

ISSN 2074-8906

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

АПРЕЛЬ-ИЮНЬ

02/2017

Издается с 2002 г.

ТЕМА НОМЕРА:

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА: ПОЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Современная технология поисков и разведки залежей СВН
на основе комплекса геофизических методов

СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ

XZ ne



353477 Россия, Краснодарский край, г.Геленджик, ул.Ручейная,8
т.:(86141)26615, ф.:(86141)26601
office@intromarin.ru, www.intromarin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

КОЛОНКА РЕДАКТОРА

7 Чудо не свершилось!

Турлов П.А.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА:
ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

8 Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой FastSnap

Шарлов М.В., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А.

Аннотация: Изучение верхней части разреза (ВЧР) включает в себя большой пласт задач, начиная от исследования целостности дорожного полотна, археологических задач, заканчивая поисками водоносных горизонтов на глубине до 300 – 400 м. Одним из распространенных методов изучения верхней части разреза является зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Применение современных цифровых программно-измерительных комплексов, таких как FastSnap, позволяют расширить возможности малоглубинного ЗСБ и вывести решение задач по изучению геоэлектрических свойств ВЧР на качественно новый уровень по степени детальности и технологичности работ. Важно, что результаты исследований мЗСБ подтверждаются последующим бурением, что позволяет реально оценивать широкие возможности метода.

Ключевые слова: электроразведка, верхняя часть разреза, малоглубинное зондирование становлением поля в ближней зоне, высокоплотная сеть наблюдения, программно-измерительный комплекс FastSnap.

24 Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований

Шарлов М.В.

Аннотация: Исследования методами нестационарных электромагнитных зондирований широко применяются для решения разнообразных глубинных и малоглубинных геологических задач. Измерения, как правило, производятся с помощью цифровых измерительных систем, в которых для обработки данных широко применяются процедуры цифровой обработки. Однако, применение некоторых алгоритмов обработки может приводить к искажениям АЧХ информативной части сигналов, сказывающимся на достоверности их интерпретации. Вследствие этого необходимы дополнительные меры, тем или иным способом обеспечивающие компенсацию вносимых при обработке искажений. Предлагаемый автором интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ позволяет применять полный арсенал средств ЦОС и вместе с тем обеспечивает автоматический учет искажений, возникших в результате обработки, улучшая достоверность интерпретации получаемого материала.

Ключевые слова: электроразведка, нестационарное электромагнитное зондирование, зондирование становлением поля в ближней зоне, инверсия данных, цифровая обработка данных

36 Аппаратура и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на суше

Ситников А.А., Агеенков Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х.

Аннотация: В публикации рассказывается об аппаратуре, системах наблюдений и методике сухопутных ЭМ зондирований и зондирования ВП нефтегазопроисловых ДНМЭ, описываются решаемые задачи, работа с Клиентами и результаты работ.

CONTENTS

EDITORIAL

The miracle did not happen!

Turlov P.A.

ELECTRICAL SURVEY:
EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES

Experience of effective study of the upper part of the section by near-field transient electromagnetic sounding method with FastSnap system

Sharlov M.V., Buddo I.V., Misjurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Agafonov Ju.A.

Abstract: The study of the upper part of the section includes a wide range of the tasks, beginning from integrity of the roadway research, archaeology and ending the search for aquifers at a depth of 300 – 400 m. One of the common methods of studying of the upper part of the section is near-field transient electromagnetic sounding. The use of modern digital soft-measuring complexes, such as FastSnap, make it possible to extend the capabilities of shallow near-field TEM and to bring the solution of the problem of the study of the upper part of the section geoelectrical properties to a qualitatively new level of detail and working processability. It is important that the results of the research of shallow near-field TEM are confirmed by the subsequent drilling and it allows of giving an objective appraisal of the method's ample opportunities.

Key words: electrical exploration, upper part of the section, shallow near-field TEM, high-density measurement grid, soft-measuring complex FastSnap

The integrated system for processing and inversion of transient electromagnetic sounding data

Sharlov M.V.

Abstract: Research methods of transient electromagnetic soundings are widely used to solve a variety of deep and shallow geological problems. Measurements usually are made with the help of digital measuring systems in which digital processing procedures are widely used for data processing. However, the use of certain algorithms could lead to distortions of the frequency response of informative part of the signals that affect the reliability of their interpretation. As a result, additional measures are needed, in some way compensating distortion, inserted while the processing procedure. The author presents an integrated approach to processing and inversion of near-field TEM data that allows to use the full Arsenal of DSP and at the same time provides automatic accounting of distortions, resulting from the processing, improving the accuracy of interpretation of the received material.

Key words: electrical exploration, transient [time-domain] electromagnetic sounding, near-field electromagnetic sounding, data inversion, digital signal processing

Equipment and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration with application of differential-normalized method of electrical prospecting (DNME) on land

Sitnikov A.A., Ageenkov E.V., Ivanov S.A., Zhugan P.P., Mal'tsev S.Kh.

Abstract: The publication describes the equipment, observing systems and methods of land EM soundings and IP soundings of DNME exploration for oil and gas, describes the tasks to be solved, work with Customers and the results of the work.

Ключевые слова: дифференциально-нормированный метод электроразведки, ДНМЭ, ВП, поиски УВ, электроразведка для поисков УВ.

Keywords: differential-normalized method of electrical prospecting, DNME, IP, electrical prospecting, hydrocarbon research, electrical prospecting for hydrocarbon research.

42 Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ

Ситников А.А., Агеев Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х.

Аннотация: В статье рассмотрены аппаратура, устройства, системы наблюдений и методики морских ЭМ зондирований и зондирований ВП нефтегазопроискового ДНМЭ и непрерывных дипольных ЭМ зондирований (НДЭМЗ) акваторных инженерно-геологических работ (АИГР). В статье рассмотрены также решаемые задачи, работа с Клиентами и результаты работ.

Ключевые слова: дифференциально-нормированный метод электроразведки, ДНМЭ, ВП, морская электроразведка, поиски УВ на акваториях, электроразведка для поисков УВ, акваторные инженерно-геологические работы, электроразведка для акваторных инженерно-геологических работ, НДЭМЗ.

Equipment, devices and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration and engineering geology in water areas with application of DNME and NDEMS electrical prospecting methods

Sitnikov A.A., Ageenkov E.V., Ivanov S.A., Zhugan P.P., Mal'tsev S.Kh.

Abstract: The article describes the equipment, devices, observing systems, and methods of sea EM soundings and IP soundings of DNME exploration for oil and gas and continuous dipole EM soundings for geological engineering survey in water area. The article describes the tasks to be solved, work with Customers and the results of the work as well.

Keywords: differential-normalized method of electrical prospecting, DNME, IP, marine electrical prospecting, offshore hydrocarbon research, electrical prospecting for hydrocarbon research, aquatic engineering-geological work, electrical prospecting for aquatic engineering-geological work, NDEMS.

50 Спектральные измерения ВП горных пород в естественном залегании с использованием высокоточной аппаратуры

Зорин Н.И., Мариненко В.А.

Аннотация: Современная геофизическая аппаратура позволяет проводить высокоточные измерения спектральных характеристик вызванной поляризации (ВП) погребенных горных пород в естественном залегании. Экспериментальные работы показали, что общая погрешность дифференциально-фазовых измерений ВП, даже при использовании разносов порядка 1 километра и в условиях значительного влияния сторонних помех, может не превышать сотых долей градуса. В качестве примера применения высокоточной аппаратуры для решения практических задач электроразведки приведена оценка спектральных характеристик вызванной поляризации терригенных пород в районе учебной базы геофизических практик «Александровка» в Калужской области.

Ключевые слова: метод СВП, высокоточная аппаратура, дифференциальный фазовый параметр.

Spectral measurements of IP of buried rocks in situ with application of the high-precision instruments

Zorin N.I., Marinenko V.A.

Abstract: Modern geophysical instruments allow to carry out the high-precision in-situ measurements of spectral induced polarization (IP) response of buried rocks. Experimental works showed that the overall inaccuracy of differential-phase IP measurements may be restricted by the second decimal places of a degree even when working in noisy conditions with the arrays about 1 km in length. As an illustration of the high-precision instruments application in practice we show a field estimation of the SIP parameters of sedimentary rocks near "Alexandrovka" geophysical training facility in Kaluga region.

Keywords: SIP method, high-precision instruments, differential phase parameter

58 Применение электротомографии при изучении курганов центральной курганной группы гнездовского археологического комплекса

Рыжков В.И., Белоусов А.В., Сергеев К.С., Горин А.Д., Новиков В.В., Каинов С.Ю.

Аннотация: В статье описаны результаты исследования курганов с использованием электротомографии. Были детально изучены три курганные насыпи, две из которых стали впоследствии объектом комплексных археологических исследований. Результаты раскопок позволяют провести прямое сопоставление косвенных геофизических данных с фактическим состоянием объектов исследований.

Ключевые слова: археология, курган, раскопки, геофизика, электротомография

Application of electrical tomography for study of the burial mounds of the central tumulus group of Gnezdovo archaeological complex

Ryzhkov V.I., Belousov A.V., Sergeev K.S., Gorin A.D., Novikov V.V., Kainov S.Yu.

Abstract: The article describes the results of the study of burial mounds using electrical tomography. Three burial mounds have been studied in detail, two of which became the object of a comprehensive archaeological research. The results of excavations allow direct comparison of the indirect geophysical data with the actual state of objects of research.

Key words: archaeology, burial mound, excavations, geophysics, electrical tomography

64 Методы и системы инженерной геофизики, применяемые при изысканиях в районах развития многолетнемерзлых пород

Бучарский Б.В., Бондаренко Д.Н., Горячев В.В., Савельев Д.М.

Аннотация: В статье рассмотрены методы и системы, применяемые для бесконтактных геофизических исследований при дистанционном изучении

Methods and systems of engineering geophysics used in prospecting in areas of development of permafrost

Bucharsky B.V., Bondarenko D.N., Goryachev V.V., Savel'ev D.M.

Abstract: The article considers the methods and systems, which are used for geophysical noncontact investigations of the electrical characteristics of the layered ground in the winter period and in the regions of permafrost sections. There are considered the following methods: noncontact modification of vertical electrical sounding

электрических и скоростных характеристик слоистых разрезов в зимний период и в районах многолетнемерзлых толщ. Рассмотрены следующие методы: электроразведка методом вертикального электроразведывания (ВЭЗ) в бесконтактной модификации, метод георадиолокационного обследования (георадиолокационное профилирование), сейсморазведка методом преломленных волн.

Ключевые слова: бесконтактное геофизическое исследование, электроразведка, вертикальное электроразведывание, георадар, метод преломленных волн

КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ СЕЙСМОДАННЫХ

68 Количественные оценки качества сейсмического материала на различных этапах обработки

Абизгильдин Р.И., Белоусов А.В.

Аннотация: В статье проведен анализ применимости полевых оконных количественных оценок качества сейсмического материала к данным для контроля качества обработки в ходе обработки

Ключевые слова: Контроль качества, сейсморазведка, обработка

(VES), georadar investigations (georadar profiling), seismic refraction method.

Key words: noncontact geophysical investigation, electrical exploration, vertical electrical sounding, georadar, seismic refraction method

SEISMIC DATA PROCESSING QUALITY

Quantitative assessments of the seismic information quality at various processing stages

Abizgildin R.I., Belousov A.V.

Abstract: In the article is analyzed the applicability of intraprocess data processing quality control based upon field windows quantitative assessments of the seismic information quality

Key words: quality control, seismics, processing

ИНСТРУМЕНТАРИЙ СЕЙСМОРАЗВЕДЧИКА

74 Проблемы современной инструментальной базы полевых технологий

Ясницкий Ю.С.

Аннотация: В статье рассмотрен ряд технических проблем, ограничивающих функциональные возможности некоторых моделей современных наземных сейсморегистрирующих систем.

Ключевые слова: сейсморазведка, наземная бескабельная сейсмосистема, морская нодальная сейсмосистема, гибридная сейсмосистема, WiFi, GPS

EXPLORATION SEISMOLOGIST TOOLS

The problems of modern instrument base for field technologies

Yasnitsky Yu.S.

Abstract: The article considers a number of technical problems limiting the functionality of some models of modern land seismic data acquisition systems.

Key words: seismics, wireless land seismic data acquisition system, nodal marine seismic data acquisition system, hybrid seismic data acquisition system, WiFi, GPS

РЕСУРСНАЯ БАЗА

92 Современная технология поисков и разведки залежей СВН на основе комплекса геофизических методов

Титаренко И.А., Соколова И.П., Титаренко А.В.

Аннотация: В статье описано применение комплексной геофизической технологии на базе сейсмического и электроразведочного методов, включающей новые методические приемы проведения полевых работ и авторские наработки интерпретации полученных результатов.

Продемонстрирована возможность успешного использования предложенной технологии для решения задач поиска и разведки залежей высоковязкой тяжелой нефти в пермском комплексе отложений.

Ключевые слова: сейсмика, электроразведка, высоковязкая тяжелая нефть, пермский комплекс отложений

RESOURCE BASE

The contemporary technology of extra-heavy crude oil pools exploration on the basis of geophysical methods complex

Titarenko I.A., Sokolova I.P., Titarenko A.V.

Abstract: The article describes an application of integrated geophysical technology based on seismic and electrical prospecting methods, including new methods of fieldwork and authoring experience of interpretation of the results. It is demonstrated the possibility of successful use of the proposed technology for decision of the problems of search and exploration of extra-heavy crude oil pools occurring in Permian sedimentary complex.

Key words: seismics, electrical prospecting, extra-heavy crude oil, Permian sedimentary complex

НАШИ ПАРТНЕРЫ



Сиб Геофиз Прибор

Приборы и системы разведочной геофизики.

Общероссийский научно-технический ежеквартальный журнал. Издается с 2002 г.

Главный редактор:

к.т.н. П.А. Турлов
paturlov@mail.ru

Редакционная коллегия:

Н.П. Алелюхин,
к.т.н. А.В. Белоусов,
к.т.н. С.В. Горбачев,
д.г.-м.н. В.Я. Воробьев,
д.т.н. Г.Н. Гогоненков,
С.В. Гурьев,
к.т.н. В.А. Детков,
д.т.н. А.П. Жуков,
Б.В. Запорожец,
д.г.-м.н. С.И. Михеев,
к.т.н. О.М. Сагайдачная,
к.т.н. Н.В. Тарасов,
д.т.н. Г.Я. Шайдуров,
д.т.н. Г.А. Шехтман,
д.т.н. М.Б. Шнеерсон.

Выпускающий редактор:

И.М. Кузнецов

Координатор проекта:

С.А. Матвеев

Учредитель:

СРО МОО ЕАГО

Издатель:

ООО «Информ-ГеофизСервис»

Директор:

Турлов П.А.

Адрес издательства:

410019, Саратов,
ул.Крайняя, д.129
Тел. +7 (8452) 64 14 32

Обложка и оформление:

Д.В. Мокроусов

Вёрстка:

Д.В. Мокроусов

Тираж отпечатан в
типографии ООО
«Формат»

Тел. +7 (8452) 39-33-77
Тираж: 300 экз.

Подписано в печать:
25.06.2017

Дата выпуска:
15.07.2017

Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редакция может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов. Контакты с авторами статей ведутся через редакцию.

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций за номером ПИ № 77-7906 от 27.04.2001 г.
ISSN: 2074-8906
Web-сайт: psrgео.ru

© Турлов П.А.,
составление, 2017
© ООО «Информ-геофизсервис», 2017

Чудо не свершилось!

■ Турлов П.А., СРО МОО ЕАГО, г.Саратов

Ну вот и все! Проблема импортозамещения в области геофизического приборостроения в нашей стране решена и решена, кажется, окончательно и бесповоротно. Для ясности привожу несколько цитат из выступления представителя АО «Росгеология» на заседании круглого стола в Совете Федерации. Источник – Еженедельный вестник нефтегазодобычи, сервиса и машиностроения от 27.03.2017 г.

Цитата первая – *«Недропользователям в разы выгоднее приобретать импортную аппаратуру для проведения геологоразведочных работ, чем заниматься собственной разработкой НИОКР в рамках импортозамещения».*

Цитата вторая – *«Покупка аппаратурно-технических средств, как ни странно, обходится примерно в два-три раза дешевле. К примеру, покупка французской сейсмической станции обойдется в 70-80 млн. руб., а НИОКР будет разрабатываться два-три года и будет затрчено 300-400 млн. руб., Вот вам соотношение экономики, времени и возможности производства отечественной аппаратуры».*

Цитата третья – *«Мы все с нетерпением ждали выборов в США и снятия санкций, которое раскрыло бы возможность не заниматься производством собственных аппаратно-технических средств, а покупать импорт».*

Вот уж поистине! – «Умри, Денис, лучше не скажешь». Последняя цитата объясняет все.

Мы-то, наивные, думали, что Правительство, наконец-то озаботилось проблемой необходимости иметь в стране налаженное производство всей гаммы геофизического оборудования, необходимого для разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Ан нет! Оказывается неповоротливость соответствующих структур, нежелание выделить главное и выстроить в течение трех лет схему последователь-

ного решения проблемы импортозамещения – все это было связано с ожиданиями результата выборов в США. А избранный Трамп надежд не оправдал и санкции не снял.

Ай-яй-яй, вот незадача-то! Что же делать-то? Неужели придется заниматься производством собственных аппаратно-технических средств?

Нет! Нет! И еще раз нет! Росгеология считает, что страна, львиную долю бюджета которой составляют средства, получаемые за счет экспорта сырьевых ресурсов и находящаяся в окружении стран с, мягко сказать, недружественной по отношению к ней политикой, по-прежнему должна быть зависимой от поставок зарубежного оборудования, необходимого для ее энергетической отрасли, а финансирование соответствующих НИОКР – это излишняя трата денег. Видимо забыли известную русскую пословицу – «Скупой платит дважды». А для апологетов всего импортного приведем эту пословицу в импортном варианте – «If you buy cheaply, you pay dearly».

В свое время, когда в стране возникла необходимость организации производства цифровых сейсмостанций, перевода всей геофизической отрасли на цифровую регистрацию сейсмоданных и организации обработки геофизических данных с использованием ЭВМ, проблема была решена в кратчайшие сроки. Все, что для этого понадобилось – это волевое решение дееспособного Правительства и Академии наук.

Почему я вспомнил это наше прошлое? Да все потому же. Чтобы было лучше понятно наше настоящее.

С уважением

Главный
редактор



П.А.Турлов

Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой FASTSNAP

■ Шарлов М.В.¹, Буддо И.В.^{1,2}, Мисюркеева Н.В.¹, Шелохов И.А.¹, Агафонов Ю.А.¹

¹ АО "Иркутское электроразведочное предприятие", г. Иркутск,

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Введение

Метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) применяется достаточно широко как для изучения ВЧР [1, 2, 3, 4, 5], так и при поисках и разведке месторождений нефти и газа [6, 7, 8]. Революционное развитие микроэлектроники на рубеже 2000-х годов сделало доступным применение скоростных прецизионных АЦП, позволив осуществлять измерение сигнала в наносекундном интервале времен, что существенно повысило детальность исследований ЗСБ для верхней части разреза. Применение современных достижений в аппаратуре и программном обеспечении позволило по-новому взглянуть на возможности индуктивной электроразведки. Проведенные в последние годы крупномасштабные исследования методом малоглубинных ЗСБ (мЗСБ) по высокоплотным сетям наблюдения (до 33 ф.т./км²) наглядно демонстрируют эффективность метода при решении геологических задач в широком диапазоне глубин от 15 до 500–600 м.

Методика работ методом мЗСБ

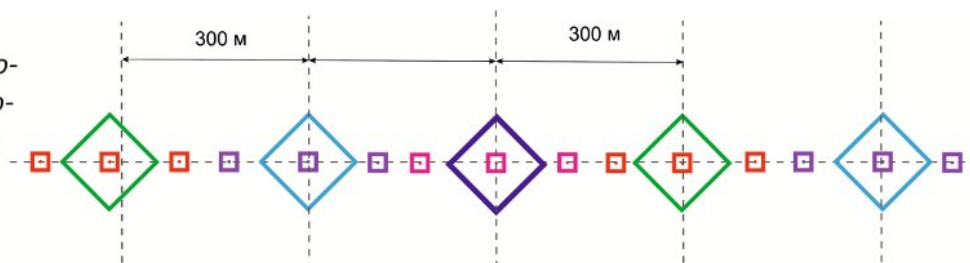
ЗСБ имеет давние традиции применения в России при решении широкого круга геологических задач: от изучения верхней части разреза до поисков и

разведки месторождений углеводородов. Большой вклад в разработку теории метода, методики работ и обработки результатов ЗСБ был внесен учеными А.Н.Тихоновым, Л.Л.Ваньяном, С.А.Шейнманном, Б.И.Рабиновичем и др., а также G.V.Keller, J.R. Wait, L. Buselli, C.H. Stoyer и др.

Этот метод относится к группе методов импульсной индуктивной электроразведки с искусственными источниками электромагнитных полей. Среди различных вариантов источников и приемников электромагнитного поля наиболее распространены установки типа «петля – петля», либо «петля в петле».

Это объясняется высокой технологичностью подобного рода установок, не требующих устройства заземлений, что позволяет проводить исследования в любое время года. Установка с индуктивным возбуждением бывает двух видов: с вынесенной за пределы генераторной приемной петлей (Q-q) и соосными приемно-генераторными петлями, т.н. установка «петля в петле» (Qq). Обычно на практике рекомендуется использовать комбинированную соосно-разнесенную установку, когда от одной генераторной петли измеряется сигнал на соосной и разнесенных приемных петлях (Рис. 1.).

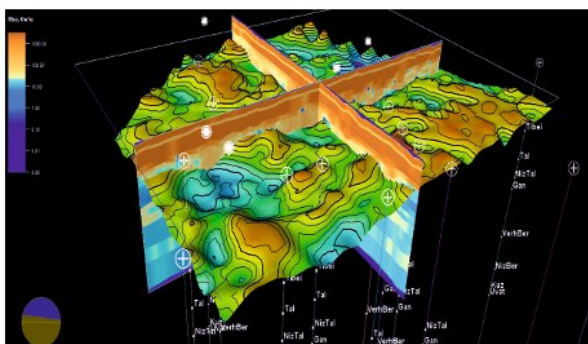
► Рис. 1. Пример профильного расположения установок мЗСБ.



Метод ЗСБ может применяться для решения различных геологических задач, в основе которых лежит дифференциация слагающих разрез горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). Сопротивление пород изменяется в широких пределах. Одна и та же порода, особенно осадочного происхождения, может иметь различное удельное сопротивление в зависимости от ее состояния и условий залегания, внутренней структуры, температуры и др.

Для работ методом мЗСБ используют два основных типа сетей наблюдений: площадные и профильные. Профильные сети наблюдений в основном используются, когда отсутствует сеть сейсмических профилей или в условиях работы в урбанизированных районах. Площадные сети используются для решения задач детального картирования верхней части разреза. Такие сети проектируются по заранее имеющейся сети сейсмических профилей. Плотность съемки может достигать 16–33 ф.т./км².

Использование площадных высокоплотных сетей наблюдений делает возможным представление данных в формате SEG-Y, что позволяет интерпретировать электро- и сейсморазведку в единых интерпретационных системах, таких как Petrel (Shlumberger) (Рис. 2.)



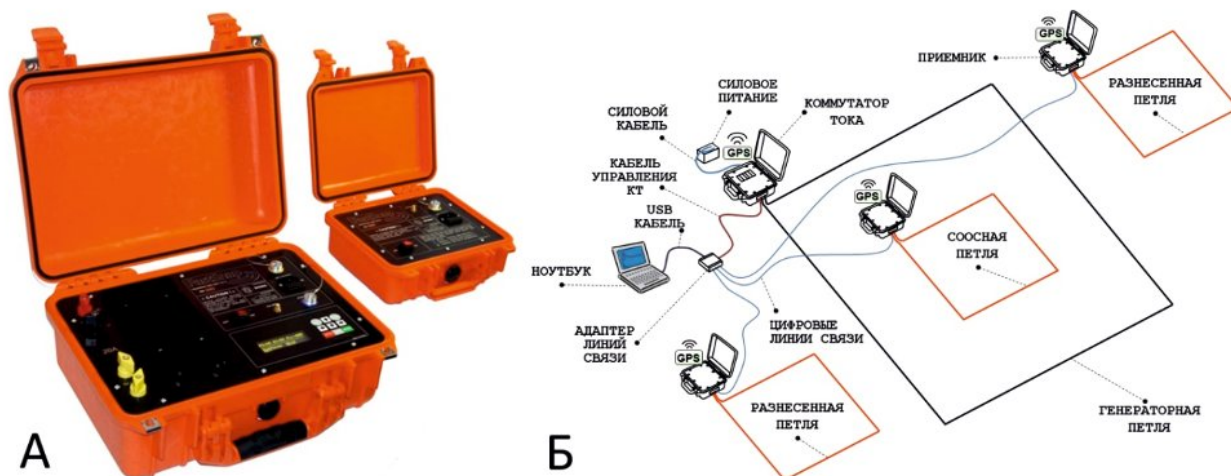
▲ Рис. 2. Пример интерпретации данных мЗСБ в программном пакете Petrel (Shlumberger).

Цифровая малоглубинная телеметрическая станция FastSnap

Первая версия электроразведочной станции FastSnap была разработана в 2005 г. коллективом специалистов (Стефаненко С.М., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В.). Аппаратурные решения, заложенные в основу FastSnap, позволили получить качественно новый уровень малоглубинной индуктивной электроразведки [9]. Существующие на тот момент разработки, по мнению авторов, по параметрам не в полной мере соответствовали задачам малоглубинных исследований. Технические решения, заложенные в первой версии станции FastSnap (высокочастотный измерительный тракт, цифровая регистрация с арифметическим шагом дискретизации, телеметрический многоканальный сбор данных, возможность работы с заземленной линией и т.д.), позволили с успехом применять ее для выполнения малоглубинных исследований, а также позволили вносить актуальные улучшения в аппаратную и программную части комплекса.

На сегодняшний момент разработано третье поколение станции FastSnap [10]. Основные блоки станции (измерители, коммутатор тока) изготавливаются в пластиковых ударопрочных корпусах Pelicase и имеют небольшие габариты и вес (Рис. 3А). Это дает возможность проводить полевые работы в пешеходном варианте в условиях пересеченного рельефа и сложной проходимости местности.

