Е. И. Грибанова.</i> Приливная модуляция слабой сейсмичности .....	245
50. <i>А. Н. Фаге, И. В. Суродина, И. Н. Ельцов.</i> Изучение таликовых зон под термокарстовыми озерами при помощи метода электротомографии (по полевым измерениям и трехмерному численному моделированию).....	250
51. <i>В. В. Филатов.</i> Формула Коула-Коула и фрактальность среды.....	255
52. <i>А. В. Чернышев, Г. М. Тригубович, Я. Ф. Ковальский, А. В. Куклин, Е. В. Крупнов.</i> Повышение разрешающей способности импульсной индуктивной электроразведки при исследовании поляризующихся сред .....	261
53. <i>А. Е. Шалагинов, Н. Н. Неведрова.</i> Особенности геоэлектрического строения участка Мухор-Тархата в Чуйской впадине Горного Алтая по данным нестационарных зондирований и электротомографии .....	266
54. <i>С. В. Яскевич, А. А. Дучков.</i> Об оценке качества прижатия	

сейсмического зонда в скважине с помощью интерферометрии..... 270

## CONTENTS

1. <i>O. B. Bocharov, A. I. Makarov, A. P. Mosin, A. V. Seryakov.</i> The influence of technological operations on the resistivity logging while drilling 3	8
2. <i>A. S. Serdyukov, V. V. Olenchenko, Al. V. Yablokov, G. S. Chernyshov, P. A. Dergach.</i> Seismic exploration of near surface soil structure and properties.....	8
3. <i>A. S. Sverkunov, N. I. Pauli, A. I. Popov.</i> Hardware-software complex of «Impulse-IP» series .....	13
4. <i>A. A. Safiullina, A. A. Vlasov.</i> 3D geoelectric models building based on 1D interpretation results using Voronoi diagrams .....	18
5. <i>M. G. Rohina, N. N. Nevedrova.</i> GIS application for the interpretation and analysis tem-soundings data (on the example of Eastern Siberia petroleum-bearing land).....	23
6. <i>N. O. Kozhevnikov, Yu. A. Agafonov, E. Yu. Antonov, I. V. Buddo.</i> The effect of Siberian flood basalt magnetic viscosity on the TEM survey data .....	28
7. <i>Yu. I. Kolesnikov, K. V. Fedin.</i> Detection of underground hollow objects using microseisms records: natural experiment.....	33
8. <i>Yu. I. Kolesnikov, K. V. Fedin.</i> Detection of weakened zones in the mine working pillars using passive seismo-acoustic measurements (physical modelling).....	38
9. <i>N. O. Kosogova, D. V. Baranov, A. A. Vlasov, D. V. Teytelbaum.</i> The information tool storage, monitoring and initial processing of data downhole telemetry system measurement while drilling.....	43
10. <i>P. S. Lapin.</i> Macroseismic events strong earthquakes, modern geodynamics and shows of oil of the Prealtai plain .....	48
11. <i>A. A. Lapkovskaya, V. V. Olenchenko, G. S. Dyakova.</i> The geoelectrical structure of rock glacier Sukorsky landslide (Altai Mountains) .....	53
12. <i>A. V. Liseikin, V. S. Seleznev, D. V. Krechetov.</i> About monitoring of the technical condition of the dam of the Sayano-Shushenskaya power plant based on the analysis of its natural frequencies changes and the storage reservoir level changes.....	58
13. <i>A. I. Makarov, A. N. Vasilevsky, I. N. Eltsov, G. V. Dyatlov, Yu. A. Dashevsk.</i> Feasibility study of hydraulic fracture geometry evaluation method using time-lapse borehole measurements of low-frequency electric field.....	63
14. <i>S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev.</i> Electromagnetic pulse fields recorder for geophysical survey .....	68