Схема подключения станции (в трехканальном варианте) приведена на Рис. 3Б. Измерители располагаются непосредственно у датчиков (приемных петель или линий). Сигнал с датчика оцифровывается измерителем и далее передается в компьютер уже в цифровой помехозащищенной форме.



▲ Рис. 3. Станция Fast Snap: А – Коммутатор тока (слева) и телеметрический измеритель (справа); Б – Схема подключения станции FastSnap в трехканальном режиме.

Измерители и коммутатор тока подключаются к компьютеру через адаптер линий связи (АЛС), длина линий связи при этом может достигать 400 м. Синхро-

низация работы коммутатора и измерителей осуществляется на основе системы GPS, либо по проводам. Коммутатор тока управляется со встроенного пульта

▼ Табл. 1. Параметры станции FastSnap.

Измеритель, коммутатор тока FastSnap	
Корпусы приборов, подключение кабелей	Пластиковые ударопрочные влагозащищенные корпуса Pelicase. Приборы могут работать с закрытой крышкой, все рабочие разъемы расположены на боковых панелях.
Количество каналов	1 – 4 канала одновременно
Динамический диапазон, шаг дискретизации и разрядность	- «Высокочастотный» АЦП ($\pm 1В$): ΔT 25 (14-bit), 100 (16-bit), 800 (19-bit) нс, 6.4 (22-bit) мкс; - «Низкочастотный» АЦП ($\pm 4В$, 24-bit): ΔT 25.6, 204.8 мкс.
Коэффициент усиления	Набор коэффициентов усиления в диапазоне 1 – 280.
GPS	Встроенная антенна, разъем подключения внешней антенны.
Точность синхронизации	GPS (± 90 нс) или проводная (± 300 нс).
Диапазон регистрации	До 14500 отсчетов с выбранным шагом дискретизации (25 нс - 3 с).
Измеряемые параметры	Напряжение внутренней батареи, координаты местоположения, коэффициент усиления канала, ток в источнике, сигнал, оцифрованный с заданным шагом дискретизации с датчика (петли или линии).
Выходной ток и напряжение	- ток 0.1 – 30 А на нагрузку сопротивлением до 2 Ом (петля); - напряжение до 330 В при макс. токе 1 А (заземленная линия).
Режимы тока	Режимы тока 0.5, 2, 5, 12, 30 А (ток не стабилизируется, величина измеряется с погрешностью не более 1%).
Параллельный шунт	Набор из 28 значений параллельного шунтирующего резистора (Выкл., 50 – 2000 Ом) автоматически коммутируемого для подавления «звона» генераторной петли.
Периоды и скважность	Периоды 20, 40, 100, 200, 500, 1000 мс; Соотношение длительности тока к паузе: 1:1, 3:1, без паузы.
Время выключения тока («фронт») 1 А	0.6 мкс на активной нагрузке, 1 – 2 мкс для ГП 25 × 25 м, 3.5 – 5 мкс для ГП 100 × 100 м.

управления или автоматически из программы регистрации, запущенной на полевом компьютере. Блоки станции оснащены встроенными приемниками GPS, обеспечивающими определение координат и высот точек наблюдения.

Основные технические параметры станции FastSnap приведены в Табл. 1.

Станция FastSnap обладает рядом технических особенностей, отличающих ее от аналогичных разработок:

- Скоростной измерительный тракт на базе АЦП с частотой дискретизации 40 МГц позволяет регистрировать ранние времена переходных процессов с высоким разрешением, обеспечивая при этом большую чувствительность на поздних временах благодаря 24-битному АЦП с частотой дискретизации 40 кГц.

- Измерение и сохранение исходных данных с арифметическим шагом дискретизации по времени позволяют выполнять адаптивную цифровую постобработку сигналов и достигать максимального соотношения сигнал/шум на всем временном диапазоне измерений [11].

- Одновременная работа до 4 каналов позволяет использовать более технологичные и производительные пространственно-разнесенные установки, либо организовать многокомпонентные измерения.

- Коммутатор тока с силой тока до 30 А обеспечивает уверенное измерение сигналов на поздних временах, позволяя достичь глубинности исследований до 500 – 600 м с генераторной петлей 100 × 100 м (в условиях Восточной Сибири).

- Быстрое выключение тока и работа с малыми периодами следования импульсов тока, вместе с высокочастотным измерительным трактом, позволяют обеспечить высококачественные измерения с малыми размерами установок

(например, организовать работы по методике ЭМС – электромагнитного сканирования).

- Программный комплекс станции FastSnap обеспечивает полный цикл электроразведочных работ – от планирования сетей наблюдения, измерения и обработки сигналов, до интерпретации, визуализации и геологического истолкования. Все программы объединены в рамках единой среды, имеют унифицированный графический интерфейс.

Измерение и обработка сигналов ЗСБ в программном комплексе станции FastSnap

Управление работой станции осуществляется с помощью программы FastEM. Измерители регистрируют и передают на компьютер сигнал с арифметическим шагом дискретизации (25, 100, 800 нс; 6.4, 25.6, 204.8 мкс). Для усиления слабых сигналов может применяться встроенный малошумящий усилитель с коэффициентами усиления от 1 до 280. Перед регистрацией сигнала программа передает в измерители и коммутатор требуемые параметры (дискретизация, усиление, период токовых импульсов, величина тока, шунт и т.п.). Результат установки параметров тестируется на соответствие задаваемым параметрам и только после этого становится возможной регистрация сигналов. Для повышения качества и точности измерений в измерители встроен цифро-аналоговый преобразователь с помощью которого осуществляется измерение заданного коэффициента усиления. Таким образом, при каждой передаче нового коэффициента усиления в измеритель производится его измерение и фиксация в БД. Точность измерения коэффициента усиления составляет 0.3%. Программа FastEM позволяет выполнять измерения как в

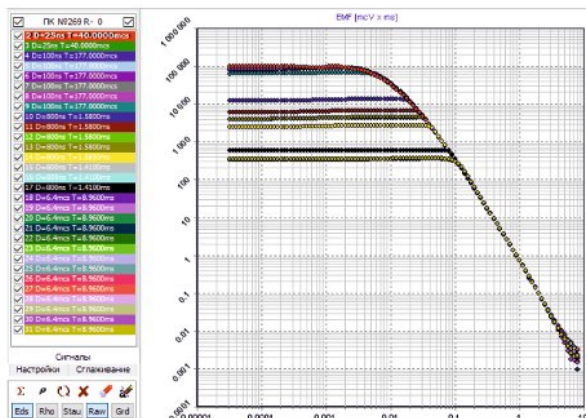
▲ Табл. 2. Параметры регистрации сигналов становления по стадиям.

Стадия становления	Дискретизация	Усиление	Ток в петле	Длина записи, мс
Ранняя стадия	25 нс, 100 нс	1-14	0.5 – 1.5 А	0.2
Средняя стадия	800 нс	14-54	2.5 – 5 А	1.6
Поздняя стадия	800 нс, 6.4 мкс	54-280	20 – 30 А	До 10 и более

ручном режиме с полным контролем всех параметров, так и в автоматическом режиме по заранее выбранному «пресету» (набору параметров регистрации).

Особенностью регистрации сигналов становления является большой динамический диапазон сигнала. Так, на ранних временах сигнал может достигать амплитуды в несколько вольт, тогда как на поздней стадии становления сигнал составляет доли микровольта. Поэтому измерение такого сигнала выполняется поэтапно (Табл. 2.). Итоговая кривая получается в результате осреднения записей по всем стадиям. Регистрация всех стадий производится со значительным перекрытием по времени для более качественной сшивки.

Для каждой из стадий процесса становления производится накопление нескольких (4 – 10) временных серий (записей) сигнала (Рис. 4.).

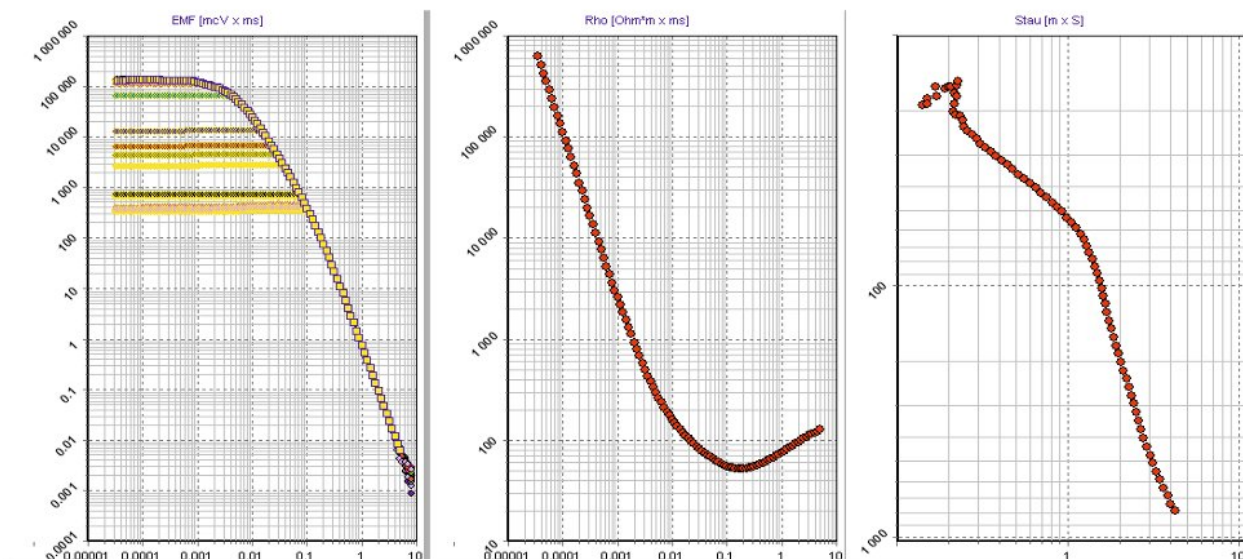


▲ Рис. 4. Стандартное накопление (stacking) сигнала из 30 записей (записи в различных режимах отображаются разным цветом) в окне итоговой обработки кривой программы TEM-Processing.

Каждая запись сигнала состоит из 100 – 200 разнополярных импульсов, сохраненных с арифметическим шагом дискретизации. Контроль качества данных осуществляется в процессе измерений с расчетом статистических показателей. Таким образом, оператор прямо на точке контролирует качество записанного материала по результату экспрессной обработки. В случае высокого уровня помех (большой дисперсии кривой) оператор может принять решение о продолжении записи и произвести накопление дополнительных записей для улучшения соотношения сигнал/шум.

Обработка измеренных сигналов выполняется в программе TEM-Processing. Итоговая кривая получается в результате суммирования всех записей с применением различных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Как правило, на точке накапливается до 3000 импульсов с разными настройками аппаратуры, что составляет значительную статистику и позволяет получить итоговую кривую высокого качества (Рис. 5.).

При обработке могут применяться автоматические алгоритмы определения параметров помехи, выполняться частотная фильтрация и другие процедуры цифровой обработки. Фактические настройки «графа обработки» сохраняются вместе с результирующей кривой для последующего учета в ходе инверсии (для компенсации искажений сигнала процедурами обработки и улучшения достоверности интерпретации).



▲ Рис. 5. Итоговая кривая ЗСБ в трансформациях ЭДС(t), $\rho(t)$, $St(Ht)$ (слева – направо), полученная в результате обработки накопления из 30 записей (соосная установка ГП 100×100 м, ПП 10×10 м).

Методика интерпретации данных мЗСБ

Интерпретация данных мЗСБ состоит из трех основных этапов:

1. Экспресс-интерпретация.
2. Инверсия данных.
3. Геологическая интерпретация.

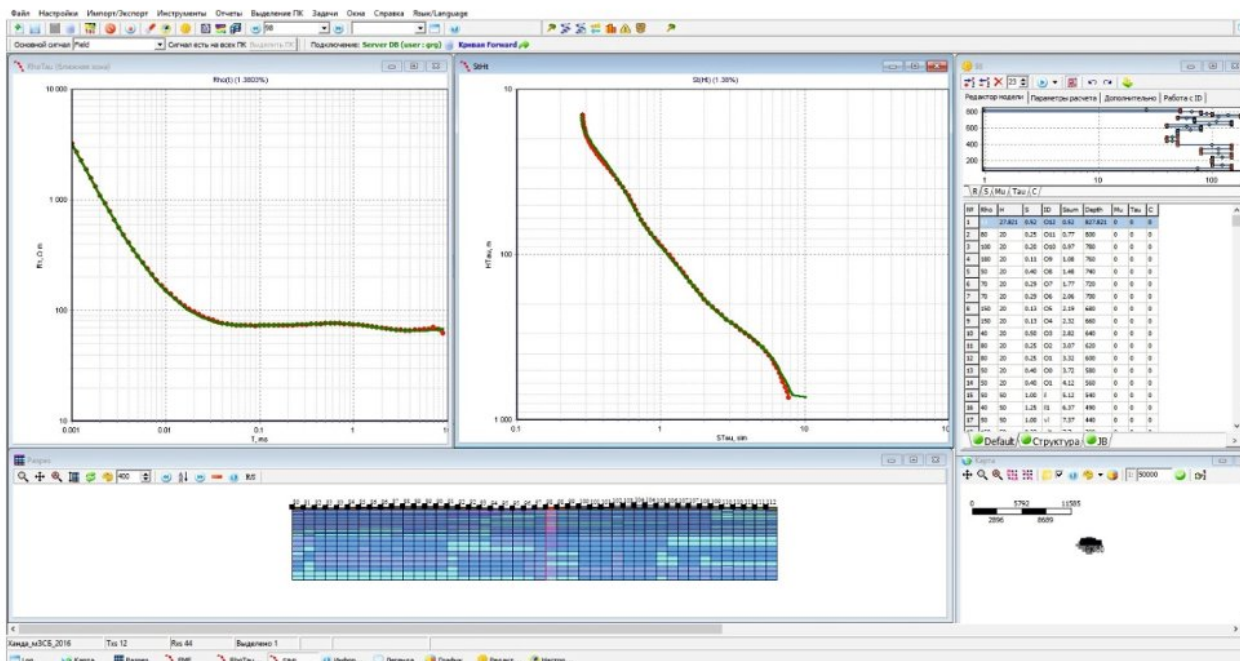
Экспресс-интерпретация представляет собой расчет кажущихся параметров dS , карт интервальной проводимости с целью определения положения основных осей проводимости.

Данный этап применяется для оперативной оценки геоэлектрических особенностей разреза (например, в ходе полевых работ).

Следующий этап – инверсия кривых ЗСБ. Инверсия заключается в численном моделировании (решении обратной задачи электроразведки) горизонтально-слоистой среды, параметры которой увязываются с данными ГИС, бурения. С целью минимизации влияния принципа эквивалентности количественная интерпретация материалов ЗСБ проводится в несколько шагов, каждый из которых вносит свой вклад в качество получаемого результата.

Первым шагом интерпретации электроразведочных данных является сбор априорной геолого-геофизической информации. На этом шаге анализируется информация по скважинам глубокого бурения, расположенным на исследуемой площади, изучаются данные ГИС скважин, определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты, осуществляется литолого-стратиграфическая привязка слоев. По сети скважин определяется выдержанность по мощности и простираию опорных горизонтов. Изучаются проявления магматизма и тектонической активности, оказавшие влияние на строение изучаемой территории, характер электромагнитного поля. Определяется гидрогеологическая характеристика района работ.

На втором шаге осуществляется построение структурных карт по опорным горизонтам, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений. Также осуществляется оценка распределения электрических характеристик разреза участка работ, осуществляется подбор структуры



▲ Рис. 6. Интерфейс программы Model 3.

первоначальной геоэлектрической модели в соответствии с построенными структурными картами.

Третий шаг включает в себя инверсию сигналов становления и построение геоэлектрических разрезов. На этом шаге геоэлектрические параметры разреза определяются с использованием программы интерпретации Model 3[12].

Программа Model 3 предоставляет возможности математического моделирования электромагнитных откликов, а также количественной интерпретации (инверсии) результатов нестационарных электромагнитных зондирований. Программа создана на основе алгоритмов расчета прямых и обратных задач, разработанных в Институте геофизики СО РАН (Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Могилатов В.С.), а также авторской модификации прямой задачи, реализованной А.Е. Каминским. Среди особенностей можно выделить интегрированное использование высокоточных математических алгоритмов и эффективную систему представления данных в площадном и профильном виде (карт и разрезов), геоэлектрических

моделей и кривых зондирования в различных трансформациях.

После инверсии происходит геологическое истолкование результатов и создание детальной физико-геологической модели ВЧР.

Поиски подземных вод в Восточной Сибири

В настоящее время на территории Иркутской области и Республики Саха (Якутия) вводятся и уже введены в эксплуатацию более пятидесяти месторождений нефти и газа. Зачастую наличие ресурса технической воды для разработки месторождения (бурение, система поддержания пластового давления и проч.) обеспечить достаточно сложно. В случае невозможности организации поверхностного водозабора или его недостаточной производительности необходима информация о глубинах залегания и латеральном распространении водоносных горизонтов. Нередко водоносы залегают на глубинах до 300 – 500 м, что делает их изучение методами электроразведки на постоянном токе практически невозмож-

ным. При этом, изучение водоносных горизонтов методами электромагнитных зондирований выглядит весьма привлекательным, т.к. обводненный горизонт характеризуется намного меньшим удельным электрическим сопротивлением, нежели вмещающие отложения. Решение задачи картирования аномалий продольной проводимости перспективных интервалов разреза возможно методом мЗСБ.

Для подтверждения данного тезиса проведено математическое моделирование сигналов ЗСБ для двух принципиально разных геоэлектрических моделей:

1. Участок расположен в пределах Ангара-Ленской ступени. ВЧР сложена породами ордовика (криволуцкая, бада-рановская, ийская свиты; отложения верхней и нижней подсвит устькутской свиты) и кембрия (илгинская и верхоленская свиты). Отложения четвертичной системы имеют ограниченное распространение и малую мощность, приурочены к долинам рек, поэтому в рамках геоэлектрической характеристики изученной площади отождествляются с отложениями ордовикской системы. Водоносные горизонты залегают в широком диапазоне глубин, однако наиболее интенсивные притоки пресных вод приурочены к нижней части устькутской свиты ордовика.

2. Участок находится в пределах Непско-Ботубинской антеклизы. ВЧР сложена отложениями четвертичного периода, юры и кембрия. Основные перспективы поиска пресных вод связаны с таликовыми зонами в терригенных породах юры и верхнего кембрия.

Необходимо отметить, что в первом случае терригенно-карбонатные породы устькутской свиты ордовика характеризуются довольно высоким УЭС. Если принять коэффициент пористости 15% и

общую минерализацию пластовых вод менее 1 г/л, то при $T=5^{\circ}\text{C}$, используя известную эмпирическую зависимость Дахнова-Арчи, УЭС водонасыщенных терригенно-карбонатных пород составит $\rho_{\text{в}} \approx 416 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (Табл. 3А).

В свою очередь, в соответствии с исследованиями (Стогний, 2003), УЭС талых пород юрского возраста составляет порядка 50 Ом·м (Табл. 3Б). Таким образом, математическое моделирование сигналов ЗСБ проведено для принципиально различных геоэлектрических условий.

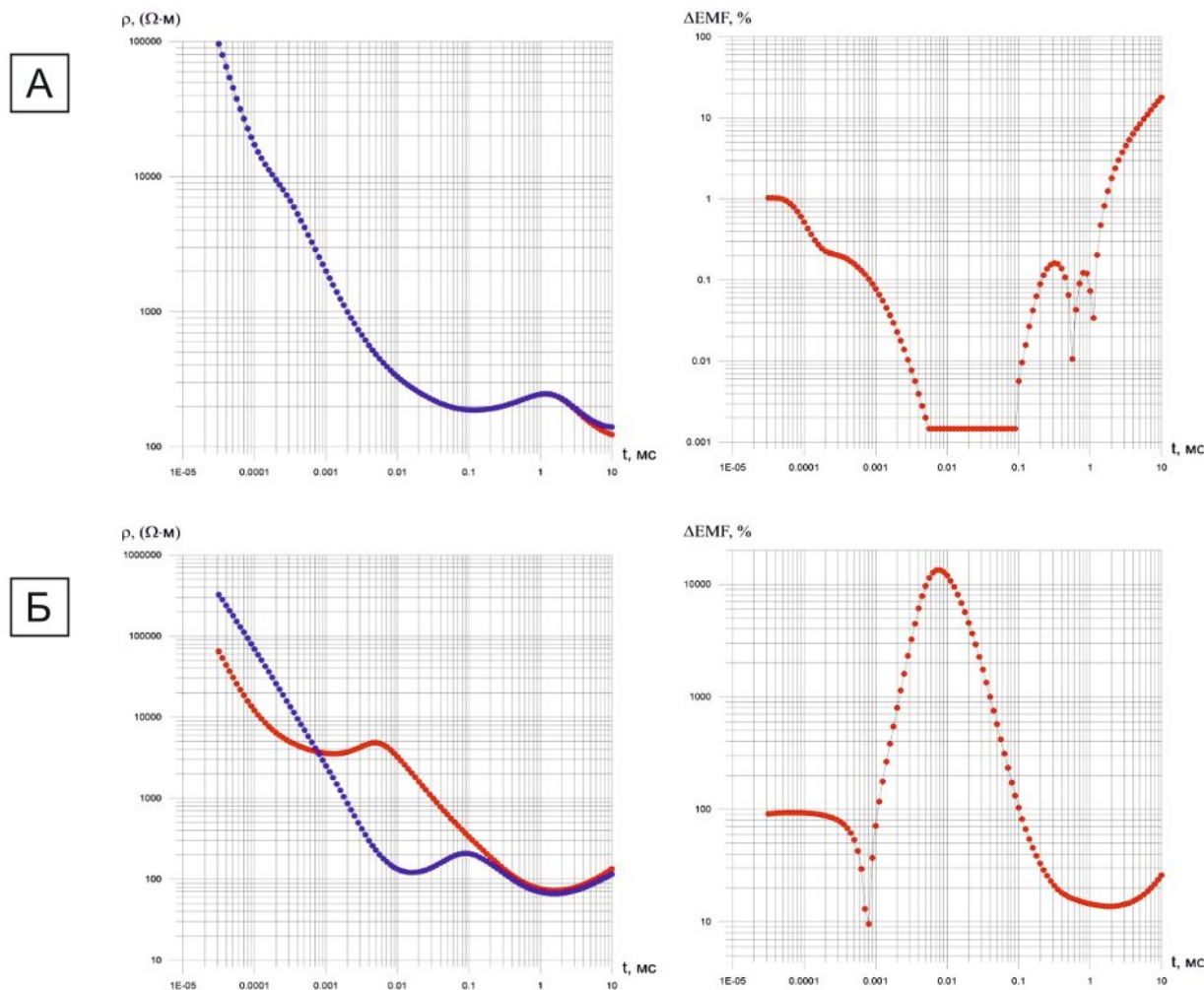
▼ Табл. 3. Геоэлектрические модели.

А) Ангара-Ленская ступень			Коллектор	Неколлектор
№	Слой	H, м	ρ , Ом·м	ρ , Ом·м
1	kr1	15	1650	1650
2	bd	100	150	150
3	is	100	300	300
4	uk2	200	300	300
5	uk1	40	416	800
6	il	100	150	150
7	vl	350	50	50

Б) Непско-Ботубинская антеклиза			Коллектор	Неколлектор
№	Слой	H, м	ρ , Ом·м	ρ , Ом·м
1	J	4	3000	3000
2	J/brd	15	50	3000
3	brd	94	3000	3000
4	mt	125	29	29
5	ich	123	500	500

Результаты математического моделирования сигналов мЗСБ представлены на Рис. 7.

Как видно из Рис. 7А, для сценария картирования водонасыщенного коллектора в отложениях устькутской свиты ордовика аномалия ЭДС (чувствительность кривой ЗСБ) достигает 20 %, тогда как для более благоприятного случая



▲ Рис. 7. Результаты математического моделирования сигналов мЗСБ при картировании водонасыщенного коллектора в ВЧР: А – для условий Ангара-Ленской ступени; Б – для условий Непско-Ботубинской антеклизы.

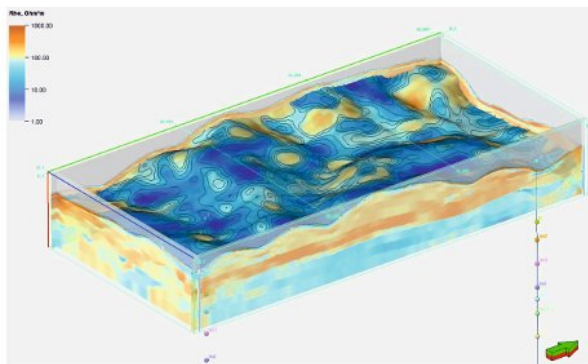
коллектор в юрских отложениях выделяется весьма контрастно (Рис. 7Б) – аномальный эффект составляет тысячи процентов. Таким образом, по результатам математического моделирования подтверждается принципиальная возможность картирования водоносных горизонтов в ВЧР методом мЗСБ в различных геологических ситуациях.

В верхней части разреза, характерного для участков Ангара-Ленской ступени, выделяются до семи водоносных горизонтов. Разрешающая способность малоглубинных ЗСБ позволяет надежно их картировать как по глубине, так и по латерали. Огромное преимущество высокоплотных площадных систем

наблюдений состоит в высокой детальности исследований, что позволяет строить куб удельного электрического сопротивления пород (Рис. 8), на основе которого закладывать гидроскважины в зонах максимальной водообильности.

По результатам полномасштабных полевых исследований мЗСБ по высокоплотным сетям наблюдения были оконтурены зоны распространения водонасыщенного коллектора в условиях Ангара-Ленской ступени (Рис. 9) и Непско-Ботубинской антеклизы (Рис. 10).

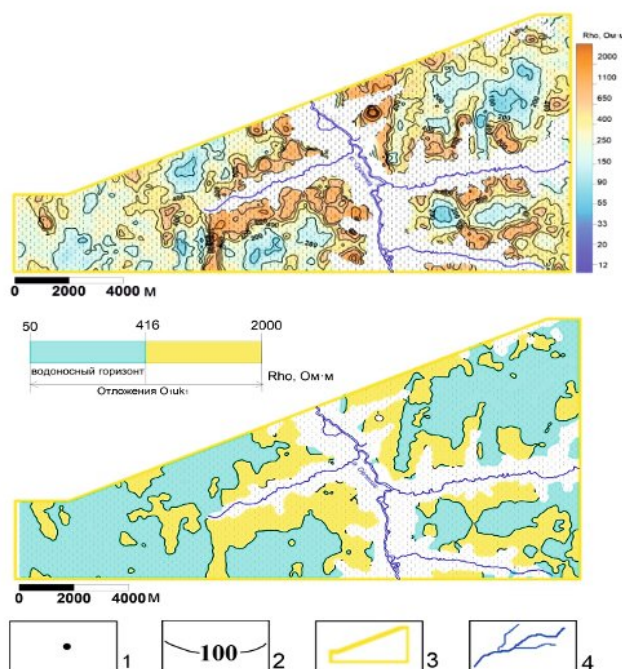
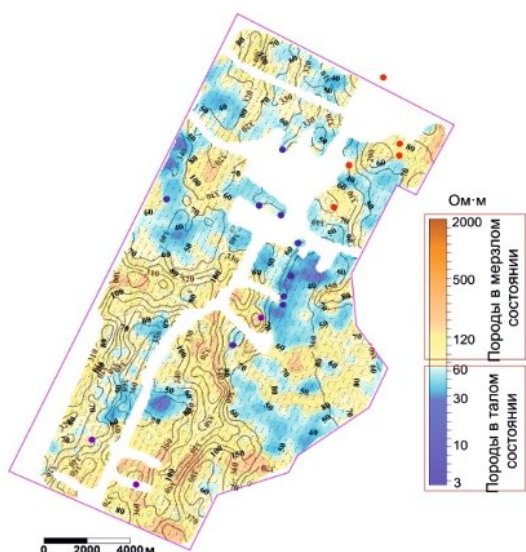
Таким образом, результаты математического моделирования, а также полномасштабных полевых работ показывают высокую чувствительность сигналов мЗСБ



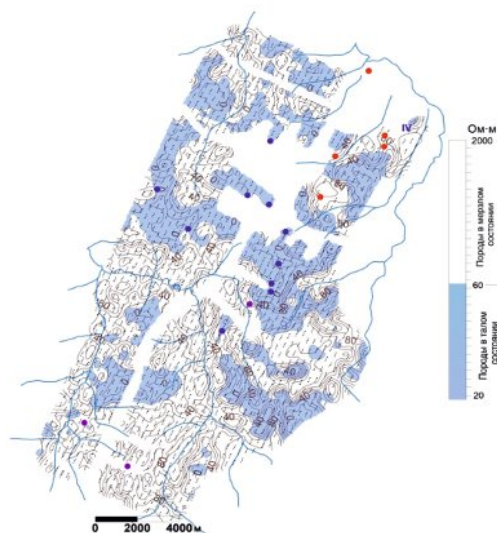
▲ Рис. 8. Куб удельного электрического сопротивления ВЧР (Ангаро-Ленская ступень).

к водонасыщенным горизонтам-коллекторам в широком диапазоне глубин от 10 до 500 м. Причем возможно картирование практически пресных вод в различных геологических сценариях: как карбонатно-терригенных породах ордовика, так и терригенных отложениях юрского времени.

Необходимо отметить, что прогноз наличия водоносных горизонтов был подтвержден последующим бурением более чем десяти гидроскважин.



▲ Рис. 9. Результаты мЗСБ (Ангаро-Ленская ступень): А - Карта продольного сопротивления отложений нижней части устькутской свиты; Б - Прогнозная карта развития водоносного горизонта в отложениях нижней подсвиты устькутской свиты ордовика. Условные обозначения: 1- пункты ЗСБ; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 3 – контур участка работ; 4 – гидросеть.



▲ Рис. 10. Результаты площадных мЗСБ на Непско-Ботуобинской антеклизе: А - Карта продольного сопротивления юры и верхнего кембрия; Б – прогнозная карта распространения водонасыщенного коллектора в отложениях юры и верхнего кембрия[13]. Условные обозначения: 1 – пункты ЗСБ; 2 – гидросеть; 3 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 4 – скважины сухие; 5 – скважины с притоками воды; 6 – скважины разведочные.)

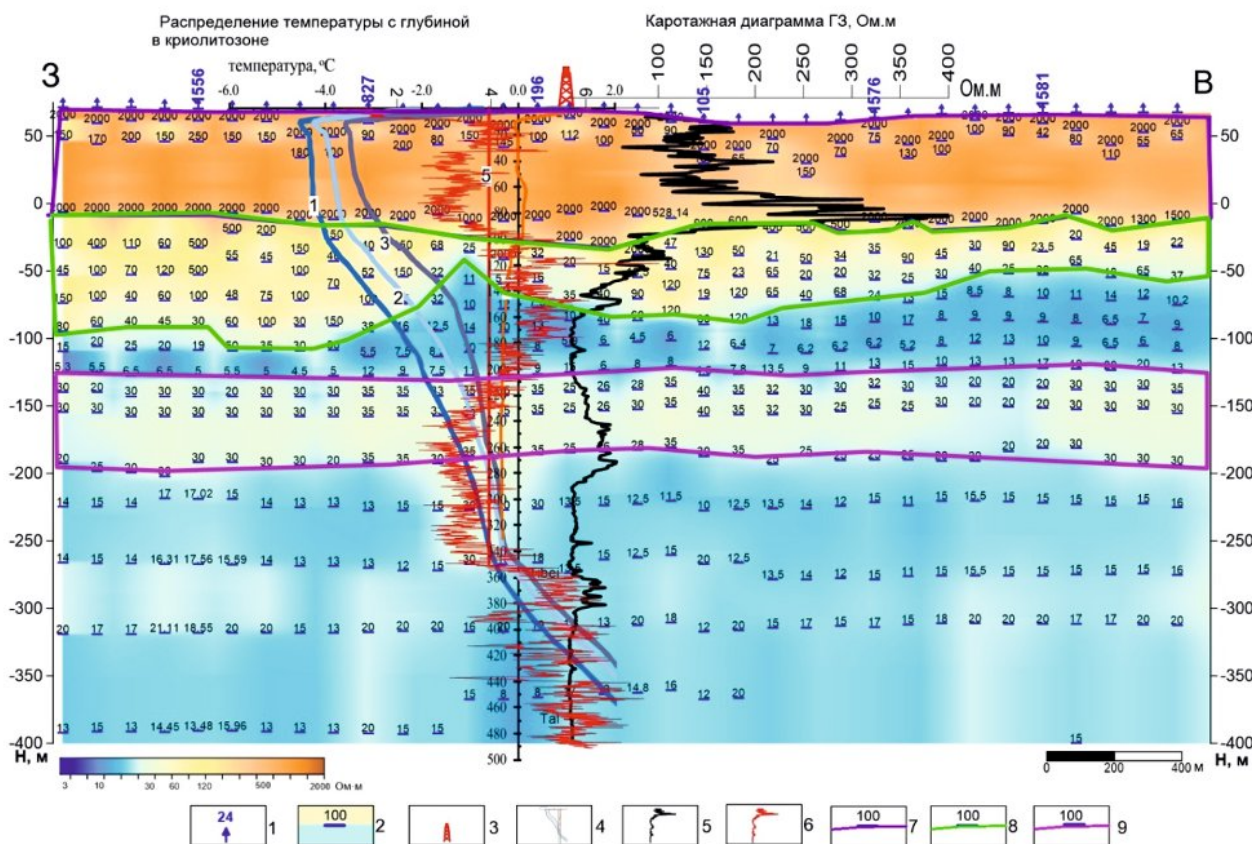
Картирование зон развития многолетнемерзлых пород

Большая часть месторождений нефти и газа Западной Сибири располагается в зоне повсеместного развития многолетнемерзлых пород (ММП). Изучение криолитозоны имеет большое значение не только при проведении геологоразведочных работ, нацеленных на поиски нефти и газа, но и для проектирования объектов инфраструктуры, нефтепромыслов и др. объектов строительства.

В качестве примера успешного изучения ММП методом мЗСБ можно привести

геоэлектрический разрез, полученный по данным исследований, проведенных на одной из площадей в Ямало-Ненецком АО. Отмечается высокая дифференцированность верхней части разреза до абсолютной глубины около 400 – 450 м (Рис. 11). Верхнюю часть разреза здесь составляют породы палеогеновой и четвертичной систем.

Высокоомный горизонт (от 100 до 2000 Ом·м), выделенный в верхней части разреза, ассоциируется с областью развития многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичного возраста, представ-



▲ Рис. 11. Фрагмент геоэлектрического разреза мЗСБ[14].

Условные обозначения: 1 – пункты мЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – скважины глубокого бурения; 4 – распределение температуры с глубиной в криолитозоне (1 – полигональный торфяник с площадным распространением ПЖЛ, 2 – полигональный торфяник с локальным распространением ПЖЛ, 3 – низкий кочковато-мочажинный торфяник, 4 – березовое редколесье, 5 – температура начала замерзания диатомита); 6 – каротажная диаграмма сопротивления (БКЗ), Ом·м; 7 – первый слой многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичной системы (современные ММП); 8 – второй слой многолетнемерзлых пород в отложениях четвертичной системы (современные ММП); 9 – область распространения реликтовых ММП.

ленных озерно-аллювиальными, аллювиально-морскими и ледниково-морскими отложениями. Мощный слой пород до глубины около 180 м представляет собой толщу современных многолетнемерзлых пород, разделяющуюся на два горизонта по данным мЗСБ.

Ниже отмечается слой, характеризующийся сопротивлением около 25 – 40 Ом·м и отождествляемый с распространением реликтовой мерзлоты, где породы находятся в морозном состоянии, без включений льда. Далее вниз по разрезу залегают эоценовые опоковидные глины люлинворской свиты с УЭС порядка 10 – 15 Ом·м.

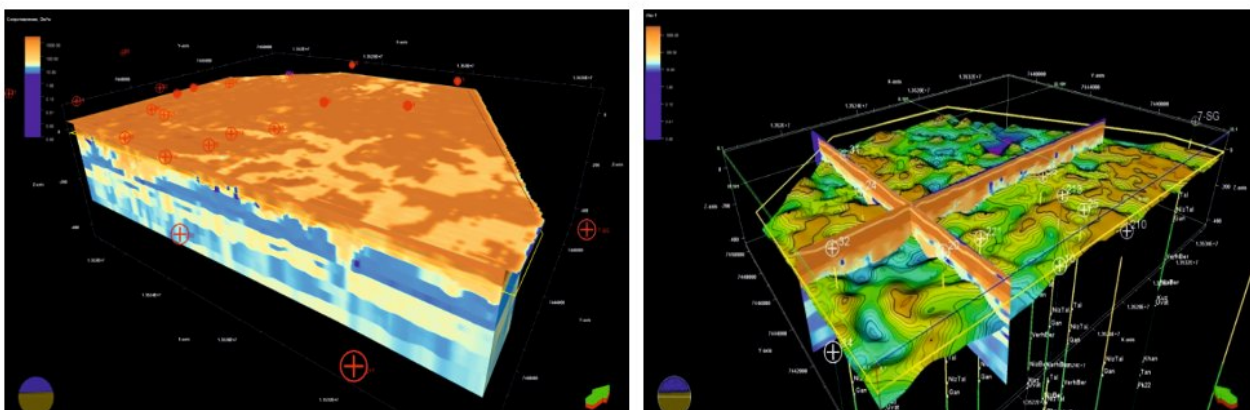
Отложения люлинворской свиты подстилают породы регионально выдержанной песчанистой толщи верхней части тибейсалинской свиты. Отложения тибейсалинской свиты характеризуются сопротивлением от 15 до 30 Ом·м. Данный горизонт также можно отнести к реликтовым многолетнемерзлым породам, находящимся в морозном состоянии.

По результатам проведенных исследований мЗСБ построен куб удельного электрического сопротивления ВЧР участка исследований (Рис. 12А), а также изучен рельеф подошвы современного слоя ММП (Рис. 12Б).

Проведенные исследования мЗСБ позволили:

1. Детально изучить ВЧР в диапазоне глубин, недоступных для глубинной сейсморазведки (до 500 м);
2. Выявить двухслойное строение толщи многолетнемерзлых пород;
3. Определить глубину залегания границы криолитозоны – по подошве отложений тибейсалинской свиты;
4. Выявить закономерность в расположении бугров пучения, их приуроченности к увеличению мощности ММП, а также возможные субвертикальные каналы миграции газа;
5. Определить возможное положение скоплений газовых гидратов и газа в свободном состоянии.

Важным представляется тот факт, что изучение данного интервала отложений ВЧР (в диапазоне глубин 10 – 500 м) сейсморазведкой в ее глубинной модификации (ориентированной на нефтегазопроисковые задачи) практически невозможно. В свою очередь, полученную геологическую информацию о структуре многолетнемерзлых пород возможно использовать для повышения качества обработки сейсморазведочных данных.



▲ Рис. 12. Результаты интерпретации мЗСБ (Западная Сибирь):
А – куб удельного электрического сопротивления ВЧР участка исследований,
Б – рельеф подошвы современного слоя ММП.

Использование результатов мЗСБ для обработки данных сейсморазведки

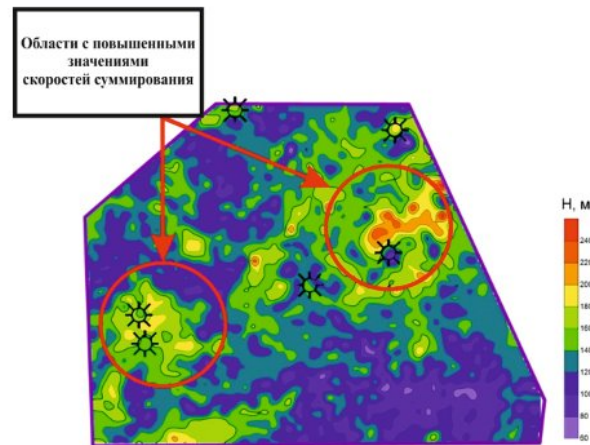
При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях, где развиты ММП, необходимо учитывать их влияние на материалы сейсморазведки. Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале залегания слоёв многолетнемерзлых пород. Недоучёт влияния ММП на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях.

Поправки за влияние локальных изменений свойств ММП определяются заменой слоя после проведения детального скоростного анализа. Значения скоростей для расчёта поправок за ММП снимаются по траектории прослеживания горизонтов, связанных с мерзлотой или по условному уровню ниже ММП. При сопоставлении карт мощности многолетнемерзлых пород по данным ЗСБ и скоростей суммирования ОГТ (Рис. 13) видно, что зоны повышенных скоростей суммирования отождествляются с областями увеличения мощности ММП.

Использование границы подошвы мерзлоты, определенной по данным ЗСБ, в процессе пикировки горизонта ММП на сейсмических данных может повысить точность определения скоростей суммирования и, как следствие, повысить точность структурных построений.

Решение геоэкологических задач методом мЗСБ

Стоит отметить, что метод мЗСБ показал свою высокую эффективность при экологическом мониторинге на месторождениях углеводородов [15]. Так, после бурения скважины на одном из месторождений Восточной Сибири был полу-



▲ Рис. 13. Карта мощности ММП по данным мЗСБ. Условные обозначения: 1 – изолинии мощности ММП, м; 2 – бугры пучения; 3 – области повышенных значений скоростей суммирования.

чен приток нефти. Спустя некоторое время в населенном пункте вблизи месторождения наблюдались выходы нефти на поверхность.

Основными задачами при проведении работ мЗСБ являлись: оценка пространственного распространения вторичной залежи углеводородов; определение глубины залегания загрязненных пластов; выделение наиболее проницаемых зон миграции углеводородов из основной залежи во вторичную. Была сформирована физико-геологическая модель проникновения, распространения и накопления углеводородов в верхней части разреза осадочного чехла. Под действием аномально высоких пластовых давлений углеводородные флюиды проникают по системе разломов и трещин из разгерметизированных глубокозалегающих залежей осинского горизонта в верхние проницаемые водоносные горизонты. Прямым следствием этих процессов явилось появление нефтепродуктов в верхоленском водоносном горизонте.

В результате проведенных работ ЗСБ в породах средне-верхнего кембрия был выделен горизонт пониженного сопротивления, в состав которого, вероятно,

входят пласты-коллекторы, содержащие углеводородные флюиды. Каналом для проникновения растворов в приповерхностные грунтовые воды служат неотектонические зоны трещиноватости, отмеченные на геоэлектрических разрезах (Рис. 14). Характерные для этих зон пониженные значения сопротивления присущи как плотным породам верхоленской свиты, так и четвертичным отложениям. Таким образом, углеводороды проникают в приповерхностное пространство именно в составе растворов.

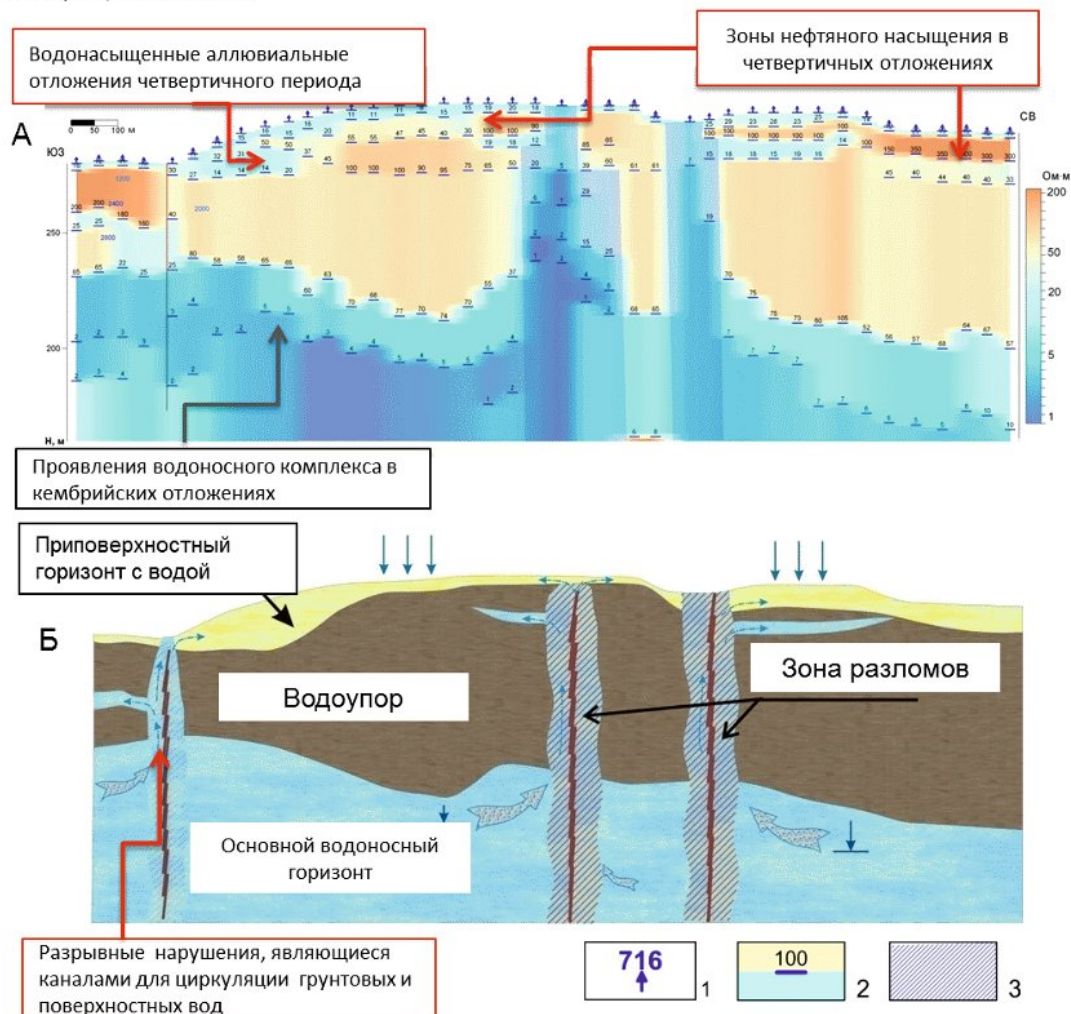
Из результатов работ мЗСБ следует, что положение нефтенасыщенных пластов связано с распространением высокоом-

ного подгоризонта. Зоны вероятного нефтяного насыщения горизонтов, выделенные по данным ЗСБ, подтверждены результатами испытания наблюдательно-эксплуатационных скважин. Применение малоглубинных электроразведочных работ ЗСБ позволило оконтурить высокоомные зоны в верхней части разреза, которые относятся к зонам УВ-загрязнения.

Заключение

Возможности современных цифровых программно-измерительных комплексов, таких как FastSnap, позволяют расширить возможности малоглубинного ЗСБ и вывести решение задач по изучению

▼ Рис. 14. Результаты исследований мЗСБ: А – Геоэлектрический разрез через площадь исследования; Б – схематический геологический разрез, построенный по данным мЗСБ. Условные обозначения: 1 – пункты мЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – зоны трещиноватости.



геоэлектрических свойств разреза на качественно новый уровень. Высокочастотный измерительный канал с широкой полосой пропускания и высокой чувствительностью позволяет увеличить интервал измеряемых глубин, во-первых, за счет снижения стартовой глубины зондирования, и, во-вторых, обеспечить повышенную глубинность благодаря уверенной регистрации слабых сигналов на поздних временах становления. Возможность одновременного применения нескольких телеметрических каналов позволяет организовать многоканальные системы наблюдений, обладающие большей информативностью и производительностью. Надежность и технологичность оборудования дает возможность достичь высокой производительности работ (до 15-20 трехканальных установок с генераторной петлей 100 × 100 м в день на одну полевую бригаду).

Результаты малоглубинных ЗСБ, полученные в совершенно разных природно-климатических условиях и геологических сценариях, подтверждают эффективность метода при решении широкого круга задач ВЧР. Значительная глубинность метода (более 500 м) позволяет: определять глубину залегания водоносных горизонтов; решать задачи структурного картирования; изучения мерзлых пород, трапповых и туфовых тел; экологического мониторинга и т.д. Важно, что результаты исследований мЗСБ подтверждаются последующим бурением, что позволяет реально оценивать широкие возможности метода.

Список литературы

1. Бучарский Б. В., Горячев В. В., Павлов А. Т., 1986, Развитие малоглубинной модификации электроразведки ЗСБ: Изв. вузов. Геология и разведка, 8, 74 – 79
2. Плотников А.Е., Кожевников Н.О.

Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика. 2004. № 6.

3. Ю.А. Агафонов, В.В. Гомульский, М.В. Шарлов, О.В. Токарева, И.А. Тарасов, И.В. Буддо. Применение метода малоглубинных ЗСБ при изучении ВЧР в Восточной Сибири. Инженерная геофизика 2013 — Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2013 г.С. 33-38.

4. H. Shaaban, G. El-Qady, E. Al-Sayed, H. Ghazala, A.I. Taha Shallow groundwater investigation using time-domain electromagnetic (TEM) method at Itay El-Baroud, Nile Delta, Egypt. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics (2016) 5, 323–333

5. Gaetano Ranieri, Tigistu Haile and Tamiru Alemayehu TEM-Fast Small-Loop Soundings to Map Underground Tunnels and Galleries Connecting the Rock-Hewn Churches of Lalibela, Ethiopia. Geomorphology: An International Journal, Vol. 20, No. 5, 433–448 (2005)

6. Мандельбаум М.М. и др. Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе / Мандельбаум М.М., Б.И.Рабинович, В.С.Сурков. – М: Недра, 1983.

7. Корольков Ю.С., Зондирование становлением электромагнитного поля для поиска нефти и газа. М.: Недра, 1987, 117 с.

8. McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques. – Missasagua, Canada: Geonics Limited. - TN 7, 1980. - 17 p.

9. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. №01(31). С. 27 – 31.

10. Электронный ресурс сети интернет: www.fastsnap.ru

11. М.В. Шарлов Интегрированный подход к обработке и инверсии данных малоглубинных ЗСБ – оценка эффективности по результатам математического моделирования // Расширенные тезисы 13-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика 2017».

12. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В., Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, №1, С.33 – 36.

13. Yuri Agafonov, Aleksandra Aksenovskaya, Ilya Egorov, Dmitri Kolesnikov, Maxim Sharlov, High-density shallow TEM surveys for groundwater prospecting in East Siberia. 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand. 2016.

14. Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В. Агафонов Ю.А Опыт применения малоглубинных электромагнитных зондирований для изучения криолитозоны. Инженерная геофизика – 2017. Кисловодск. 2017.

15. Гомульский В.В, Марковцева О.В, Агафонов Ю.А, Егоров И.В. Применение малоглубинных электромагнитных зондирований при изучении техногенных залежей углеводородов. GeoBaikal 2010. Иркутск. 2010.

Подробнее об авторах



Шарлов
Максим Валерьевич

первый заместитель
генерального директора
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»



Буддо
Игорь Владимирович
кандидат геолого-минера-
логических наук, замести-
тель главного геофизика
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»,
Институт земной коры
СО РАН



Шелохов
Иван Антонович

геофизик АО «Иркутское
электроразведочное
предприятие»



Мисюркеева
Наталья Викторовна

ведущий геолог
АО «Иркутское электро-
разведочное
предприятие»



Агафонов
Юрий Александрович

к.т.н., генеральный
директор АО «Иркутское
электроразведочное
предприятие»

Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований

■ М.В. Шарлов, АО «ИЭРП», г. Иркутск

Введение

Методы нестационарных электромагнитных зондирований, в частности, зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), широко применяются для изучения электрических свойств геологического разреза в большом интервале глубин. Объем работ методом ЗСБ в Восточной и Западной Сибири в последние годы значительно возрос. Востребованными являются исследования ЗСБ как в глубинной, так и в малоглубинной модификациях для решения нефтегазописковых, гидрогеологических, геотехнических задач, для изучения зон распространения многолетнемерзлых пород и др.

Аппаратное обеспечение метода ЗСБ состоит из возбуждающей (генератор, коммутатор тока, источник поля) и измерительной (датчик поля, измеритель/регистратор) систем. В результате импульсного воздействия, вызванного быстрым выключением тока в источнике (генераторной петле или линии), в геологической среде возникает переходный процесс (становление поля), который регистрируется датчиком в виде изменяющейся во времени ЭДС. В зависимости от подхода, реализованного в измерительной системе, данные на выходе регистратора могут представлять либо готовую кривую становления, т.е. последовательность осредненных (накопленных) значений ЭДС с нарастающим (логарифмическим) шагом по времени, либо серию временных рядов, отсчеты которых получены с АЦП с исходным арифметическим шагом дискретизации по времени. Для систем, выдающих «сырые» данные, получение итоговой кривой становления производится путем

фильтрации и осреднения исходных данных на более позднем этапе обработки на компьютере.