15. <i>A. V. Mamaeva, E. N. Makhnach.</i> Processing and interpretation technique of magnetotelluric sounding during the study of reefogenic buildup within the eastern limit of Kurei sineclise .....	73
16. <i>I. V. Mikhaylov, V. N. Glinskikh, M. N. Nikitenko, I. V. Surodina.</i> An algorithm for joint 2D inversion of electromagnetic and electric logs .....	78
17. <i>D. I. Mikhalchenko.</i> Numerical thermal analysis of performance of vacuum insulated tubing string of gas well in permafrost .....	82
18. <i>L. A. Nazarov, L. A. Nazarova, A. V. Panov, N. A. Miroshnichenko.</i> Evolution of stress-strain state of rock mass in Tashtagol iron ore mining based on 3D modeling .....	87
19. <i>N. N. Nevedrova, P. V. Ponomarev, I. O. Shaparenko.</i> Geoelectric models of Chuya basin fault structures according to ert data .....	92
20. <i>D. A. Neklyudov, M. I. Protasov.</i> Fast two-point ray tracing for the propagation of band-limited signals oriented for 3D crosswell tomography.....	97
21. <i>V. A. Kindyuk, G. V. Nesterova, I. N. Yeltsov.</i> Logging data inversion using coupled electrohydrodynamic and geomechanical model of borehole environment.....	102
22. <i>T. V. Nefedkina, R. I. Vilegzhanin, E. Z. Rakshaeva, P. A. Lykhin, A. M. Aizenberg.</i> The effect of reflecting interface curvature on AVO response of post-critical PP reflections and its theoretical description.....	107
23. <i>M. N. Baldin, A. Yu. Belonosov, M. V. Pryamov, V. M. Gruznov.</i> Experience in geochemical prospecting with passive concentrators in the heavily watered territory of Tevrizsky gas condensate reservoir .....	113
24. <i>D. E. Ayunov, A. D. Duchkov, S. A. Kazantsev, V. V. Romanenko, S. B. Subbotin.</i> Temperature regime of «Atomic» lake (Semipalatins test site) .....	117
25. <i>D. V. Borisov.</i> Application of GIS in the tasks of imaging overlying seams to determine promising petroleum territories .....	123
26. <i>A. N. Vasilevskiy, O. B. Bocharov, C. M. Edwards.</i> Application of the borehole gravity method to estimate compaction and subsidence.....	127
27. <i>L. A. Gagarin, I. I. Khristoforov, K. I. Bazhin, L. S. Lebedeva, N. V. Torgovkin, V. A. Kuvaev, I. E. Misaylov.</i> Estimation of landslide in massive rocks, South Yakutia .....	132
28. <i>N. A. Golikov, T. I. Eltsov, S. N. Melkozerova, M. J. Shumskayte, A. S. Junasheva.</i> Behavior of the electrophysical and HMR properties of ground composites conditioned cryogels, temperature cycling .....	138
29. <i>E. S. Gornostaeva, A. S. Kalganov, V. V. Olenchenko, E. Y. Yudiskih.</i> The application of electrical resistivity tomography induced polarization method to search for ore on Sypchugurskoy mineralized areas (Trans-Baikal territory) .....	143
30. <i>P. V. Gromyko, V. S. Seleznev, A. V. Liseikin.</i> Causes increase the amplitude of natural oscillations of the Sayano-Shushenskaya hydro power plants.....	148