Несмотря на более сложный процесс получения итоговой кривой становления, подход, основанный на регистрации сигналов с арифметическим шагом дискретизации, имеет преимущество, выражающееся в более сильной помехозащищенности системы. Данные, записанные с частым постоянным шагом по времени, дают возможность последующей цифровой обработки сигналов (ЦОС), и, таким образом, улучшения соотношения сигнал/шум (SNR) путем учета параметров помехи, регистрируемой вместе с полезным сигналом [1].

Следует отметить, что системы, измеряющие сигнал с арифметическим шагом дискретизации, также не лишены недостатков. Так, применение некоторых процедур ЦОС, например, частотной фильтрации, эффективно увеличивающей SNR для сигналов, осложненных гармонической помехой, приводит к значительным искажениям АЧХ обрабатываемого сигнала, в том числе и его полезной информативной составляющей, что может в значительной степени повлиять на результаты инверсии.

Известно несколько способов, позволяющих компенсировать искажения, вносимые в регистрируемый сигнал:

1. Учет импульсной характеристики измерительной системы путем приведения измеренного сигнала к теоретической форме (например, исключение собственного отклика системы из наблюдаемого сигнала с помощью деконволюции [2]).
2. Приведение теоретического сигнала к форме практического (например,

приведение АЧХ отклика прямой задачи к АЧХ измерительной системы в ходе инверсии[3]).

Применение любого из упомянутых способов компенсации искажений для измерительных систем, выдающих на выходе с измерителя «готовую» кривую, не представляет особой сложности ввиду постоянства аппаратных характеристик таких систем (таких как настройки аппаратного интегрирования, аналоговые фильтры и т.п.). Даже если такие системы обеспечивают возможность подключения дополнительных фильтров (например, фильтр «сетевой» помехи 50 Гц) – возможное число аппаратных конфигураций невелико и конечная импульсная характеристика системы может быть оценена отдельно и учтена для каждой из конфигураций.

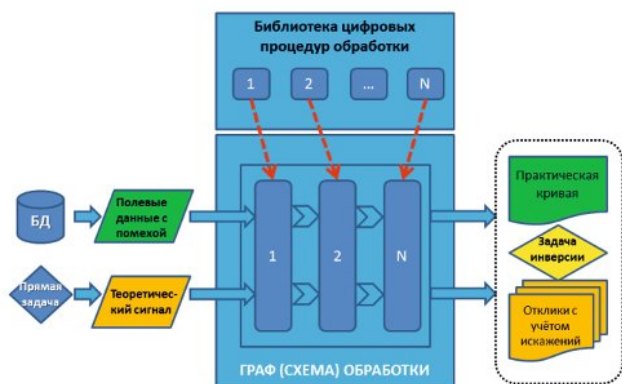
Более современные программно-измерительные системы, работающие с «открытым» каналом и выдающие сигналы без предварительной фильтрации с арифметическим шагом дискретизации, находятся в принципиально другой ситуации. Исходя из свойства линейности измерительных систем [4], суммарная импульсная характеристика такой системы будет состоять из совокупности импульсной характеристики собственно аппаратного измерительного тракта и импульсных характеристик фильтров / алгоритмов ЦОС, которые применяются при обработке итоговой кривой. Ввиду того, что число возможных процедур ЦОС велико, а настройки частотной фильтрации могут меняться в зависимости от конкретной помеховой обстановки, становится понятно, что суммарная импульсная характеристика для каждой конкретной обработанной кривой может быть совершенно разной. Это не позволяет учесть ее простым способом, так как невозможно заранее предусмотреть все

возможные варианты сочетания процедур ЦОС и их настроек.

В этой связи перспективным представляется дальнейшее развитие способа учета искажений, подразумевающего приведение теоретического отклика к форме практической кривой. В рамках развиваемого способа, который можно назвать интегрированным подходом к обработке и инверсии данных ЗСБ, для обеспечения высокого качества кривых решаются задачи цифровой обработки при автоматическом «зеркальном» учете их искажающего влияния на этапе инверсии, что в итоге должно привести к улучшению достоверности интерпретации получаемых данных.

Интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ.

Итак, интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ – это подход, основанный на применении единого в рамках отдельного физического наблюдения способа цифровой обработки измеренных и теоретических (модельных) сигналов. В графическом виде интегрированный подход представлен на рисунке 1. Так как в рассматриваемом подходе подразумевается широкое применение различных процедур ЦОС (цифровых фильтров), имеет смысл определить, что именно подразумевается



▲ Рис. 1. Интегрированный подход к обработке и инверсии данных ЗСБ.

под фильтрацией в контексте данной статьи. Фильтрацией называется процесс преобразования сигналов, а устройство (либо процедура цифровой обработки), выполняющая фильтрацию, называется фильтром [5].

Главной идеей, лежащей в основе интегрированного подхода, является автоматический учет в ходе инверсии тех искажений, которые вносятся цифровыми фильтрами на этапе обработки сигналов. Возможности минимизации помех в этом случае будут выше за счет применения более широкого набора процедур, в том числе и искажающих АЧХ полезного сигнала, но при этом увеличивающих SNR до требуемого уровня. Для компенсации внесенных искажений и улучшения степени достоверности результата инверсии к рассчитываемому отклику прямой задачи в рамках интегрированного подхода автоматически должен применяться тот же «граф обработки», что был использован для получения практической кривой. Таким образом, в ходе инверсии будут сравниваться практическая и теоретическая кривые, обработанные одинаковым способом, т.е. переведенные в «еди-

ную систему отсчета», а сам граф обработки будет формироваться в каждом конкретном случае, исходя из необходимости и целесообразности применения тех или иных процедур.

Основные задачи и алгоритмы их решения в рамках интегрированного подхода приведены в схеме, показанной на рисунке 2. Их эффективное решение позволит в полной мере реализовать потенциал современных цифровых измерительных систем.

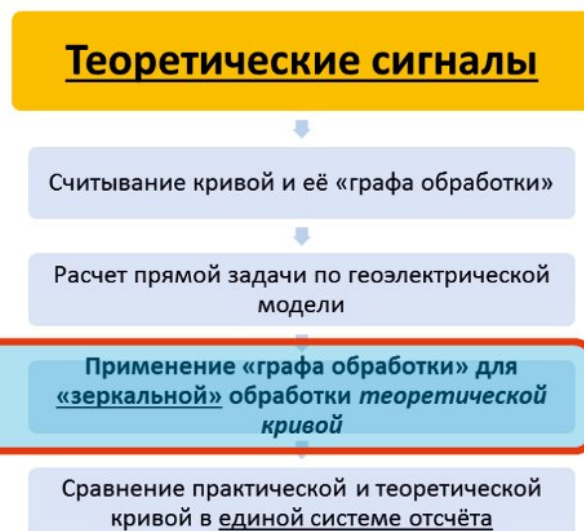
Ввиду большого многообразия процедур ЦОС необходимо произвести их классификацию по степени влияния на сигнал:

- Процедуры, выделяющие сигнал на фоне внешних помех и не искажающие его АЧХ. Примерами таких процедур могут служить «накопление» сигнала методами среднего арифметического, статистическое и робастное суммирование и т.п.
- Процедуры, выполняющие преобразование во временной или частотной области, изменяющие АЧХ полезного сигнала, т.е. вносящие искажения в спектр информативной составляющей сигнала.

Задача 1 – улучшение соотношения сигнал / шум:



Задача 2 – учёт искажений АЧХ при инверсии кривой:



▲ Рис. 2. Основные шаги решения задач интегрированного подхода.

Примерами таких процедур могут служить частотная фильтрация, свертка, интерполяция и др.

В рамках интегрированного подхода к обработке и инверсии подлежат учету процедуры, искажающие АЧХ полезного сигнала.

Реализация интегрированного подхода к обработке и инверсии данных в программно-измерительном комплексе FASTSNAP.

Для реализации интегрированного подхода к обработке и инверсии программно-измерительная система должна соответствовать следующим основным требованиям:

- 1) Исходные данные (измеренные и теоретические отклики) должны быть представлены в виде дискретных временных рядов с арифметическим шагом дискретизации сигнала по времени.
- 2) Необходима разделяемая программная библиотека процедур ЦОС с определенным способом уникальной идентификации и вызова каждой процедуры из разного программного обеспечения.
- 3) Программное обеспечение для обработки исходных данных должно позволять формировать, применять и сохранять параметры «графа обработки» вместе с результирующей кривой.
- 4) Программное обеспечение моделирования/инверсии должно автоматически считывать кривую и ее «граф обработки» и применять его при расчёте отклика прямой задачи.

Интегрированный подход в указанном виде реализован в интегрированной системе для обработки и инверсии данных ЗСБ, входящей в состав программно-измерительного комплекса малоглубинной электроразведочной станции FastSnap [6]. Основными программными

компонентами, входящими в состав системы, являются:

- клиент-серверная база данных зондирований [7];
- программа обработки данных ЗСБ TEM-Processing;
- программа моделирования и инверсии данных ЗСБ Model 3; [8].

Вопросы классификации операций ЦОС над исходными данными и разработка расширяемой библиотеки фильтров более подробно рассмотрены в работе [9]. Отметим, что расширяемая библиотека фильтров реализована на основе технологии COM (Component Object Model). Каждый фильтр, выполненный как динамически подключаемая библиотека (DLL) и реализованный в виде COM-сервера, при регистрации в операционной системе становится доступным любому приложению, которое может запросить подключение к нему по глобальному уникальному идентификатору (GUID).

Обработка исходных данных в соответствии с требованиями интегрированного подхода производится в программе TEM-Processing. Конвейер обработки в виде схемы представлен на рисунке 3.



▲ Рис. 3. Конвейер обработки данных в программе TEM-Processing.

В зависимости от типа помехи, присутствующей в обрабатываемом сигнале, в граф обработки могут быть добавлены процедуры, подлежащие учету при инверсии. Например, при обработке малоглубинных данных для «ранних» времен кривой становления может применяться НЧ фильтрация, позволяю-

щая минимизировать помеху в виде «звона» генераторной и приемной петель [10]. Другим примером может служить обработка сигналов, осложненных «сетевой» гармонической помехой 50 Гц, полученных вблизи урбанизированных районов (НЧ, режекторная фильтрация). В отдельных случаях переходные процессы, регистрируемые с высокой частотой дискретизации (до 40 МГц) при малоуглубинных исследованиях, могут быть искажены амплитудно-модулированной помехой от радиостанций, которая также не может быть эффективно удалена регулярными процедурами накопления сигнала.

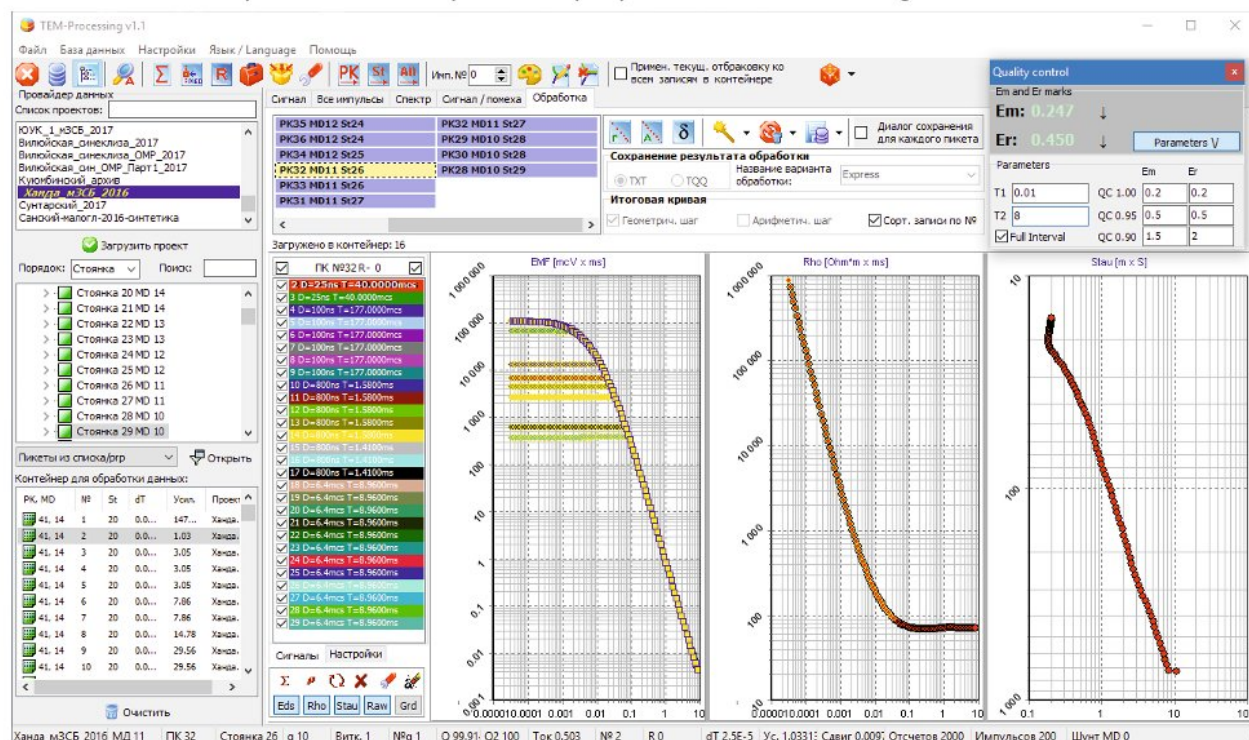
На разных стадиях конвейера обработки могут применяться различные процедуры обработки и фильтрации данных. Так, набор сигналов в виде серии временных рядов, входящих в состав записи, может быть отфильтрован перед процедурой осреднения, а результат осреднения, в свою очередь, может быть обработан с помощью фильтра с другими настройками. Заключительным шагом,

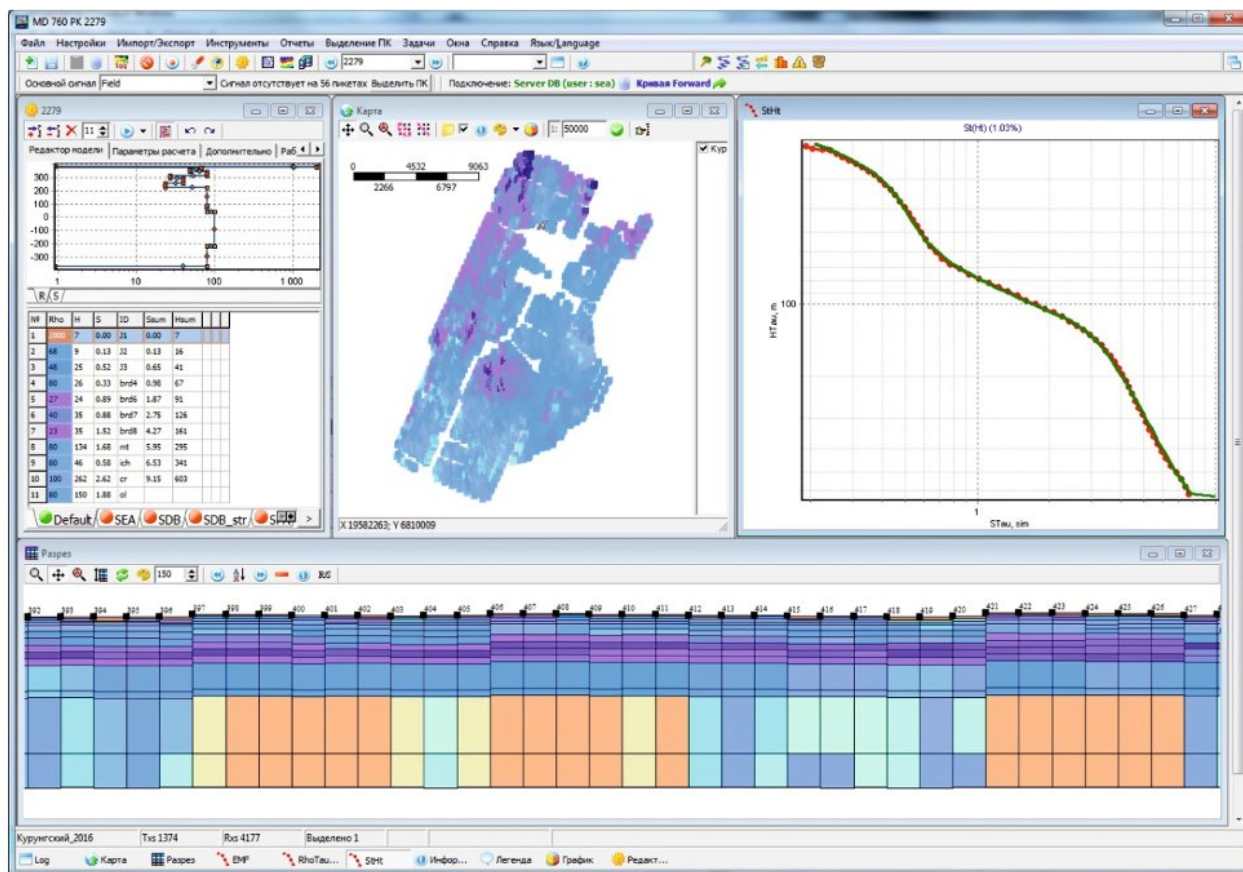
предваряющим «сборку» итоговой кривой из набора отдельных записей, является переход с помощью процедур интерполяции от линейного шага дискретизации сигнала к логарифмическому шагу (сетка времен «ЦИКЛ» или заданная пользователем). Этапы фильтрации не являются обязательными и применяются только при необходимости минимизации помех определенных типов.

Фактический граф обработки, применяемый для обработки текущего физического наблюдения, сохраняется в единую базу данных (БД) зондирований в файле с результирующей кривой (TQQ-файл). Файл формата TQQ представляет собой XML-файл, в котором специальный раздел отведен для хранения примененного графа обработки.

Помимо работы с графом обработки, программа TEM-Processing обладает широкими возможностями визуализации сигналов и исследования их характеристик (построение спектра, диаграмм SNR для разных способов обработки, расчет статистических параметров качес-

▼ Рис. 4. Блок сборки итоговой кривой в программе TEM-Processing.





▲ Рис. 5. Программа Model 3 для моделирования и инверсии данных ЗСБ.

тва и др.). Программа предоставляет возможности работы с данными как в «ручном» режиме (с каждой отдельной записью), так и в «пакетном» режиме, когда настройки фильтрации, осреднение и получение итоговых кривых могут производиться автоматически для всех загруженных в контейнер данных (обрабатываются десятки и сотни физических наблюдений). Блок итоговой «сборки» кривой (рисунок 4) позволяет производить отбраковку выделяющихся отсчетов на основе различных статистических алгоритмов, выполнять расчет трансформант сигнала и рассчитывать суммарную оценку качества кривой по параметрам EMQS [11].

Инверсия данных с учетом примененных при обработке фильтров выполняется в программе Model 3 (рисунок 5). Для этого при решении обратной задачи теоретический отклик рассчитывается с

требуемым (в зависимости от исходных данных) арифметическим шагом по времени и к нему применяется один или несколько цифровых фильтров, использованных для обработки моделируемой практической кривой, за счет чего обеспечивается учет искажений, вносимых фильтрами. Кроме того, программа обладает развитыми средствами визуализации сигналов и геоэлектрических моделей в профильном и площадном вариантах, а также позволяет выполнять расчет прямой задачи с учетом параметров индукционно-вызванной поляризации.

Применение программ обработки и инверсии в совокупности позволяет реализовать интегрированный подход, обеспечить высокое качество кривых и улучшить достоверность интерпретации за счет учета искажений, вносимых процедурами цифровой обработки.

Оценка эффективности применения интегрированного подхода к обработке и инверсии данных ЗСБ.

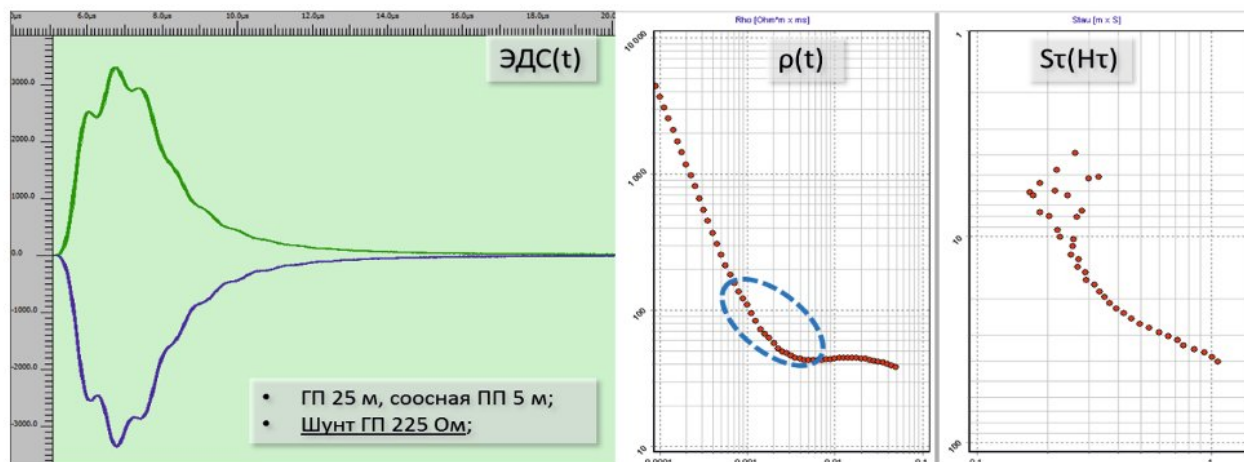
Для оценки актуальности и эффективности интегрированного подхода к обработке и инверсии данных ЗСБ рассмотрим несколько примеров решения задач, обозначенных ранее.

Задача 1 – улучшение соотношения сигнал/шум для измеренных сигналов. Рассмотрим сигнал становления, полученный соосной установкой при выполнении малоглубинного зондирования с генераторной петлей 25×25 м и приемной петлей 5×5 м (рисунок 6).

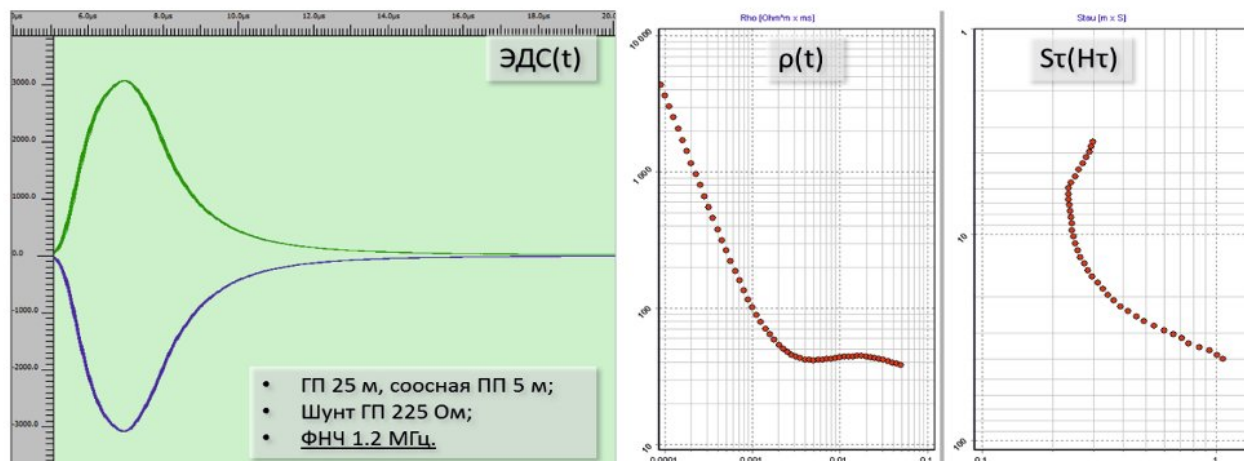
Для подавления «звона» генераторной петли (ГП) использовался параллельный шунт номиналом 225 Ом. Основной колебательный процесс («звон» ГП)

подавлен шунтом, однако в сигнале наблюдается остаточный высокочастотный колебательный процесс с частотой 1.2 МГц («звон» приемной петли, кондукторов и т.п.) с видимой длительностью около 5–6 мкс. Кривая кажущегося сопротивления (t) имеет видимую дисперсию (нарушение гладкости) в интервале времени 0.5 – 5 мкс. Этому диапазону времен на кривой кажущейся проводимости от кажущейся глубины $St(Ht)$ соответствует интервал разреза до глубины 10–15 м, на котором соотношение сигнал/шум не позволяет произвести качественную интерпретацию материала.

Для сравнения, на рисунке 7 приведен тот же сигнал, но обработанный фильтром нижних частот с частотой среза 1.2 МГц.



▲ Рис. 6. Сигнал становления, полученный при шунтировании ГП.



▲ Рис. 7. Сигнал становления после обработки с помощью фильтра нижних частот.

Помеха в виде колебательного процесса исключена из сигнала, кривая (t) не имеет видимой дисперсии, а кривая $St(Ht)$ содержит интерпретируемую информацию о разрезе, начиная с 5–6 м, что наглядно демонстрирует эффективность и целесообразность применения цифровой фильтрации с целью улучшения SNR на ранних временах. В приведенном примере такая обработка позволила увеличить интервал изучаемых глубин за счет уменьшения стартовой глубины зондирования. Стоит отметить гибкость и универсальность данного подхода к обработке данных, так как параметры фильтрации подбираются автоматически, исходя из параметров помехи, присутствующей в сигнале, а настройки обработки сохраняются вместе с кривой, позволяя учесть внесенные фильтрацией искажения на этапе инверсии.

Задача 2 – учет искажений АЧХ сигнала при инверсии данных ЗСБ. Для оценки степени влияния цифровой фильтрации на погрешность восстановления геоэлектрической модели при инверсии данных

ЗСБ проведем эксперимент, основанный на математическом моделировании.

План эксперимента:

1) Формирование моделей 1 и 2 с разным строением и суммарной проводимостью верхней части разреза (ВЧР).

2) Расчет теоретических откликов (ЭДС_1 и ЭДС_2) от соответствующих моделей.

3) Моделирование ситуации с обработкой сигнала фильтром для подавления «звона» ГП и ПП – применение НЧ фильтра к теоретическим откликам ЭДС_1 и ЭДС_2 для фильтрации сигналов на ранних временах (получение искаженных НЧ фильтром откликов ЭДС_1' и ЭДС_2').

4) Инверсия для Случая 1 – автоматическая инверсия искаженных откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью «обычной» прямой задачи (без учета примененного НЧ фильтра).

5) Инверсия для Случая 2 – автоматическая инверсия искаженных откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью модифицированной прямой задачи (с учетом реальных параметров НЧ фильтра).

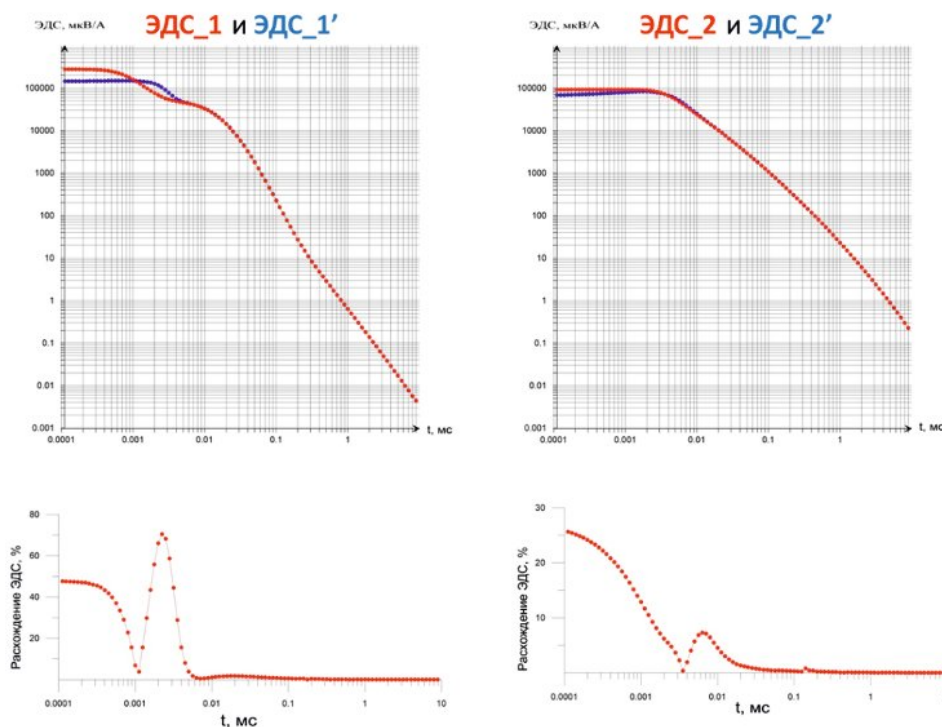


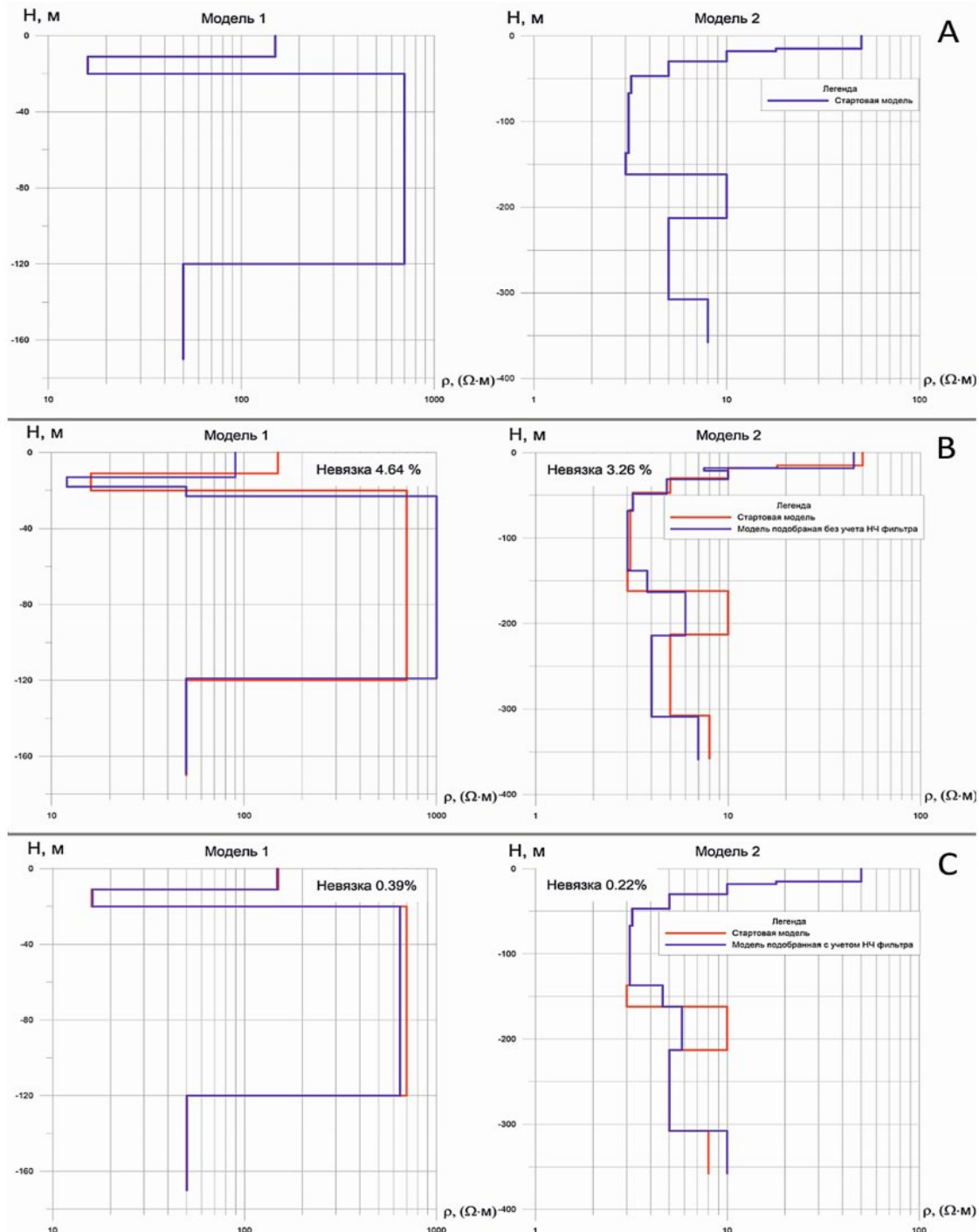
Рис. 8. Теоретические и искаженные НЧ фильтром отклики для моделей 1 и 2 (верхние графики) и графики их относительного расхождения (нижние графики).

6) Сравнение восстановленных моделей для Случая 1 и 2 с исходными моделями.

Стартовые геоэлектрические модели приведены на рисунке 9А. Теоретические отклики ЭДС_1 и ЭДС_2, а также искаженные НЧ фильтрами (с частотой среза 1 МГц и 200 кГц) отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' приве-

дены на рисунке 8. Под откликами приведены графики относительного расхождения между исходным и искаженным НЧ фильтрами сигналами, которые демонстрируют значительные расхождения по амплитуде на интервале времени от нуля до нескольких десятков микросекунд.

На рисунке 9В показаны результаты



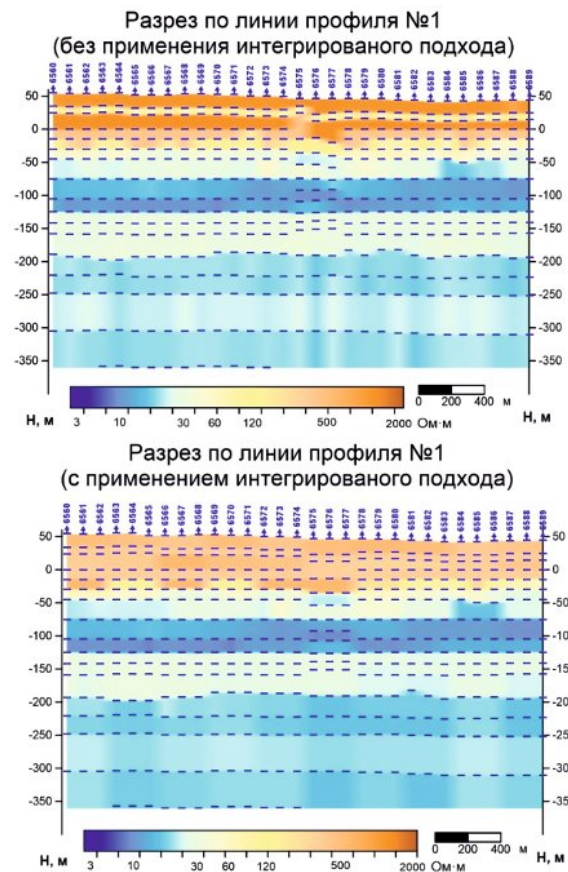
▲ Рис. 9. Стартовые геоэлектрические модели (А), результат инверсии для случая 1 (В) и случая 2 (С).

восстановления геоэлектрических моделей для Случая 1, когда искаженные отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' инвертировались «обычной» прямой задачей без учета примененной НЧ фильтрации. Обе модели были восстановлены с заметными погрешностями, как по сопротивлению (в верхней части появился проводящий слой, которого нет в исходных моделях), так и по мощности слоев. В целом невязка подбора составила 4.6% для высокоомного разреза и 3.2% для более проводящего. С учетом того, что отклики ЭДС_1' и ЭДС_2' не зашумлялись, качество инверсии можно признать низким, а отличия между исходными и восстановленными моделями являются следствием влияния НЧ фильтрации.

Другие результаты получились при инверсии откликов ЭДС_1' и ЭДС_2' с помощью модифицированной прямой задачи, результаты работы которой дополнительно обрабатывались НЧ фильтрами с заданными параметрами (рисунок 9С).

Обе модели в верхней части разреза были полностью восстановлены, включая значения сопротивлений и мощностей. Полученные невязки (0.4% и 0.2%) свидетельствуют о более высоком качестве подбора, а полученные расхождения, вероятно, могут быть объяснены эквивалентностью распределения сопротивлений между слоями (в пределах полученной невязки).

Сравнение результатов инверсии для Случаев 1 и 2 наглядно показывает, что учет при инверсии искажений, вызванных процедурами обработки сигналов, позволяет восстановить геоэлектрические модели с меньшей погрешностью, и, таким образом, повысить достоверность интерпретации кривых.



▲ Рис. 10. Геоэлектрические разрезы по профилю №1 на участке с распространением зоны многолетнемерзлых пород, полученные в результате разных подходов к инверсии данных малоуглубинных ЗСБ (размер генераторной петли 100 × 100 м, приемной петли 10 × 10 м).

Пример практического применения интегрированного подхода для обработки и инверсии данных ЗСБ.

С целью проверки работоспособности подхода была произведена инверсия реальных данных. На рисунке 10 показаны два геоэлектрических разреза, полученные из одного и того же набора данных (36 физических наблюдений), но с применением разных подходов к инверсии. Данные были записаны на одном из участков Западной Сибири. Известно, что верхняя часть разреза (100–130 м) сложена многолетнемерзлыми породами (ММП) с высокой льдистостью. Сопротивление ММП по данным БКЗ составляет

порядка 500 Ом·м.

На разрезе, полученном без учета интегрированного подхода (верхний разрез на рисунке 10), имеется проводящий слой с сопротивлением 60–70 Ом·м, хотя присутствие данного слоя противоречит априорной геологической информации. По всей вероятности, данный проводящий слой является следствием искажений, вносимых процедурами обработки исходных данных, и появляется в каждой геоэлектрической модели разреза, так как позволяет добиться меньшей невязки подбора.

Разрез, показанный на рисунке 10 внизу, получен с применением интегрированного подхода (с помощью прямой задачи, учитывающей фактический граф обработки каждой кривой). Верхняя часть разреза включает слой многолетнемерзлых пород мощностью более 100 м, обладающих высоким удельным электрическим сопротивлением, что соответствует физико-геологической модели (ФГМ) участка работ. Более качественный подбор верхней части разреза также позволил улучшить и результаты восстановления более глубоких слоев и в целом обеспечить меньшую невязку подбора моделей.

Таким образом, в результате применения интегрированного подхода были получены результаты инверсии, соответствующие ФГМ исследуемого участка, а также на 1.5–2% улучшилась общая невязка подбора геоэлектрических моделей.

Заключение.

Современные цифровые измерительные системы, работающие с арифметическим шагом регистрации, обладают несомненными преимуществами с точки зрения обеспечения качества измерений благодаря широкому набору средств ЦОС.

Однако, применение некоторых алгоритмов обработки может приводить к искажениям АЧХ информативной части сигналов, сказывающимся на достоверности их интерпретации. Вследствие этого необходимы дополнительные меры, тем или иным способом обеспечивающие компенсацию вносимых при обработке искажений.

Добиться этого можно с помощью рассмотренного в данной статье интегрированного подхода к обработке и инверсии, позволяющего применять полный арсенал средств ЦОС и вместе с тем обеспечивающего автоматический учет искажений, вносимых при обработке сигналов. За счет применения данного подхода расширяются возможности измерительной системы при работе в сложных помеховых условиях (возрастает помехозащищенность, обеспечивается возможность работы в урбанизированных и промышленных районах с высоким уровнем эл.м. помех). Учет искажений, реализованный в интегрированном подходе, позволяет улучшить достоверность и качество инверсии получаемых данных, а в некоторых случаях и расширить диапазон изучаемых глубин, например, уменьшить стартовую глубину зондирования за счет подавления помехи в виде «звона» петли.

Благодарности.

Автор благодарен д.г.-м.н., профессору Н.О. Кожевникову за обсуждение идей и результатов данной работы, а также И.А. Шелохову за помощь в подготовке материалов статьи.

Литература

1. K.-M. Strack, T.H. Hanstein and H.N. Eilenz, LOTEM data processing for areas with high cultural noise levels // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, vol.53 P.261—269

2. K.-M. Strack, Chapter 3. Distortions of the Signal and their Compensation // Exploration with deep transient electromagnetic: Elsevier, 1992, reprinted 1992.

3. Effersø F., Auken E., and Sørensen K., Inversion of band-limited TEM responses // Geophysical Prospecting, 1999, vol.47, P. 551 – 564

4. Стивен Смит, Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников: М.: Додэка-XXI, 2012.

5. Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов. Справочник. // М.: «Радио и связь», 1985. — 312 с.

6. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap // ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ, 2010, №1, С.27 – 31.

7. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Шарлов М.В. Интеграция оперативной системы обработки и хранилища данных электромагнитных зондирований – Вестник ИрГТУ, 2014. - № 4(87). - С. 18-23.

8. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В., Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ, 2006, №1, С.33 – 36.

9. Шарлов М.В., Гусейнов Р.Г. Система "EM-Processing" для многоэтапной обработки данных ЭМЗ на основе подключаемых цифровых фильтров // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2.- СПб.: СПбГУ, 2011 – с.134-137;

10. Шарлов М.В. Интегрированный подход к обработке и инверсии данных малоглубинных ЗСБ – оценка эффективности по результатам математического моделирования // Расширенные тезисы 13-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика 2017»;

11. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований – Вестник ИрГТУ, 2015. - № 5(100). - С. 53-60.

Подробнее об авторе



Шарлов
Максим Валерьевич

первый заместитель
генерального директора
АО «Иркутское электрораз-
ведочное предприятие»

Аппаратура и системы наблюдений для решения нефтегазописковых задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на суше

- Ситников А.А., Иванов С.А., к.г.-м.н., Жуган П.П., Мальцев С.Х., ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», (ООО «СГНПК»),
- Агеенков Е.В., к.г.-м.н., ООО «СГНПК», Иркутский национальный исследовательский технический университет

Введение

Использование электроразведочных методов при проведении нефтегазописковых работ началось на заре электрометрии. В 1923 г. фирма Шлюмберже организовала крупные по масштабам того времени электроразведочные работы по изучению нефтеносных структур в Румынии, при участии С. Стефанеску. В Советском Союзе в 1928–1929 гг. совместно с фирмой Шлюмберже были начаты электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования с целью поисков нефтяных месторождений в районе Баку и Грозного [Матвеев, 1990]. В районе Грозного в 1927–1929 гг. А.И. Заборовский проводил работы методом сопротивлений, параллельно с работами фирмы Шлюмберже, с целью поиска и исследования нефтеносных структур [Дмитриев и др., 2011].

С этого времени электроразведка входит в комплекс геофизических методов, использующихся для поиска УВ. Дальнейшие разработки ЭМ методов – частотных зондирований (А.П. Краев), зондирований становлением поля (А.Н. Тихонов, С.М. Шейнманн, Л.Л. Ваньян и др.), магнитотеллурических зондирований (А.Н. Тихонов, М.Н. Бердический и др.), зондирований становлением поля в ближней зоне (А.А. Кауфман, Г.М. Морозова, Ю.Н. Антонов, А.А. Табаровский, В.А. Сидоров, В.В. Тикшаев и др.), зондирований вертикальными токами (В.С. Могилатов) – связаны с их применением для структурной (нефтегазописковой) геофизики.

Работы С.М. Шейнманна, В.С. Комарова, затем В.В. Кормильцева, А.В. Куликова, Ф.М. Каменецкого, Б.С. Светова, В.В. Агеева и др. сформировали восприятие геологической среды как многофазной и многокомпонентной (поляризующаяся-диспергирующая геологическая среда [Каменецкий, 2014]). Для такой среды свойственно протекание различных релаксационных ЭМ процессов, в том числе вызванной поляризации (ВП), проявляющихся в виде регистрируемого ЭМ сигнала и несущих дополнительную геофизическую информацию о её строении.

Исследования по выявлению общих закономерностей распределения геофизических свойств залежей УВ, позволяющих построить обобщенную физико-геологическую модель (ФГМ) нефтегазового месторождения [Круглова, 1975; Берёзкин, 1978; Electrical method ..., 1984; Schumacher, 1996] показали, что под воздействием глубоко залегающих УВ отмечается увеличение поляризуемости горных пород в районе регионального водоупора, разделяющего области пород с окислительными и восстановительными свойствами. Это дало основание для использования методов ВП для поиска УВ.

Для поиска таких аномалий целесообразно использование электроразведочного метода, изучающего поляризационные свойства среды на значительных глубинах (до 1000 м). Возбуждение процессов ВП на таких глубинах возможно при создании значимой плотности тока в

исследуемых горизонтах продолжительное время и регистрации проявления ВП в напряжённости вторичного поля. Поэтому, наиболее эффективным способом возбуждения и измерения ВП является применение гальванически заземлённых электрических линий – (ГЗЭЛ) [Кожевников, 2009].

В ДНМЭ применяется дифференцирование ЭМ поля. Использование высших производных известно в геофизике [Маловичко, 1981] и, в частности, в электроразведке [Сапужак, 1967 и 1977]. Применение высших производных является весьма эффективным при изучении геологических неоднородностей, особенно на небольших глубинах. Альпин Л.М., при разработке дивергентного каротажа скважин, применял нормировку второй разности потенциалов на потенциал удаленного электрода ($\Delta^2 U/U$) [Альпин, 1962]. Н.И. Рыхлинский предложил непосредственно регистрировать отношение $\Delta^2 U/\Delta U$ применительно сначала к каротажу [Рыхлинский, 1970], а затем и для наземно-скважинных наблюдений. Им же была сделана попытка использования трансформанты – дифференциально-нормированного параметра Δ^{2U}/Δ^U при наземных наблюдениях в нефтегазоносном районе. Изначально ДНМЭ предназначался для картирования границ геоэлектрических неоднородностей (литологические замещения пород, водонефтяной контакт, газонефтяной контакт, погребенные разломы и т.д.), к которым интегральные методы электроразведки слабо чувствительны. По кругу решаемых задач ДНМЭ сначала не отличался от метода дивергентной электроразведки. Отличие, и весьма существенное, заключалось лишь в том, что производная электрического поля нормировалась на само поле, а не на силу тока [Легейдо, 1998].

При полевой апробации метода в режиме переходных процессов с использованием дипольно-осевой установки были получены результаты, показавшие, что предлагаемый подход позволяет совместно изучать индукционные и поляризационные процессы и получать распределение с глубиной УЭС и поляризационных свойств разреза [Легейдо, 1990 и 1995].

В области нефтегазопроисловых работ основная задача ДНМЭ заключается в выделении аномалий ВП, связанных с залежами углеводородов, на основании изучения переходного процесса от ГЗЭЛ.

1. Особенности сухопутной технологии ДНМЭ и решаемые задачи

Технология сухопутных работ ДНМЭ основана на возбуждении индукционных и поляризационных процессов ГЗЭЛ (АВ) и измерении сигнала, вызванного становления ЭМ поля и релаксации ВП, в осевой зоне источника трёхэлектродной ГЗЭЛ (МОН). Дополнительно проводятся измерения симметричной установкой (М1N1).

Измерения в осевой зоне источника предполагают одинаковый знак поля во время пропускания тока, индукционного переходного процесса и поляризационного релаксационного процесса, вызванного гальваническим током [Моисеев, 2002]. Глубинность распространения гальванического тока, а значит и исследования ВП, вызванные им, можно оценить по расстоянию между центрами источника и приёмника (r), как для дипольной осевой электрической установки. Эффективная глубина исследования будет составлять $r/2$.

Ограниченные по глубинности длиной ГЗЭЛ, исследования ВП проводятся симметричной установкой, для неё сигналы становления и ВП в горизонтально-слоис-

той среде имеют разный знак. После смены знака, сигнал преимущественно определяется эффектом ВП [Там же].

Технология ДНМЭ на суше решает задачи изучения распределения УЭС геоэлектрического разреза до глубин 3000 – 4000 м, обнаружения аномалий ВП на глубинах до 1000 м и выделения из них аномалий, связанных с, глубже залегающими, залежами УВ.

Трёхэлектродная измерительная линия используется для одновременной регистрации разности потенциалов (ΔU) и второй конечной разности потенциалов ($\Delta^2 U$). Измерения проводятся как на постоянном токе (ΔU и $\Delta^2 U$), так и во время переходного процесса ($\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$) (Табл.1). Параметр $\Delta^2 U$ связан с пространственной неоднородностью ЭМ поля и позволяет формировать трансформанты ($P1(t)$ и $D\phi(t)$), эффективно подавляющие индукционную составляющую сигнала переходного процесса в поздней стадии и подчёркивающие информацию о поляри-

зуемости среды.

Использование MON и дифференциального канала в измерительной аппаратуре позволяет подавлять синфазные помехи, одновременно проявляющиеся и на линии МО, и на линии ON, и измерять малые величины второй конечной разности потенциалов $\Delta^2 U$.

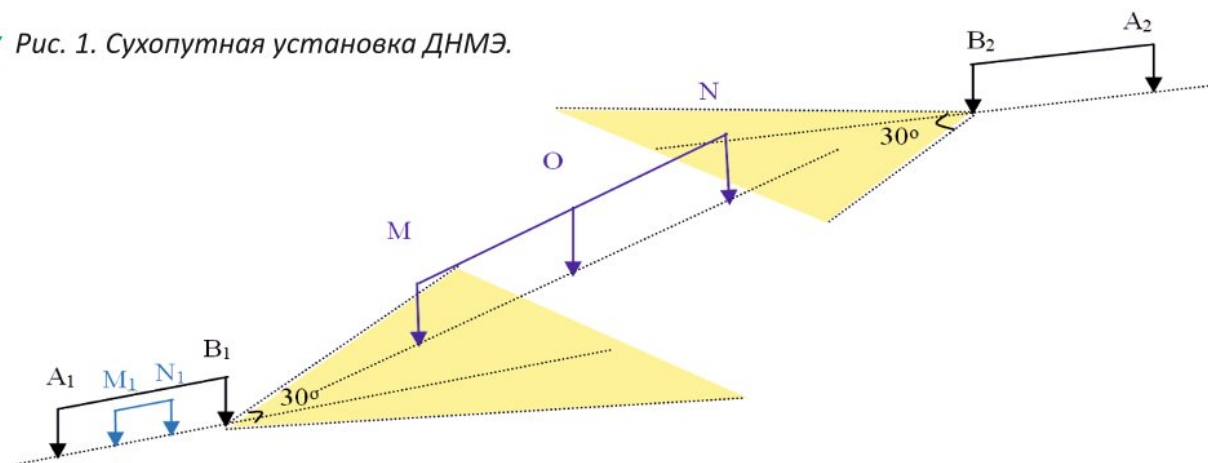
На рис. 1 представлена схема сухопутной установки ДНМЭ. Измерение на суше связано с наличием неоднородностей верхней части разреза (ВЧР), которые сильнее проявляются в измерениях дифференциального канала. Для уменьшения этого влияния измерения выполняются с двумя положениями питающей линии относительно приемной, слева (A_1B_1) и справа (A_2B_2), с последующим осреднением измеренных данных. При полевых работах, зачастую, питающая и приемная линии расположены под углом друг к другу [Агеенков, 2012].

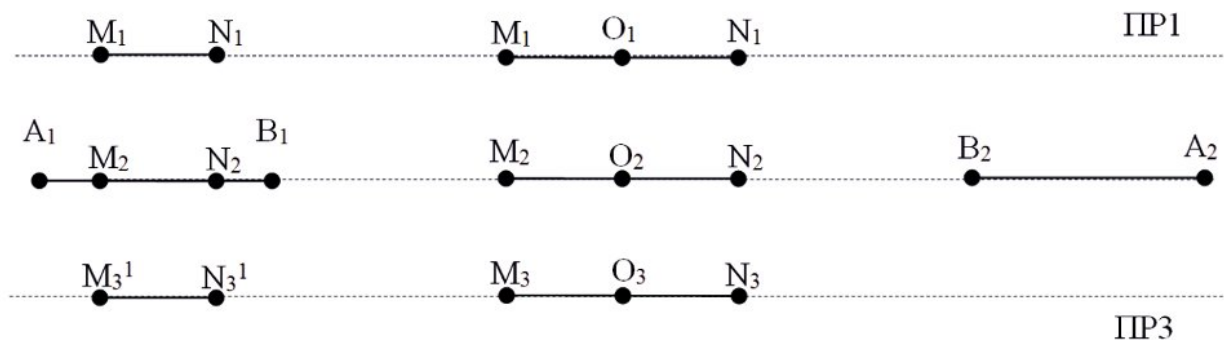
Необходимым условием применения заземлённого источника является хоро-

▼ Табл. 1. Измеряемые, инвертируемые и интерпретируемые параметры.