31. A. Y. <i>Devyatova</i> , S. B. <i>Bortnikova</i> . Gas-aerosol transfer of elements from waste dumps of Komsomolsk gold processing plant (Kemerovo region) .....	152
32. V. N. <i>Dorovsky</i> , Yu. V. <i>Perepechko</i> . Measurement of porosity and permeability. Radial borehole waves .....	157
33. A. N. <i>Drobchik</i> , A. A. <i>Duchkov</i> , N. A. <i>Golikov</i> . Automatization of laboratory experiments on the example of measurement of acoustic properties of hydrate samples.....	162
34. A. <i>Duchkov</i> , A. D. <i>Duchkov</i> , A. N. <i>Drobchik</i> , N. A. <i>Golikov</i> , M. E. <i>Permyakov</i> . Laboratory studies of acoustic properties of unconsolidated samples containing methane gas hydrate.....	167
35. P. G. <i>Dyadkov</i> , O. A. <i>Kuchay</i> , Yu. M. <i>Romanenko</i> . Features of seismotectonic deformations by preparation and realization of the earthquake of Maule (Chile), 27.02.2010, Mw = 8,8.....	172
36. T. I. <i>Eltsov</i> , N. A. <i>Golikov</i> . Complex dielectric permittivity measurements of reservoir core samples using frequency range from 1 kHz to 1 GHz.....	177
37. A. A. <i>Emanov</i> , E. V. <i>Leskova</i> , A. V. <i>Fateev</i> , A. F. <i>Emanov</i> . Seismic hazard assessment of Anzhero-Sudzhensk of the Kemerovo region and adjacent territories .....	182
38. A. V. <i>Zlobinskiy</i> , V. S. <i>Mogilatov</i> . Integrated electrical prospecting survey using TE and TM-polarization of an electromagnetic field	187
39. I. N. <i>Zlygostev</i> , N. Yu. <i>Stepanova</i> , A. Yu. <i>Bondarenko</i> . Development of the concept of the system to solve problems of navigation on board unmanned aerial vehicles .....	192
40. E. V. <i>Kasatkina</i> , I. Yu. <i>Koulakov</i> , A. N. <i>Vasilevcky</i> . Toba supervolcano feeding sources inferred by seismic data .....	197
41. N. K. <i>Kayurov</i> , V. N. <i>Glinskikh</i> , K. V. <i>Sukhorukova</i> . Paleosoics complex traps characterization of Archin field (Tomsk region) by geophysical logging data.....	202
42. N. O. <i>Kozhevnikov</i> , M. V. <i>Sharlov</i> , R. V. <i>Sharlov</i> , S. M. <i>Stefanenko</i> , Yu. A. <i>Agafonov</i> . Turn-off waveforms of «high» and «low» current in an horizontal transmitter loop.....	207
43. D. O. <i>Kucher</i> , V. V. <i>Olenchenko</i> . Modeling of mine drainage filtration in geological environment based on electrical prospecting .....	212
44. D. Yu. <i>Kushnir</i> , G. V. <i>Dyatlov</i> , A. I. <i>Makarov</i> , Yu. A. <i>Dashevskiy</i> . 2D inversion-based interpretation of synthetic resistivity data near pinching-outs or faults.....	217
45. A. A. <i>Belaya</i> , E. Yu. <i>Goshko</i> , N. V. <i>Simankovich</i> , G. M. <i>Trigubovich</i> . The analysis of the deep geoelectric model using MT data and 3D modeling for the base geophysical profile 1-SB .....	223
46. V. M. <i>Solovyev</i> , V. N. <i>Kashun</i> , S. A. <i>Elagin</i> , A. E. <i>Shenmayer</i> , N. A. <i>Serezhnikov</i> . Active vibroseismic monitoring in Altay-Sayan region.....	229

47. <i>V. M. Solovyev, V. S. Seleznev, A. S. Salnikov, A. V. Liseikin, I. E. Romanenko, S. A. Elagin, A. E. Shenmayer.</i> Features of seismic structures of the Transbaikal part of the Central Asian orogenic belt along the 1-SB geophysical profile .....	234
48. <i>V. Yu. Timofeev, E. I. Griбанова, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, V. M. Semibalamut, S. V. Panov, M. D. Parushkin, S. F. Panin.</i> Geophysical process registered by laser extensometer (Talaya seismology station, Baikal region) .....	239
49. <i>V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, S. F. Panin, E. V. Boyko, E. I. Griбанова.</i> Tidal modulation of weak seismicity .....	245
50. <i>A. N. Fague, I. V. Surodina, I. N. Yeltsov.</i> Electrical resistivity tomography investigation of talik zones beneath thermokarst lakes (based on field measurements and 3D computer modeling) .....	250
51. <i>V. V. Filatov.</i> Cole-Cole equation and fractal media .....	255
52. <i>A. V. Chernyshev, G. M. Trigubovich, Ya. F. Kovalskiy, A. V. Kuklin, E. V. Krupnov.</i> Tem resolution improving in the study of polarizing mediums .....	261
53. <i>A. E. Shalaginov, N. N. Nevedrova.</i> Features of geoelectric structure on the site Mukhor-Tarkhan of Chu basin in Gorny Altai according TEM and ERT data.....	266
54. <i>S. V. Yaskevich, A. A. Duchkov.</i> Receivers coupling assessment with interferometry approach .....	270