Вид съёмки	Измеряемые параметры	Инвертируемые параметры – трансформанты	Интерпретируемые параметры
ДНМЭ для поисков УВ в условиях суши	$\Delta U(r)$; $\Delta^2 U$; $\Delta U(t,r)$; $\Delta^2 U(t)$	$DU(t,r)=\Delta U(t,r)/\Delta U(r)$; $D^2U(t)=\Delta^2 U(t)/\Delta U$; $P1(t)=D^2U(t)/DU(t)$; $Ps(t)=(D^2U(t)-\Delta^2 U)/(DU(t)-\Delta U)$; $D\phi(t)=(\partial D^2U(t)/\partial t)/(\partial D^2U(t)/\partial t)-P1(t)$	$\rho(h)$, $\eta(h)$, $\tau(h)$, $c(h)$

▼ Рис. 1. Сухопутная установка ДНМЭ.





▲ Рис. 2. Схема установки ДНМЭ с измерениями на смежных параллельных профилях.

ший контакт питающей линии с землёй – обеспечение заземления источника. За время использования такого источника в различных регионах, климатических условиях и сезонах года были применены разнообразные способы устройства заземления: бурение неглубоких скважин, использование закопанных тросов, использование металлических штырей. Для улучшения контакта заземления могут заливаться рассолом.

Измерительные линии подключаются к латунным электродам, если условия ВЧР позволяют вбивать такие электроды в почву. В холодный сезон при бурении неглубоких скважин заземления питающей линии могут, позднее, быть использованы для подключения измерительных линий.

Для генерации разнополярных импульсов тока с измерительными паузами используется коммутатор КЭР–200, разработанный в ООО «СГНПК». Аппаратура выполнена на основе IGBT модулей, позволяющих вырабатывать импульсы тока с хорошей крутизной спада.

Сухопутные измерения ДНМЭ проводятся по профилям с использованием двух измерительных станций и одной питающей или двух питающих станций и одной измерительной, расположенной между ними и выполняющей записи сначала от одного источника, затем от другого. При необходимости выполнить съёмку по плотной сети параллельных

профилей на площади возможно выполнение одновременной записи на нескольких профилях с использованием многоканальной измерительной аппаратуры. Схема установки ДНМЭ с измерениями на смежных параллельных профилях представлена на рис.2.

Измерительные станции выполнены на основе многоканального (до 6 каналов) геофизического измерителя разности потенциалов (ИРПГ), разработанного и изготовленного совместно ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы». Входная схема аналоговых сигналов реализована так, что каждый второй канал является дифференциальным. Величина входного напряжения ± 4.5 В (при коэффициенте усиления (КУС) равном 1). Реализовано программное управление КУС: входной сигнал может быть увеличен в 2, 4, 8, 16, 64 и 128 раз. Шаг дискретизации при оцифровке сигнала 0.5 или 0.25 мс (2000 или 4000 отсчётов в секунду). Для оцифровки используется 24-х или 32-х разрядные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), а для компенсации изменения потенциала измерительных электродов используется 16 разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Большое входное сопротивление устройства (на постоянном токе не менее 100 МОм) исключает сквозные низкочастотные токи от заземления до входа прибора. Модуль позволяет регистрировать сигнал в большом динамическом диапа-

зоне – 108 дБ или 130 дБ, в зависимости от разрядности АЦП.

Синхронизация генераторной и измерительной станций осуществляется с использованием сигнала спутниковой навигации.

2. Практические примеры использования ДНМЭ на суше (работы в Среднем Поволжье)

Хорошо зарекомендовал себя метод ДНМЭ в Среднем Поволжье в условиях Татарстана. На северо-востоке Республики Татарстан, на Марсовом поднятии в пределах контура положительной аномалии ДНМЭ была пробурена скв. 268, открывшая залежи нефти в турнейских и визейских отложениях. На Дружбинском месторождении также оказалась высокой степень совпадения в плане аномалий ДНМЭ и контура залежи, прогнозируемого по материалам сейсморазведки, что, в совокупности, дало основание считать целесообразным применение этого метода для детализации перспектив крупных, потенциально нефтеносных участков, выделенных по данным комплекса геохимических и геофизических методов [Волков, 2008].

Результаты применения в рассматриваемом районе других методов прямого обнаружения залежей нефти и газа оказались весьма неоднозначными [Там же]. Поэтому комплекс ДНМЭ – сейсморазведка стал рассматриваться в качестве эффективного способа поисков залежей нефти и газа в данном регионе.

3. Работа с клиентами

Подготовка к полевым измерениям проводится совместно с Заказчиком. На основе априорной информации строится ФГМ района работ и проводится численное моделирование сигнала ДНМЭ для различных режимов работы аппаратуры.

После проведения моделирования определяется несколько наборов параметров съёмки и сети наблюдений для решения поставленных задач. Все они предлагаются Заказчику с пояснениями положительных и отрицательных сторон каждого набора.

Совместно с Заказчиком определяются оптимальные параметры съёмки и сети наблюдений.

4. Опыт работы в разных регионах

Эффективность метода ДНМЭ в уменьшении рисков бурения нефтегазопромысловых скважин показала себя во всех НГП РФ, в Китае, на Кубе и Латинской Америке.

Большие объёмы работ ДНМЭ выполнены в Калининградской области, в Восточной и Западной Сибири, Среднем и Нижнем Поволжье, Тимано-Печорском регионе, на Кубани и в Приазовье.

Заключение

Представленная аппаратура, системы наблюдений и в целом методика ДНМЭ разрабатывается коллективом ООО «СГНПК». Некоторые аппаратурные, программные и методические вопросы решаются в сотрудничестве с ведущими научными и производственными организациями РФ.

Многолетний практический опыт показал, что методика ДНМЭ эффективна при решении задачи снижения рисков бурения нефтегазопромысловых скважин для большинства геолого-геофизических условий.

Литература

1. Агеев, В.В. Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш) / В.В. Агеев, Б.С. Светов, А.С. Амиантов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – №2. – С.1–3.
2. Агеев, Е.В. Влияние неосевого расположения приёмной и питающей электродов на результаты измерений // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – №2. – С.4–7.

трических линий на результаты дифференциально-нормированного метода электроразведки / Е.В. Агеенков, Ю.А. Давыденко, В.А. Фомицкий // Геология и геофизика. – 2012. – т.53, №1. – С.150–157.

3. Альпин, Л.М. Дивергентный каротаж / Л.М. Альпин // Прикладная геофизика. – 1962. – Вып.32. – С.192–212.

4. Березкин, В.М. Применение геофизических методов для прямых поисков нефти и газа / В.М. Березкин, М.А. Киричек, А.Н. Кунарев. – М. : Недра, 1978. – 223 с.

5. Волков, Д.С. Особенности и методы изучения геологического строения верхнедевонско-каменноугольных отложений северо-востока Республики Татарстан и поиск органических построек в осевой зоне Камско-Кинельской системы прогибов / Д.С. Волков. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. к. г.-м. н.. – М. : МГУ, 2008. – 26 с.

6. Дмитриев, В.И. Развитие методов электроразведки в Московском Университете / В.И. Дмитриев, П.Ю. Пушкарев, В.К. Хмелевской // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 1. – СПб. : СПбГУ, 2011 – С.12–21.

7. Каменецкий, Ф.М. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды / Ф.М. Каменецкий, Г.М. Тригубович, А.В. Чернышёв. – Мюнхен : Вела Ферлаг, 2014. – 58 с.

8. Кожевников, Н.О. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геофизический журнал. – 2009. – №4. – Т.31. – С.104–118.

9. Комаров, В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации / В.А. Комаров. – Л. : Недра, 1980. – 391 с.

10. Круглова, З.А. Применение метода вызванной поляризации при поисках нефти и газа / З.А. Круглова // Обмен опытом в области геофизических и геохимических поисков залежей нефти и газа. – М. : ВИЭМС, 1975. – с. 110–111.

11. Легейдо, П.Ю. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском своде / П.Ю. Легейдо, М.М.

Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика. – 1990– №4.

12. Легейдо, П.Ю. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов / Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. // Геофизика. – 4 – 1995. – С.42–45.

13. Легейдо, П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике / П.Ю. Легейдо. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н.. – Иркутск. : ИрГТУ, – 1998. – 198 с.

14. Маловичко, А.К. Использование высших производных при обработке к интерпретации геофизических наблюдений / А.К. Маловичко, О.Л. Тарунина. – М. : Недра, 1981. – 188 с.

15. Матвеев, Б.К. Электроразведка / Б.К. Матвеев. – М. : Недра, 1990. – 368 с.

16. Моисеев, В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей / В.С. Моисеев. – Новосибирск : Наука, 2002. – 135 с.

17. Рыхлинский, Н.И. Применение дивергентного каротажа в нефтеразведочных скважинах Восточной Сибири / Н.И. Рыхлинский, М.М. Мандельбаум, В.А. Ващенко, Н.В. Алаев // Состояние и задачи разведочной геофизики. – М. : Недра, 1970. – С. 223–227.

18. Сапужак, Я.С. Высшие производные электрического потенциала в геофизической разведке / Я.С. Сапужак. . – Киев : Наукова думка, 1967. – 154 с.

19. Сапужак, Я.С. Дивергентная электроразведка / Я.С. Сапужак. – Киев: Наукова думка, 1977. – 179 с.

20. Шейнманн, М.С. Современные физические основы теории электроразведки / М.С. Шейнманн. – М. : Недра, 1969. – 224 с.

21. Electrical method for hydrocarbon exploration. Induced polarization (in-depth) method. – Study earth and man. Dallas, Tex. – 1984.

22. Schumacher, D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments / D. Schumacher, M.A. Abrams // Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66. – 1996. – P.71–89.

Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ

- Ситников А.А., Иванов С.А., к.г.-м.н., Жуган П.П., Мальцев С.Х., ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», (ООО «СГНПК»),
- Агеенков Е.В., к.г.-м.н., ООО «СГНПК», Иркутский национальный исследовательский технический университет

Введение

Морские электрометрические исследования были впервые проведены в 1931 г. на Каспии в бухте Ильича около Баку. Эти работы, выполнявшиеся под руководством С.Я. Литвинова и продолжавшиеся до 1937 г., осуществлялись по методике симметричного профилирования с целью картирования выходов коренных пород на дне моря [Морские ..., 1977]. В 1951 г. они были возобновлены на Каспийском море у побережья Азербайджана и Дагестана. В 1954–1959 гг. на основе дипольных установок, предложенных Л.М. Альпным, были разработаны и внедрены методы непрерывных дипольно-осевых зондирования и непрерывного профилирования с повышенной глубиной исследования [Назаренко, 1957]. С 1959 по 1973 гг. электроразведочные работы проводились на Азовском, Каспийском и Чёрном морях. В процессе этих исследований были разработаны основы методики и техники различных модификаций морской электроразведки с искусственными источниками тока: 1) метод непрерывных дипольно-осевых зондирования (НДОЗ); 2) метод непрерывного профилирования (НП); 3) метод зондирования становлением магнитного поля (ЗСМ); 4) метод вызванной поляризации (ВП) [Морские ..., 1977]. При проведении измерений на постоянном токе использовались установки, измерительные и питающие электроды которых размещались на дне (донные установки) [Ваньян, 1956; Терёхин, 1958].

Отличия морской электроразведки от наземной связаны со специфическим влиянием слоя морской воды. При работах в море имеется ряд преимуществ: простые условия заземления, возможность осуществлять непрерывную регистрацию во время движения судна, использовать мощные источники питания и большие измерительные и питающие линии, транспортировка которых не вызывает трудностей. Выдержанность сопротивления первого слоя (морская вода), мощность которого легко определима, спокойная геоэлектрическая обстановка в верхней части разреза упрощают интерпретацию полученных результатов на малых разносах установок. Вместе с тем, хорошо проводящий слой морской воды экранирует нижележащие отложения, а гидродинамические процессы, протекающие в нём, приводят к появлению дополнительных помех [Морские ..., 1977].

Современные представления о физико-геологической модели (ФГМ) нефтегазового месторождения дают основания для использования методов, изучающих ВП на глубинах до 1000 м [Schumacher, 1996; Моисеев, 2002]. ДНМЭ, позволяющий совместно изучать индукционные и поляризационные процессы, зарекомендовал себя при поисках УВ в условиях суши [Легайдо, 1990, 1995, 1998] и был адаптирован для условий акваторий. Основная задача ДНМЭ заключается в выделении аномалий ВП, связанных с

залежами углеводородов, на основании изучения переходного процесса от гальванически заземлённой электрической линии (ГЗЭЛ).

1. Особенности морской технологии ДНМЭ и решаемые задачи

Технология морских ДНМЭ, как и сухопутных, основана на возбуждении индукционных и поляризационных процессов ГЗЭЛ (АВ) и измерении сигнала, вызванного становлением ЭМ поля и релаксацией ВП, в осевой зоне источника трёхэлектродной ГЗЭЛ (МОН). При проведении съёмки на акваториях в технологии ДНМЭ применяется установка с несколькими измерительными линиями, расположенными на разных расстояниях от источника. Такая установка позволяет проводить ЭМ зондирования и зондирования ВП [Агеев, 2006].

Измерения в осевой зоне источника предполагают одинаковый знак поля во время пропускания тока, индукционного переходного процесса и поляризационного релаксационного процесса, вызванного гальваническим током [Моисеев, 2002]. Глубинность распространения гальванического тока, а значит и исследования ВП, можно оценить по расстоянию между центрами источника и приёмника (r) как для дипольной осевой электрической

установки. Эффективная глубина исследования будет составлять $r/2$.

Установка с несколькими разносами позволяет изучать распределение УЭС до глубин 3000 – 4000 м, обнаруживать аномалии ВП на глубинах до 1000 м, выделять из них аномалии, связанные с залежами УВ, а также попутно картировать зоны распространения ММП и газогидратов.

Для увеличения производительности работ измерения ДНМЭ проводятся в движении погружённой в водный слой буксируемой косой [Богданов, 2004; Колесов, 2008; Veeken, 2009a, 2009b]. Статистическое улучшение соотношения сигнал/шум проводится совместной обработкой переходных процессов на некотором интервале линии съёмки, с использованием т.н. пространственного осреднения сигнала. Осреднённые результаты измерений относятся к середине интервала осреднения.

Трёхэлектродные измерительные линии используются для одновременной регистрации разности потенциалов (ΔU) и второй конечной разности потенциалов ($\Delta^2 U$) на нескольких разносах как на постоянном токе (ΔU и $\Delta^2 U$), так и во время переходного процесса ($\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$) (Табл.1). Параметр $\Delta^2 U$ связан с пространственной неоднородностью ЭМ

▼ Табл. 1. Измеряемые, инвертируемые и интерпретируемые параметры для разных видов съёмки.

Вид съёмки	Измеряемые параметры	Инвертируемые параметры – трансформанты	Интерпретируемые параметры
Морской ДНМЭ для поисков УВ и попутного решения инженерно-геологических задач	$\Delta U(r); \Delta^2 U(r);$ $\Delta U(t,r); \Delta^2 U(t,r)$	$DU(t,r)=\Delta U(t,r)/\Delta U(r);$ $D^2U(t,r)=\Delta^2 U(t,r)/\Delta U(r);$ $P1(t,r)=D^2U(t,r)/DU(t,r);$ $Ps(t,r)=(D^2U(t,r)-\Delta^2 U(r))/(DU(t,r)-\Delta U(r));$ $D\phi s(t,r)=(\partial D^2U(t,r)/\partial t)/(\partial DU(t,r)/\partial t)-Ps(t,r)$	$\rho(h), \eta(h), \tau(h),$ $c(h)$
Акваторные НДЭМЗ для ИГР	$\Delta U(r); \Delta U(t,r)$	$\Delta U(r); \Delta U(t,r);$ $\rho_k(r)=k(r)\Delta U(r)/I;$ $\rho_r(r)=k(t,r)\Delta U(t,r)/I$	$\rho(h), \eta(h), \tau(h),$ $c(h)$

поля и позволяет формировать трансформанты ($P1(t,r)$ и $Dfs(t,r)$), эффективно подавляющие индукционную составляющую сигнала переходного процесса в поздней стадии и подчёркивающие информацию о поляризуемости среды.

Использование MON и дифференциального канала в измерительной аппаратуре позволяет подавлять синфазные помехи, одновременно проявляющиеся и на линии МО, и на линии ON, и измерять малые величины второй конечной разности потенциалов $\Delta^2 U$.

Работы проводятся специализированной электроразведочной косой, выполненной из комбинированного кабель-троса, имеющего питающий и измерительный участки. Кабель косы практически не растяжим при нагрузках. Для его изготовления используется специальное синтетическое волокно. Оболочка кабеля характеризуется низким коэффициентом трения о воду и высокой прочностью. Участок питающей линии сделан в виде коаксиального кабеля – внутри медной силовой оплетки проходят проводники приёмной линии. Силовые жилы имеют необходимое сечение для прохождения

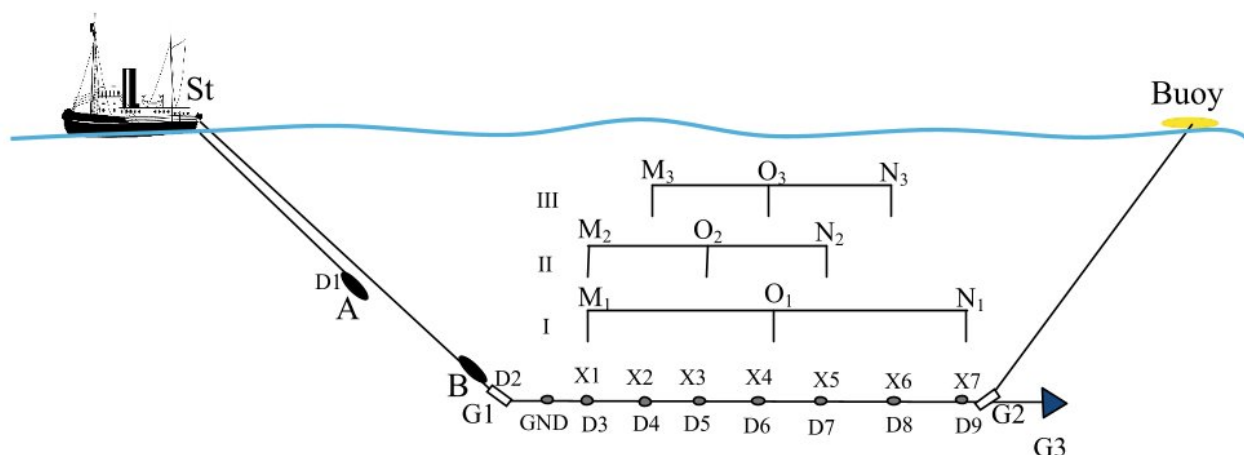
большого тока. Общая длина косы около 2500 м. Длина питающей линии на косе – около 950 м. С целью уменьшения влияния судна на регистрируемый сигнал силовой электрод А выносится за корму не менее чем на 50 м.

Приемные электроды выполнены из неполяризующегося проводника. Длина электрода составляет около 2 м. Разности потенциалов измеряются относительно электрода GND (земля), отнесённого от электрода X1 в сторону кормы примерно на 50 м.

Перед полевыми исследованиями выполняется моделирование, т.е. определяется оптимальная конфигурация косы для ее стабильного движения в водном слое на нужной глубине для получения качественных данных в конкретных физико-геологических условиях.

Коса на участке питающий электрод В – приёмный электрод X7 может быть заглублена до 500 м. Стабилизация косы осуществляется с помощью установленной системы заглубителей и гидродинамических натяжителей. Заглубления линии отображаются в показаниях датчиков глубины, располагающихся в районе

▼ Рис. 1. Описание системы генерации – приёма ЭМ сигнала с тремя измерительными линиями (MON) (I, II, III). Обозначения: St – корма; А, В – питающие электроды; D1 – D9 – датчики глубины; GND – электрод «земля»; X1 – X7 – измерительные электроды; G1 – головной заглубитель, G2 – концевой заглубитель; G3 – гидродинамический натяжитель; Buoy – концевой буй с радио трекером.



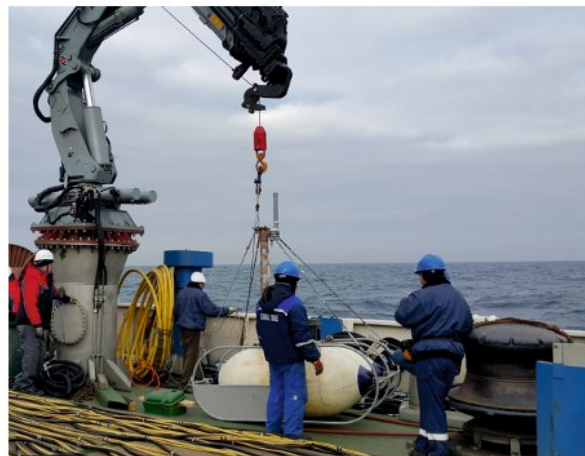
электродов А и В и на измерительной части косы. Она завершается буксировочным участком, на конце которого закреплён буй (Рис. 2), движущийся по поверхности моря. Он частично выполняет функцию стабилизации всей косы, а также несёт на себе радио трекер с приёмником сигнала спутниковой навигации. Это устройство разработано в ООО «СГНПК».

Конструкция косы, наряду с низким сопротивлением заземления и малым дрейфом нуля, обеспечивает подавление шумов, возникающих за счёт движения электрода в толще воды.

Сильно проводящая вода (с УЭС от 0.2 Ом·м до 0.85 Ом·м) позволяет пропускать большой ток и его амплитуда, во многом, определяется мощностью источника электроэнергии и сопротивлением подводящих кабелей к электродам силовой установки. Разнополярные импульсы с измерительной паузой коммутируются тиристорным ключом, разработанным в ООО «СГНПК». При проведении работ ДНМЭ ток в питающей линии достигает 500 А.

Заземления источника тока осуществляются с помощью графитопластовых электродов, выполненных в форме труб. Контакт питающего кабеля, во избежание его электрохимического и температурного разрушения, выполняется внутри труб, где напряженность поля практически равна нулю.

Для одновременной регистрации ЭМ данных на нескольких измерительных линиях используется многоканальный измеритель разности потенциалов геофизический (ИРПГ) с числом каналов от 6 до 18, разработанный и изготовленный совместно ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы». Входная схема аналоговых сигналов реализована так, что каждый второй канал является дифференциальным. Величина входного напряжения ± 4.5



▲ Рис. 2. Спуск концевого буя с радио трекером на воду.

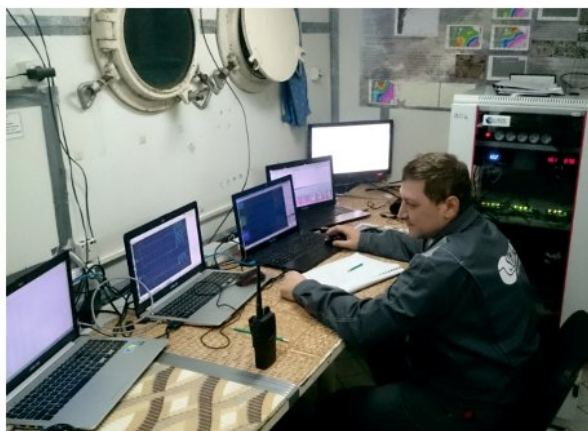
В (при коэффициенте усиления (КУС), равном 1). Реализовано программное управление КУС: входной сигнал может быть увеличен в 2, 4, 8, 16, 64 и 128 раз. Шаг дискретизации при оцифровке сигнала 0.5 мс или 0.25 мс (2000 или 4000 отсчётов в секунду). Для оцифровки используется 24-х или 32-х разрядные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), а для компенсации изменения потенциала измерительных электродов используется 16 разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Входное сопротивление устройства (на постоянном токе не менее 100 МОм) исключает сквозные низкочастотные токи от заземления до входа прибора. Модуль позволяет регистрировать сигнал в большом динамическом диапазоне – 108 или 130 дБ, в зависимости от разрядности АЦП.

Измерения ЭМ сигнала проводятся как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса. Они начинаются в конце токового импульса, за $1/8$ его длительности до момента выключения тока в линии, и продолжаются во время переходного процесса до следующего включения тока. Время импульса и время измерения переходного процесса меняется от 4 до 12 с. При частоте дискретизации 2 или 4 кГц во время одного импульса

и одного переходного процесса выборка значений ЭМ поля по одному каналу составляет от 9000 до 54000 отсчётов АЦП. Такой поток данных записывается на измерительной станции и дублируется на резервном хранилище данных для исключения потери информации в случае возникновения нештатных ситуаций.

Измерения на акваториях в движении связаны с проявлением особого вида ЭМ помех, связанных с волнением моря и движением измерительных электродов в магнитном поле Земли. Различные технические приёмы, использующиеся в ДНМЭ, позволяют уменьшить влияние таких помех. Погружение измерительной части косы вглубь водной толщи значительно уменьшает влияние морских волн, а также снижает воздействие теллурической активности.

Во время съёмки проводится измерение большого количества информации о позиции судна и косы (Рис. 3), а также глубине моря. Эти данные составляют поток т.н. телеметрической информации, которую необходимо собрать, обработать и привязать к ЭМ данным.



▲ Рис. 3. Измерительная лаборатория на судне.

2. НДЭМЗ – электроразведочная технология для АИГР

Акваторные ИГР сопровождают освоение шельфа морей. Для изучения условий

прокладки коммуникаций и исключения случаев аварий при бурении скважин и загрязнения морской среды сейчас активно привлекаются электроразведочные методы.

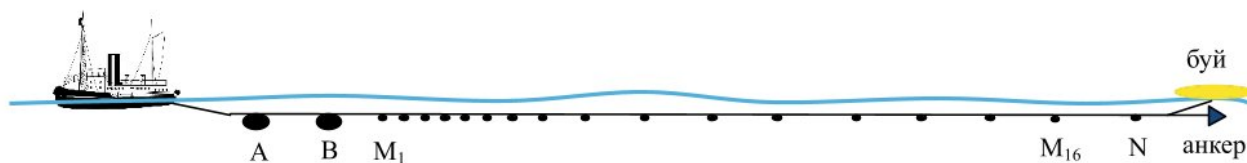
При разработке методики электроразведочных исследований для инженерно-геологических работ ставились задачи горизонтального и вертикального изучения геоэлектрической среды при выполнении следующих принципов: определение кровли и подошвы ММП, выделение области распространения криопэгов, изменения мощности глинистых и песчаных разностей.

- реализация непрерывных измерений в движении;
- оптимизация установки для буксирования судном;
- выбор оптимальных режимов работы питающей и приёмной аппаратуры для решения геологических задач;
- создание достаточного уровня измеряемого сигнала для получения качественного материала.

Основываясь на опыте нефтегазописковых электроразведочных работ с буксируемой косой, была избрана установка с ГЗЭЛ для возбуждения геоэлектрической среды и ряд ГЗЭЛ для одновременной регистрации отклика с различных эффективных глубин, как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса.

Наиболее технологичной установкой, с точки зрения конструкции буксируемой косы, является диполь-дипольная. Такую линию можно изготовить в виде непрерывной косы с выводами электродов, вначале питающих, затем – измерительных. Аналогичные буксируемые косы используются при проведении нефтегазописковых работ ДНМЭ.

Проведение совместных измерений на постоянном токе и во время переходного процесса позволяет изучать распределение УЭС геологической среды, начиная с



▲ Рис. 4. Установка непрерывных дипольных электромагнитных зондирований (НДЭМЗ).

морского дна до глубин 300–500 м. Отклик на постоянном токе хорошо дифференцирует ВЧР по горизонтали и позволяет надёжно определять удельное сопротивление верхнего слоя путём прямых измерений. Он так же позволяет быстро (в реальном времени) получать кривые зондирования на постоянном токе для проведения качественной интерпретации и контроля работоспособности аппаратуры. Сигнал становления проникает под высокоомные покровы до больших глубин. Также в нём проявляются поляризующиеся объекты.

Для измерений используется модульная аппаратура, разработанная ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы», каждый модуль которой позволяет регистрировать сигнал на 4-х каналах. Общее число каналов от 16 до 24. В измерителях применяются 32-х разрядные $\Delta\Sigma$ АЦП.

Большое число выводов измерительных электродов позволяет их коммутировать в различные установки с разными разносами.

Такая установка и измерительная аппаратура позволяют решать ряд инженерно-геологических задач – горизонтальное и вертикальное изучение геоэлектрической среды: определение кровли и подошвы ММП, выделение области распространения криопэгов, изменение мощности глинистых и песчаных разностей.

3. Практические примеры использования ДНМЭ на акваториях (работы на акватории Северного и Среднего Каспия)

Большой объём морских измерений ДНМЭ выполнен на акватории Каспийского моря. Начиная с 2003 г. ООО «СГНПК»

проводит нефтегазопроисковые работы в российском и казахстанском секторе Северного и Среднего Каспия.

Геологоразведочные работы (ГРР) в условиях Северного Каспия связаны со сложными природными и геологическими условиями [Алексеев, 2009].

При подготовке Южно-Ракушечной площади ведущую роль сыграли методы прямого прогноза УВ-насыщения – электроразведочные работы ДНМЭ, прогнозирование коллекторов и УВ-насыщения по технологии AVO-литоскан. Электроразведочные работы с высокой степенью надёжности выявили мощную аномалию, связанную с наличием залежи в юрско-меловых отложениях, а проведенный AVO-анализ позволил охарактеризовать интервал неокосских отложений в районе скважины №2-Ракушечная как обладающий хорошими коллекторскими свойствами и высокими перспективами углеводородного насыщения. В результате испытания скважины максимальный дебит из отложений неокоса на 25 мм штуцере составил более 1000 м³/сут, а извлекаемые запасы нефти составили 215 млн. тонн (C1+C2), а газа - 28 млрд. м³ [Там же].

На основании анализа проведённых работ разработан оптимальный комплекс на поисково-оценочном этапе ГРР, включающий в качестве основных следующие методы: сейсморазведку МОГТ-2Д, электроразведку ДНМЭ, прогнозирование коллекторов и УВ-насыщения по технологии AVO-литоскан, бурение, ГИС, ВСП. В результате применения этого комплекса методов эффективность буре-

ния составила 90% [Там же]. Были подготовлены к бурению структуры со сложными условиями опосредования, а также структуры, где глубина моря превышает 45 м, а предполагаемая глубина скважин более 5000 м.

4. Работа с клиентами

Подготовка к полевым измерениям проводится совместно с Заказчиком. На основе априорной информации строится ФГМ района работ и проводится численное моделирование сигнала ДНМЭ для различных режимов работы аппаратуры.

После проведения моделирования определяется несколько наборов параметров съёмки и сети наблюдений для решения поставленных задач. Все они предлагаются Заказчику с пояснениями положительных и отрицательных сторон каждого набора.

Совместно с Заказчиком определяются оптимальные параметры съёмки и сети наблюдений.

5. Опыт работы в разных регионах

Удобное расположение базы ООО «СГНПК» — в центре самого большого континента и, практически, равное удаление от акваторий его морей и возможность установки оборудования и выполнения работ на судах различного типа — позволяют оперативно проводить полевые работы на водах всех морей РФ и за её пределами.

Эффективность метода ДНМЭ в уменьшении рисков бурения нефтегазопоскоковых скважин была продемонстрирована на акваториях российских и зарубежных морей (казахстанский сектор Каспийского моря, Северное, Норвежское и Баренцево моря, румынский сектор Чёрного моря).

По данным Моргеобанка большая часть электроразведочных работ на акватории российских морей была выпол-

нена по технологии ДНМЭ. В Морском филиале Российского федерального геологического фонда находится 2880 геологических отчетов. Из них только 55 включают данные по электроразведке (<http://marine.rfgf.ru>). Период написания этих отчетов 1963–2014 гг. Начиная с 2002 г. в Морской филиал начинают поступать отчеты по работам ДНМЭ, выполненным сотрудниками компании ООО «СГНПК», созданной в 2003 г. (в 2002 г. коллектив относился к ДГУП «Сибирская геофизическая партия» ГФУГП «Иркутскгеофизика»). Начиная с этого времени, процент отчетов по работам ДНМЭ составляет 74% от общего объема электроразведочных работ. Общий объем работ ДНМЭ в российском секторе за 2002–2016 гг. составляет более 15 000 пог. км.

Заключение

Представленные аппаратура, устройства, системы наблюдений и в целом методика ДНМЭ разработаны коллективом ООО «СГНПК». Некоторые аппаратурные, программные и методические вопросы решаются в сотрудничестве с ведущими научными и производственными организациями РФ.

Многолетний практический опыт показал, что методика ДНМЭ эффективна при решении задачи снижения рисков бурения нефтегазопоскоковых скважин для большинства геолого-геофизических условий на суше и акваториях.

Разрабатываемая аквальная методика НДЭМЗ для АИГР призвана решать задачи исследования геоэлектрического разреза начиная с морского дна до глубин 300–500 м.

Выполняя сухопутные и морские электроразведочные работы для нефтегазовых и изыскательских компаний, ООО «СГНПК» снижает финансовые и экологические риски.

Литература

1. Агеев, В.В. Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш) / В.В. Агеев, Б.С. Светов, А.С. Амиантов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – №2. – С.1–3.
2. Алексеев, А.Г. Оптимизация комплекса геологоразведочных работ на нефть и газ в Северном Каспии / А.Г. Алексеев. Автореф. дисс. на соискание ученой степени к. г.-м. н. – Ростов-на-Дону, 2009. – 26 с.
3. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря / А.Г. Богданов, Г.Ю. Кобзарев, С.В. Делия и др. // Геофизика. – 2004. – №5. – С.38–41.
4. Ваньян Л.Л. О теоретических кривых морского электрического зондирования донной установкой / Л.Л. Ваньян // Прикладная геофизика. – 1956. – Вып. 15. – С.83–90.
5. Колесов, В.В. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы / В.В. Колесов, В.С. Вовк, А.Д. Дзюбло, Е.О. Кудрявцева // Газовая промышленность. – 2008. – №12. – С.66–68.
6. Легейдо, П.Ю. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском свде / П.Ю. Легейдо, М.М. Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика. – 1990–№4.
7. Легейдо, П.Ю. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов / Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. // Геофизика. – 4 – 1995. – С.42–45.
8. Легейдо, П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике / П.Ю. Легейдо. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н.. – Иркутск. : ИрГТУ, – 1998. – 198 с.
9. Моисеев, В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей / В.С. Моисеев. – Новосибирск : Наука, 2002. – 135 с.
10. Морские геофизические исследования / Я.П. Маловицкий, А.А. Ггельганц, Л.И. Коган и др. – М. : Недра, – 1977. – 375 с.
11. Назаренко, О.В. Методика непрерывных морских электрических зондирований / О.В. Назаренко // Геология нефти и газа. – 1957. – №8. – С. 40–45.
12. Терёхин, Е.И. Теоретические основы электрического зондирования с установкой, погружённой в воду / Е.И. Терёхин // Прикладная геофизика. – 1958. – Вып. 18. – С.78–102.
13. Schumacher, D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments / D. Schumacher, M.A. Abrams // Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66. – 1996. – P.71–89.
14. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E. and Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components / P. Veeken, P. Legeydo, I. Pesterev et al // First break. – 2009 – Vol. 27, December. – P.53–64.
15. Veeken, P. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration / P. Veeken, P. Legeydo, Y. Davidenko // Geophysics – 2009. – 74. – P.47–59.

Спектральные измерения ВП горных пород в естественном залегании с использованием высокоточной аппаратуры

■ Зорин Н.И., ООО «Северо-Запад», Москва

■ Мариненко В.А., Институт геофизических исследований МЭ РК, Курчатов, Казахстан

Введение

Метод вызванной поляризации (ВП) широко применяется при поиске вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд, а также при решении ряда инженерных, археологических, экологических и других задач геофизики [Комаров, 1980]. Попытки классификации аномалий ВП по частотным характеристикам предпринимались достаточно давно [VanVoorhisetal., 1973; Peltonetal., 1978], но развитие методики долгие годы сдерживалось из-за недостаточной точности и стабильности аппаратуры [Измерение ..., 1990]. В настоящее время вопрос технических возможностей полевой электроразведки также сохраняет свою актуальность в связи с все возрастающим интересом исследователей к измерению спектральных характеристик вызванной поляризации [Kemnaetal., 2012; Куликов и др., 2013; Zorin, 2015; Гурин и др., 2015; Куликов, Соловьева, 2016].

Важно отметить, что возникающие в большинстве горных пород вторичные токи вызванной поляризации примерно на порядок слабее первичных токов, связанных с работой внешнего источника поля. Таким образом, точность измерения отклика поляризуемой горной породы на пропускание через нее электрического тока, необходимая для изучения спектральных характеристик ВП, должна быть как минимум на два порядка выше точности, достаточной для определения величины удельного сопротивления этой же породы. В результате, к техническим параметрам электроразведочной аппаратуры, применяемой при работе методом спектральной вызванной поляриза-

ции (СВП), предъявляются самые высокие требования. В первую очередь, это относится к полевой аппаратуре, используемой для изучения погребенных поляризуемых тел в естественном залегании, когда приходится работать с большими установками и малыми сигналами, а также нередко в условиях значительного влияния промышленных, теллурических, индукционных и других помех.

Дифференциально-фазовые измерения ВП

Измерения методом ВП могут проводиться как во временной, так и в частотной области. При этом полученные результаты являются по сути эквивалентными, поскольку при достаточном количестве данных могут быть формально переведены друг в друга с помощью известных соотношений [Shuey, Johnson, 1973]. Однако сам процесс измерения обладает рядом особенностей и в каждом случае имеет свои плюсы и минусы. Так, например, работа во временной области обычно более производительна, но менее устойчива к влиянию сторонних помех. В свою очередь, измерения в частотной области позволяют проводить узкополосную фильтрацию, а также вносить поправки за изменение параметров канала с помощью калибровки, что значительно увеличивает помехоустойчивость метода. При этом, однако, для полноценной обработки сигнала необходима регистрация не менее 10-20 периодов на каждой из частот, что в некоторых случаях может заметно понизить производительность работ. Таким

образом, в наиболее благоприятных условиях - т.е. при работе с небольшими установками, хорошими заземлениями, при отсутствии значительных сторонних помех, а также при обязательном использовании специальных «неполяризующихся» электродов – изучение характеристик ВП удобнее проводить во временной области; в противном случае более рациональными оказываются частотные измерения.

Существует два подхода к измерениям эффекта вызванной поляризации в частотной области – фазовый и амплитудный. В первом случае изучаемым параметром является фаза измеряемого сигнала $\varphi(\omega)$, во втором случае – его амплитуда $|p(\omega)|$, вместе представляющие собой две вещественных характеристики одной и той же комплексной функции $p(\omega)$, описывающей эффективное сопротивление поляризуемой среды

$$p(\omega) = |p(\omega)| \cdot e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1)$$

Можно показать, что кривая $\varphi(\omega)$ представляет собой сглаженную производную от кривой $|p(\omega)|$ на билогарифмическом бланке [Zonge et al., 1972; Zorin, 2015], поэтому эти два параметра также являются эквивалентными друг другу и на практике обычно рассматривают лишь один из них. Поскольку измерение амплитуды гармонического сигнала не требует синхронизации между генератором и измерителем, то на заре развития частотной модификации метода ВП в основном использовались амплитудные параметры вызванной поляризации [Van Voorhis et al., 1973]. Однако в 1970-е годы в Советском Союзе был разработан (и реализован в аппаратуре ИНФАЗ-ВП и ВПФ) специальный метод измерения эффекта вызванной поляризации, не только не требующий синхронизации

между источником и приемником поля, но и обладающий значительно большей помехоустойчивостью по сравнению с обычными фазовыми или амплитудными измерениями [Куликов, Шемякин, 1978]. В качестве основной рассматриваемой величины в данной методике используется дифференциальный фазовый параметр (ДФП) $\Delta\varphi$, определяемый следующим образом

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi(\omega_1)\omega_2 - \varphi(\omega_2)\omega_1}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (2)$$

Обычно в качестве двух частот ω_1 и ω_2 используется первая и третья гармоники сигнала формы «разнополярный меандр» (РПИ-1). Из формулы (2) следует, что ДФП полностью подавляет прямо пропорциональные частоте фазовые сдвиги, которые нередко присутствуют в измеряемом сигнале в связи с искажающим влиянием некоторых аппаратурных помех, а также емкостных и индукционных эффектов в области малых параметров поля. В результате, на практике параметр $\Delta\varphi$ определяется значительно более устойчиво, чем φ . При этом важно понимать, что кривые ДФП и фазы ВП совпадают только когда последняя достаточно медленно меняется с частотой. В противном случае они могут заметно различаться (хотя на качественном уровне все равно останутся похожими), что необходимо учитывать при использовании аналитических моделей ВП для количественной интерпретации полученных результатов [Zorin, 2014].

Аппаратура

Измерение эффекта ВП с помощью дифференциального фазового параметра реализовано, например, в приборе ЭИН-209М (Институт геофизических исследований МЭ РК), МЭРИ-24 (ООО «Северо-Запад») и других высокочастотных

одноканальных измерителях, давно и успешно зарекомендовавших себя в полевой электроразведке. Однако, в отличие от стандартной работы на одной-двух частотах, полноценные спектральные измерения вызванной поляризации могут занимать достаточно долгое время (значительно превышающее время раскладки приемной линии), поэтому для работ методом СВП намного удобнее использовать многоканальную приемную аппаратуру, такую как ВПФ-8К-М или ИМВП-8 (Табл. 1).

Восьмиканальный измеритель ВПФ-8К-М (Институт геофизических исследований МЭ РК) предназначен для работ методами сопротивлений и вызванной поляризации как во временной области (дискретные измерения импульсных параметров или непрерывная запись), так и в частотной (гармонический анализ). Важной особенностью прибора является повышенная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что в сочетании с аналоговой фильтрацией (фильтры 4 порядка),

▼ Табл. 1. Многоканальная приемная аппаратура для метода СВП.

		
Название	ВПФ-8К-М	ИМВП-8
Производитель	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ООО «Северо-Запад», г. Москва, Россия
Количество каналов	8 каналов	8 каналов
Разрядность АЦП	31 разряд	24 разряда
Частота следования отсчетов АЦП	2500 Гц	2500 Гц
Рабочий диапазон частот	0.019 – 9.76 Гц	0.001 – 100 Гц
Дрейф установки частот	не более $2 \cdot 10^{-6}$	не более $5 \cdot 10^{-6}$
Макс. ампл. входного сигнала	5 В	2.5 В
Мин. ампл. измеряемого сигнала	0.1 мкВ	10 мкВ
Погрешность изм. напряжения	0,2 %	0,2 %
Погрешность измерения ДФП	0,02°	0,02°
Входное сопротивление	10 МОм	не менее 5 МОм
Объем встроенной памяти	16 Гб	отсутствует
Емкость встроенного аккумулятора	3000 мА·ч	отсутствует
Питание от внешнего источника	12.6±2 В	12.6±2 В
Интерфейс для связи с компьютером	USB	USB, Wi-Fi (в разработке)
Масса	3.6 кг	0.8 кг
Габариты	27x25x18 см	19x15x6 см

цифровой фильтрацией и встроенными алгоритмами статистической обработки позволяет превзойти известные аналоги по минимальному уровню измеряемых сигналов (от 0.1 мкВ)

Регистратор ИМВП-8 (ООО «Северо-Запад») представляет собой объединенные в одном небольшом корпусе восемь гальванически развязанных электрических каналов, каждый из которых оборудован

▼ Табл. 2. Генераторы электрического тока для метода СВП.

				
Название	Астра-100	ГЭР-65	ГЭР-1000	ГЭР-5000
Производитель	ООО «Северо-Запад», г. Москва, Россия	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан
Макс. выходная мощность	100 Вт	65 Вт	1000 Вт	5000 Вт
Макс. выходной ток	1 А	1.5 А	15 А	25 А
Макс. выходное напряжение	400 В	500 В	1000 В	1000 В
Форма выходного тока	меандр (РПИ-1)	меандр (РПИ-1), меандр с паузой	меандр (РПИ-1), меандр с паузой	меандр (РПИ-1), меандр с паузой
Рабочий диапазон частот	0.08 – 2500 Гц	0.01 – 625 Гц	0.01 – 625 Гц	0.01 – 625 Гц
Относительн. погрешность формирования частот	не более $5 \cdot 10^{-6}$	не более 10^{-5}	не более $3 \cdot 10^{-6}$	не более $2.5 \cdot 10^{-6}$
Нестабильность выходных токов	не более 0.1 %	не более 0.1 %	не более 0.1 %	не более 0.1 %
Питание от внешнего источника	12,6±2 В аккумулятор	12,6±2 В аккумулятор	220±20 В, 50±2 Гц однофазный источник	220±20 В, 50±2 Гц трехфазный источник
Масса	2 кг	3.3 кг	19 кг	32 кг
Габариты	20x18x12 см	27x25x18 см	50x25x36 см	64x28x39 см

дован своим АЦП с частотой дискретизации в 2500 Гц, достаточной для решения большинства задач метода СВП. Визуализация и запись данных происходит с помощью ноутбука, что значительно облегчает контроль качества принимаемого сигнала в полевых условиях. В свою очередь, регистрация непосредственно временных рядов позволяет проводить более сложную обработку данных с использованием специальных алгоритмов подавления помех [Pankratov, Geraskin, 2010], реализованных в программе Octopus Pro (ООО «Северо-Запад»). Среди важных преимуществ указанной программы следует выделить также возможность автоматической разметки частот произвольного свип-сигнала, пакетной обработки данных, учета геометрии установки (для метода сопротивлений) и др.

Для реализации высоких потенциальных возможностей приведенных выше приемников электрического поля необходимо, чтобы ток в питающей линии АВ был стабильным во времени, не изменялся при изменении сопротивления заземления питающих электродов и напряжения питания и т.д. В таблице 2 приведены сведения о некоторых электроразведочных генераторах, способных обеспечить необходимую стабильность формы тока в питающей линии, а также обладающих достаточно большим набором частот для проведения работ методом СВП.

Полевое тестирование

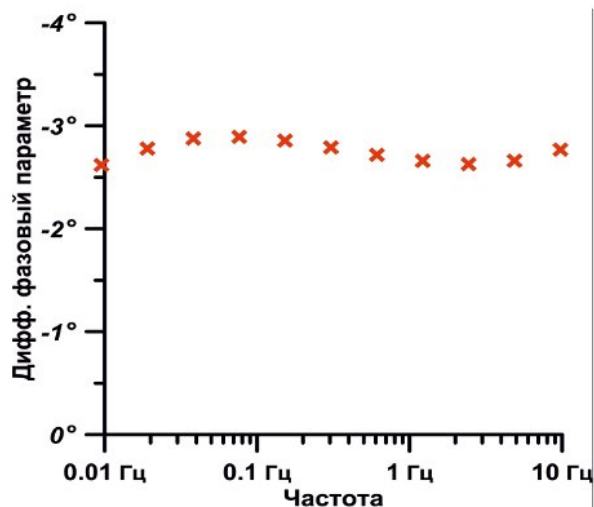
Для решения большинства инженерно-геологических задач, а также при исследовании спектральных характеристик вызванной поляризации неглубоко залегающих (первые десятки метров) горных пород, наиболее удобно использовать легкие портативные генераторы,

такие как Астра-100 и ГЭР-65 (Табл. 2). Однако целью настоящей работы было исследование возможностей современной аппаратуры при работе методом СВП на больших глубинах (от 100 м и более), поэтому для проведения полевых испытаний был выбран наиболее мощный генератор ГЭР-5000 в паре с многоканальным регистратором ИМВП-8.

Экспериментальные полевые работы проводились в южной части Горного Алтая (Восточный Казахстан), в районе с большим количеством значительных (2–3 градуса) аномалий фазы ВП, связанных с развитием сульфидных, магнетитовых, полиметаллических и других оруденений. В качестве основной использовалась установка срединного градиента ($AB = 1500$ м, $MN = 40$ м), сила тока – 2 А; питающая линия заземлялась в грунт с помощью группы стальных электродов, приемная – обычными слабополяризующимися металлическими электродами (латунь).

Для первых тестовых записей был выбран участок, наиболее благоприятный с точки зрения качества данных – удаленный от населенных пунктов и прочих источников промышленных помех, с относительно хорошими условиями заземления, но при этом с достаточно высокими значениями среднего удельного сопротивления пород разреза (более 1 кОм·м), что гарантировало высокий уровень полезного сигнала в приемной линии при минимальном искажающем влиянии индукционных помех. Проведение непрерывных измерений на одном месте в течение длительного времени (более 1 часа) показали исключительно высокую повторяемость результатов. В частности, разброс значений дифференциального фазового параметра на каждом из восьми каналов и во всем используемом диапазоне

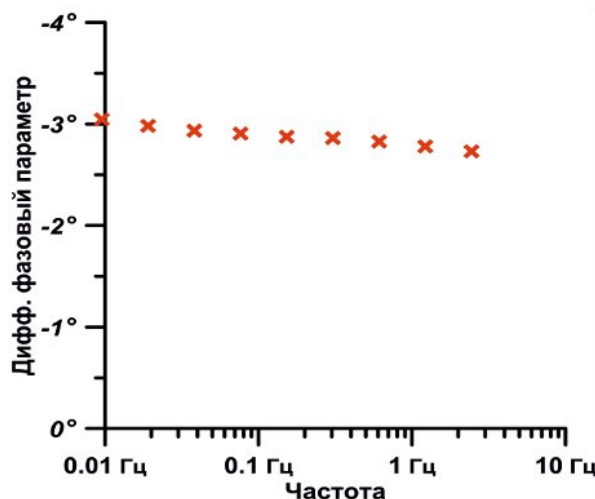
частот (от 0.01 Гц до 10 Гц) не превысил 0.01° , что, на наш взгляд, позволяет смело отнести результат указанных измерений к разряду самых высокоточных полевых данных, когда-либо полученных методом СВП. Пример такой кривой, зарегистрированной над наиболее интенсивной локальной аномалией вызванной поляризации, приведен на Рис. 1.



▲ Рис. 1. Данные СВП, полученные на первом этапе полевых испытаний.

Второй этап экспериментальных работ подразумевал проверку возможностей аппаратуры в более тяжелых условиях, для чего измерительная установка была разложена прямо под действующей линией электропередач в районе развития сильно углефицированных пород. Крайне низкое удельное сопротивление разреза (в среднем – порядка 10 Ом·м) привело к тому, что амплитуда полезного сигнала упала ниже 1 мВ при токе 2А, а индукционные искажения оказались критическими уже начиная с частоты 0.15 (!) Гц. Для минимизации индукционных эффектов было принято решение использовать ортогональную установку (приемная линия расположена перпендикулярно линии АВ на расстоянии порядка 0.5 км от ближайшего питающего электрода), что позволило получить неискажен-

ную кривую ДФП вплоть до первых герц (Рис. 2).



▲ Рис. 2. Данные СВП, полученные на втором этапе полевых испытаний.

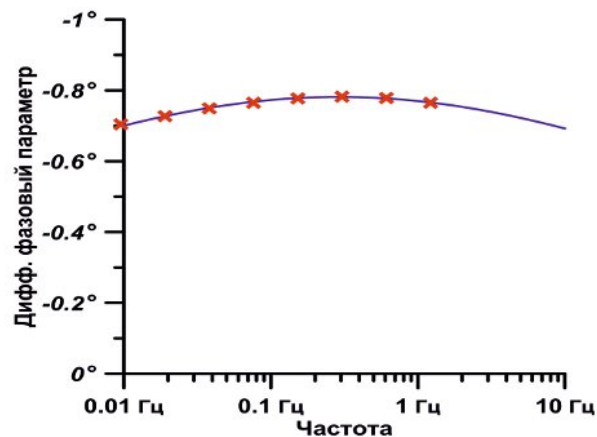
Несмотря на низкий уровень полезного сигнала и значительное влияние сторонних помех (амплитуда промышленных наводок в приемных линиях достигала 1 мВ) точность полученных данных оказалась достаточно высокой. В частности, как видно из Рис. 2, она позволяет непосредственно по полученной кривой ДФП утверждать, что максимум интенсивности эффекта ВП лежит далеко за пределами измеренного частотного диапазона – на периодах в несколько сотен или даже тысяч секунд, что вполне характерно для графитизированных сланцев и других углефицированных пород [Peltonetal., 1978].

На другой день, другим оператором, другим комплектом измерительной аппаратуры, другим генератором и с другой силой тока были проведены контрольные измерения. Данные измерения, проведенные в соответствии с максимально жесткими из возможных требований, предусмотренных в действующей инструкции по электроразведке [Инструкция..., 1984], показали невязку значений дифференциального фазового параметра менее 0.05° .

Практическое применение

В качестве примера применения рассматриваемой аппаратуры для решения практических задач электроразведки можно привести результаты измерения спектральных характеристик ВП пород тульского и бобриковского горизонтов нижнего карбона в районе учебной базы геофизических практик «Александровка» (Калужская область, Россия) геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [Электроразведка..., 2005]. Указанные горизонты представлены преимущественно песчано-глинистыми отложениями со значительной (до 10%) рассеянной пиритизацией и, повсеместно залегая на глубинах в среднем от 40-60 м до 80-140 м, представляют собой наиболее интенсивный источник аномалий ВП в данном районе [Куликов и др., 2016]. Исходя из приведенных оценок глубины целевого объекта, для спектральных измерений ВП было решено использовать установку срединного градиента с питающей линией АВ = 640 м, заземленной с помощью двух шнековых электродов (забуренных в землю еще два десятилетия назад для проведения работ методом частотного зондирования в рамках студенческих практик). Для возбуждения электрического поля использовался генератор ГЭР-5000, обеспечивший стабилизированный ток амплитудой 5 А в питающий линии. Измерение сигнала проводилось с помощью многоканального регистратора ИМВП-8.

Поскольку на данном разноразном влиянии приповерхностных поляризуемых тел на регистрируемый сигнал пренебрежимо мало и наблюдаемый эффект ВП можно полностью связать с целевым объектом, то измеренные кривые подбирались непосредственно с помощью модели Cole-Cole (Рис. 3).



▲ Рис. 3. Полевые измерения СВП (крестики) и подобранная модельная кривая (сплошная линия)

$$\rho_{CC}(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta \frac{(i\omega\tau)^C}{1 + (i\omega\tau)^C} \right), \quad (3)$$

где η — асимптотическое значение поляризуемости, C — показатель степени, ρ_0 — сопротивление среды на постоянном токе, и τ — постоянная времени [Peltonetal., 1978]. Результаты подбора по всем точкам измерения позволили получить следующие оценки параметров ВП:

$$\eta = 0.15 \div 0.17, C = 0.19 \div 0.20, \tau = 0.1 \div 0.2 \text{ сек}$$

Заметим, что полученные параметры формально являются кажущимися (так как целевой поляризуемый объект представляет собой не однородное полупространство, а субгоризонтальный слой конечной мощности), в результате чего приведенная оценка η должна быть несколько заниженной. Однако кажущиеся параметры C и τ в таких случаях незначительно отличаются от истинных [Song, Vozoff, 1985] и вследствие этого могут рассматриваться как характерные для терригенных пород тульского и бобриковского горизонтов нижнего карбона в данном районе. В свою очередь, знание априорных спектральных характеристик ВП тех или иных горных пород значительно повышает

устойчивость решения обратной задачи метода СВП при наличии нескольких поляризуемых объектов в разрезе.

Заключение

В настоящей работе рассматриваются возможности современной высокоточной аппаратуры при изучении спектральных характеристик вызванной поляризации погребенных горных пород в естественном залегании. Проведенные полевые эксперименты наглядно показывают, что даже при использовании больших разносов и при наличии значительного влияния сторонних помех точность данных, полученных с помощью представленной в статье аппаратуры, оказывается достаточной не только для качественного разделения аномалий ВП от тел различной геологической природы, но и для их использования в программах количественной интерпретации.

Благодарность

Данная работа выполнена при поддержке гранта МОН РК 1757/ГФ4, а также компании ООО «Северо-Запад».

Литература

1. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Использование дебаевской декомпозиции для анализа данных профилирования методом вызванной поляризации (золото-серебряное месторождение Джультетта, Магаданская обл.) // Геология и Геофизика. 2015. Т. 56. № 12. С. 2222 – 2239.
2. Измерение электрических и магнитных полей с электроразведочной аппаратурой ЭИН-204 при поисках рудных месторождений. Научн. ред. Сарбаш В.Ф. Алма-Ата: НПО «Рудгеофизика», 1990. – 225 с.
3. Инструкция по электроразведке. Под ред. Г.С. Франтова. Л.: Недра, 1984. – 534 с.
4. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. – 391 с.
5. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. – 157 с.

6. Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжеева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // Геофизика. 2013. № 6. С. 23–31.
7. Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Алексеев А.С., Зайцев С.В., Соловьева А.В., Шустов Н.Л. Строение крупной миоценовой палеодолины в Калужской области по результатам комплексных электроразведочных работ // Инженерные Изыскания. 2016. № 13. С. 26 – 36.
8. Куликов В.А., Соловьева А.В. Результаты измерений методом спектральной вызванной поляризации (СВП) на слабоконтрастных магнитных аномалиях // Разведка и Охрана Недр. 2016. № 3. С. 26 – 31.
9. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина и А.Г. Яковлева. М.: 2005. – 311 с.
10. Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams K.H., Orozco A.F., Haegel F.H., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications // Near Surface Geophysics. 2012. V. 10. № 6. P. 453 – 468.
11. Pankratov O.V., Geraskin A.I. On processing of controlled-source electromagnetic data // Geologica Acta. 2010. V. 8. № 1. P. 31 – 49.
12. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. V. 43. P. 588 – 609.
13. Shuey R.T., Johnson M. On the phenomenology of electrical relaxation in rocks // Geophysics. 1973. V. 38. P. 37 – 48.
14. Song L., Vozoff K. The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media of different intrinsic properties // Geophysical Prospecting. 1985. V. 33. P. 1029 – 1062.
15. Van Voorhis G.D., Nelson P.H., Drake T.L. Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization // Geophysics. 1973. V. 38. P. 49 – 60.
16. Zonge K.L., Sauck W.A., Sumner J.S. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization // Geophysical Prospecting. 1972. V. 20. P. 626 – 648.
17. Zorin N. On application of differential phase parameter in spectral IP // Proceedings of 3rd International Workshop on Induced Polarization. 2014. Oleron Island, France.
18. Zorin N. Spectral induced polarization of low and moderately polarizable buried objects // Geophysics. 2015. V. 80. № 5. P. E267 – E276.

Применение электротомографии при изучении курганов центральной курганной группы гнездовского археологического комплекса

- Рыжков В.И. , Белоусов А.В. , Сергеев К.С., Горин А.Д. , РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г.Москва
- Новиков В.В. , Историко-археологический центр «Гардарика», г.Москва
- Каинов С. Ю., Государственный исторический музей, г.Москва

Введение

Гнездовский археологический комплекс – крупнейший памятник эпохи образования древнерусского государства X века, расположенный на обоих берегах реки Днепр в 12 км от современного г. Смоленска на трансъевропейском торговом пути «из варяг в греки». Памятник состоит из двух городищ, двух известных селищ и крупнейшего могильника X в. в Европе, который насчитывал около 4500 курганов [2].

С 2013 года лаборатория инженерной геофизики кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина совместно с Государственным Историческим Музеем проводит исследования на территории гнездовского комплекса методами малоглубинной геофизики. В состав методов входит сейсморазведка, электроразведка, магниторазведка и геодезия. Результаты исследований передаются археологам перед проведением раскопок для выбора наиболее интересных и перспективных участков и оптимизации полевых работ.

В ходе полевого сезона 2015 года были исследованы курганы, относящиеся к северной части Центральной курганной группы – одной из 8 курганных групп памятника. Вначале была создана цифровая модель рельефа местности, а затем проводились электротомографические исследования по сетке радиальных профилей.

В сумме были детально изучены три курганные насыпи, две из которых (Ц-352,

Ц-353) стали впоследствии объектом комплексных археологических исследований [1]. Результаты раскопок позволяют провести прямое сопоставление косвенных геофизических данных с фактическим состоянием объектов исследований. Таким образом, возможно «откалибровать» результаты электротомографии (ЭТ) по археологическим разрезам для дальнейших исследований на подобных курганных группах древнего Смоленска.

Методика работ

Изучение структуры курганных насыпей основывалось на данных ЭТ [4] и топогеодезических работ. Изначально предполагалось провести также магнитометрическую съемку, которая по информативности для археологии занимает первое место среди всех геофизических методов [5], но практически это оказалось невозможным из-за большого числа металлических конструкций и современного мусора вблизи насыпей и непосредственно на их поверхности.

Геодезические работы. Непосредственно перед проведением полевых работ площадка расположения курганов была полностью очищена от мелких деревьев и кустарника. Каждый курган имеет кольцевой ровик и просадку верхней кромки (это связано с обрядом захоронения), которые со временем «заплывают» молодыми породами и растительностью. Поэтому в первую очередь были сняты их границы при помощи спутниковой геодезической

GNSS-системы. Далее на участке проведения работ была создана регулярная сеть радиальных профилей, по которым шагом 0.25 метра выполнена съемка рельефа тахеометром. Таким образом, была воссоздана цифровая модель дневной поверхности. Дополнительно было сделано несколько аэрофотоснимков при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (рис. 1).

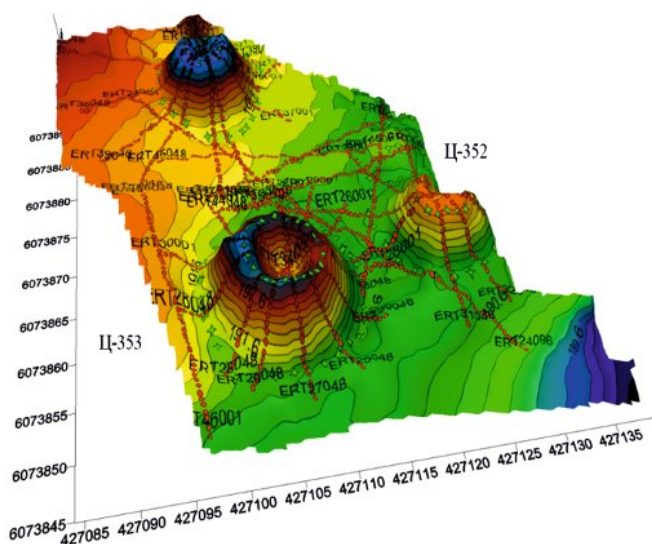
Результатом геодезических работ стала

цифровая модель рельефа местности, которая изображена на рис. 2.

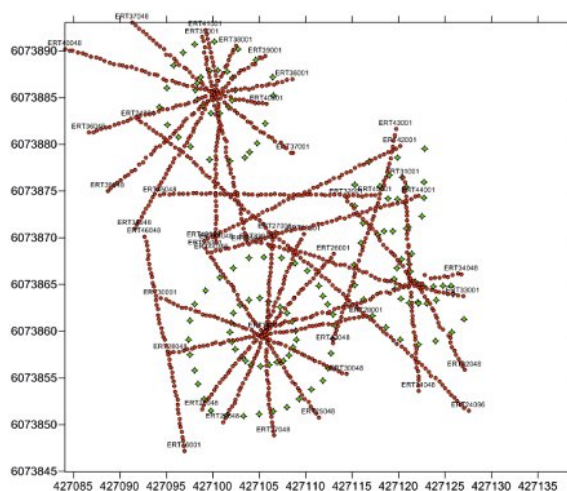
Геофизические работы. Для изучения строения вмещающего разреза между курганными насыпями были размечены дополнительные ЭТ-профили. Схема расположения профилей и курганных насыпей приведена на рис. 3. С помощью такой системы наблюдений возможно выделение археологических аномалий на фоне вмещающего разреза.



▲ Рис. 1. Аэрофотоснимок курганный группы.



▲ Рис. 2. 3D модель рельефа. Точками показаны пункты геофизических наблюдений.



▲ Рис. 3. Схема расположения профилей (красные точки – пункты геофизических наблюдений; зеленые точки – границы курганных насыпей и зон просадок рельефа).

При проведении работ применялась многоканальная многоэлектродная аппаратура SYSCAL Pro Switch-72.

Шаг между электродами был выбран от 0.25 до 0.5 метра, в активно расстановке применялось от 48 до 96 электродов. Расстановка с данными параметрами обеспечивала детальное изучение строения самих курганов и изучение пространства между ними.

Для измерений использовались два типа установок: 4-х электродная Шлюмберже (AMNB) и комбинированная 3-х электродная (AMN+MNB). Это позволяет детально изучить как приповерхностные аномалии, так и глубинные.

Результатом электроразведочных работ стала 3D-модель удельных электрических сопротивлений (УЭС) по профилям (рис. 4). Пример разреза УЭС представлен на рис. 5.

Итоги работ и интерпретация

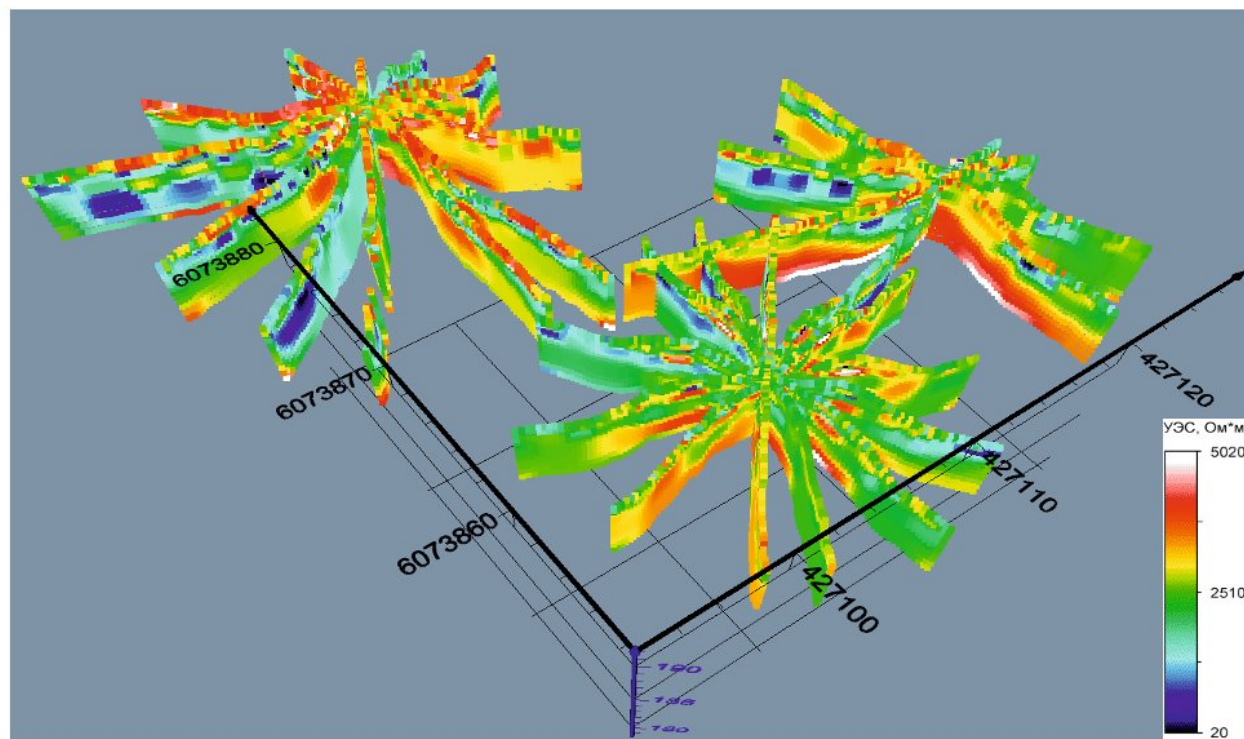
Как следует из модели УЭС, вмещающий разрез представлен, главным обра-

зом, переслаиванием пород с сопротивлениями от 100 до 2000 Ом*м, что соответствует супесями и песками. Такое строение первых метров верхней части разреза (ВЧР) характерно для пойменной части реки Днепр в Смоленской области.

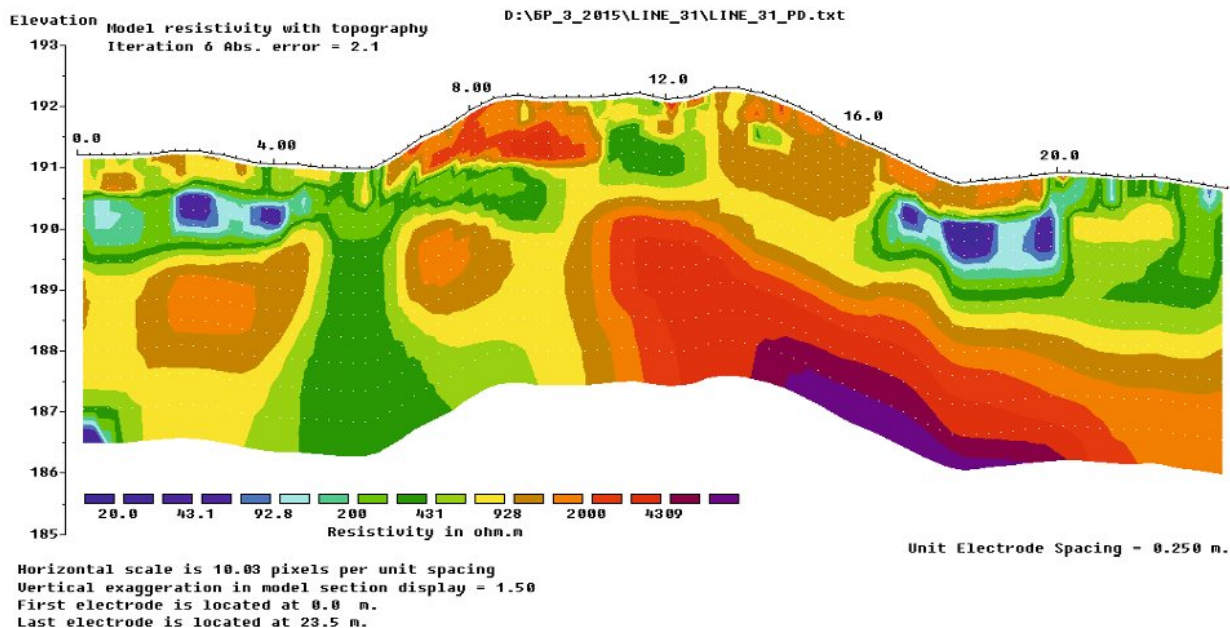
Проанализируем в качестве примера один из разрезов УЭС по профилю, проходящему через курган Ц-352 (рис. 5).

Данные топогеодезических работ, анализ аэрофотосъемки 1940-х гг. и внешний осмотр курганной насыпи указывал на то, что курганы Ц-352 и Ц-353, вероятно, были исследованы в XIX – начале XX вв. Курганы имеют следы раскопок в виде колодца в центральной части насыпи. Кроме того, северо-восточный сектор кургана Ц-352 был полностью уничтожен в ходе современной антропогенной деятельности (поврежден современным кладбищем). Высота кургана около 1.5 – 2 метров, диаметр 12 – 15 м.

На разрезе выделяются зоны пониженного сопротивления в районе пикетов 2–4



▲ Рис. 4. 3D-модель УЭС.



▲ Рис. 5. Разрез удельных сопротивлений по профилю, проходящему через курган Ц-352.

и 16–20 метров (около 100 Ом*м, отмечены красным пунктиром), которые относятся к кольцевому ровику, окаймляющему курган и заполненному оплывшей курганной насыпью. Как правило, понижение УЭС на археологических объектах является одним из признаков нарушения естественного залегания горных пород, что в свою очередь приводит к уменьшению уплотнения породы и способствует скоплению излишней влаги.

В теле насыпи на пикетах 10–13 метров видна аномалия с сопротивлениями порядка 300 – 400 Ом*м (отмечена голубым пунктиром), которая связана с археологическими раскопками «колодец» в XIX – начале XX вв.[3]. Поскольку данный раскоп заполнен переотложенными песками и супесями, его сопротивление выше, чем у ровика.

Северная часть профиля кургана имеет высокое сопротивление (отмечено зеленым пунктиром), что обусловлено появлением в разрезе камней и крупной гальки (мергель), которые, среди прочего, являлись основной для формирования насыпи кургана. Преимущественно крупнообломочный материал имеет магматический генезис.

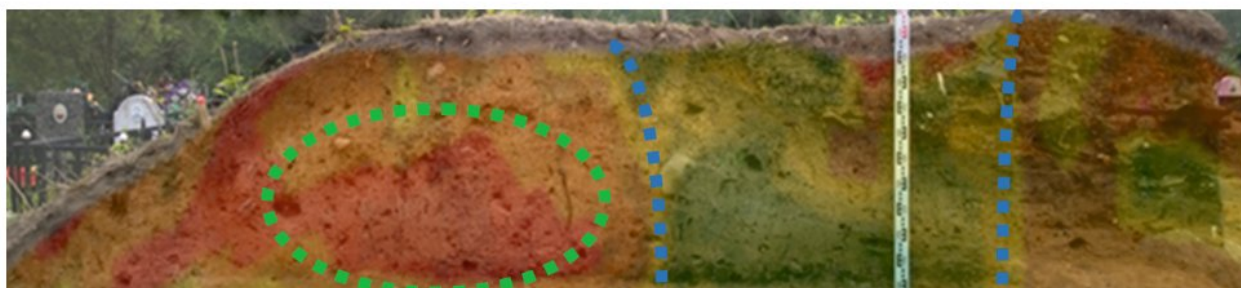
Глубина от дневной поверхности до «материка» – площадки, на которой была возведена курганная насыпь, по данным ЭТ, составляет около 1 метра. В момент сооружения высота курганной насыпи могла достигать около 1,3 м. За долгое время насыпь кургана подверглась естественному разрушению формы под действием выветривания и суффозии. А вершина насыпи была срезана в процессе раскопок в XIX – XX вв.

На рис. 6 представлена фотография северной части археологического профиля С-Ю, проходящего через курган Ц-352, который соответствует пикетам 7–12 на разрезе УЭС.

Совмещенное изображение разреза УЭС и раскопа приведено на рис. 7. В центральной части голубым пунктиром выделена зона нарушения XIX – XX вв. виде колодца, которые дошли до уровня площадки, где сооружалась насыпь. Темно-синим пунктиром выделена зона, где в теле насыпи кургана присутствует значительное количество камней. Зоны ровика кургана, перекрытого оплывшей со временем курганной насыпью, выделены красным пунктиром.



▲ Рис. 6. Фото северной части профиля С-Ю кургана Ц-352.



▲ Рис. 7. Совмещенное изображение фотографии раскопа и профиля УЭС.

Выводы

Методы малоглубинной геофизики и геодезии способны дать общее представление о строении кургана, дать информацию о типе погребального обряда (трупосожжение или трупоположение в яме или камере), определить месторасположение отдельных аномалий (археологических объектов), а также определить возможные повреждения.

Глубинность метода ЭТ (3–7 метра при коротких расстановках в 12–24 метра с 48 электродами), в целом, больше области археологических интересов. Картирование мелких объектов с помощью ЭТ, представляющих археологическую ценность, затруднено. Порог выделения аномалий – их размеры, сопоставимые с шагом электродов по профилю – 0.25–0.5

м. Для индивидуальных находок небольшого размера выполненных из металла (монеты, мелкая пластика, бытовые предметы и т.д.) наиболее подходящим является магниторазведка.

Для проведения более однозначной и детальной интерпретации результатов необходимо комплексировать данные ЭТ с результатами иных методов разведочной геофизики.

Основным применением метода ЭТ в археологии, как показывают наши исследования, может являться возможность до начала этапа земляных работ определить наиболее перспективные участки для исследования, выявить зоны нарушений, связанные с современным техногенным и антропогенным воздействием. Например, применение ЭТ может позволить

зафиксировать динамику изменения русла реки Днепр и определить границы культурного слоя непо потревоженного современной хозяйственной деятельностью в пойменной части Центрального поселения.

Литература

1. Новиков В.В. Дневник занятого археолога [Электронный ресурс]. URL: <http://gnezdovo.blogspot.ru/> (дата обращения: 01.03.2017).

2. Пушкина Т.А., Мурашева В.В., Ениосова Н.В. Гнездовский археологический комплекс // Русь в IX - X вв. Археологическая панорама / отв. ред. Н. А. Макаров. Ин-т археологии РАН. Москва; Вологда: Древности Севера. 2012. С. 242–274.

3. Сизов В.И. Курганы Смоленской губернии // Материалы по археологии России, издаваемые археологической комиссией. №28. Выпуск 1-й. Гнездовский могильник близ Смоленска. Санкт-Петербург. 1902. URL: http://www.library.chersonesos.org/showtome.php?tome_code=247§ion_code=7 (дата обращения: 01.03.2017).

4. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. №2. С.14-17.

5. Смекалова Т.Н., Восс О., Мельников А.В. Магнитная разведка в археологии. 12 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. политехн. ун-та. 2007.

Подробнее об авторах



Рыжков
Валерий Иванович

заведующий кафедрой
разведочной геофизики
РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина,
д.т.н.



Белоусов
Александр Валерьевич

доцент кафедры разведочной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, к.т.н.



Сергеев
Константин Сергеевич

ведущий инженер
кафедры разведочной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина



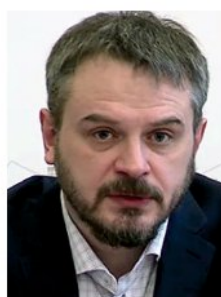
Горин
Алексей Дмитриевич

инженер кафедры разведочной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина



Новиков
Василий Васильевич

председатель правления АНО "Историко-археологический центр "Гардарика", к.и.н.



Каинов
Сергей Юрьевич

старший научный сотрудник отдела археологии Государственного исторического музея

Методы и системы инженерной геофизики, применяемые при изысканиях в районах развития многолетнемерзлых пород

■ Бучарский Б.В., Бондаренко Д.Н., Горячев В.В., Савельев Д.М., ООО «Ингеоком, г. Саратов

При выполнении инженерных изысканий в зимний период и в районах развития многолетнемерзлых толщ (республика Саха-Якутия) для получения дополнительной оперативной информации о строении верхнего интервала изучаемых разрезов используют бесконтактные геофизические исследования. Бесконтактные методы и системы, используемые в инженерной геофизике, основаны на современных методиках, аппаратных средствах и технологиях, развиваемых и создаваемых для дистанционного изучения электрических и скоростных характеристик слоистых разрезов.

Основной задачей геофизических исследований на стадии проектной документации по объектам обследования подъездных автодорог к месторождениям полезных ископаемых в районах развития многолетнемерзлых толщ является определение рельефа поверхности дисперсных, скальных пород и мощности перекрывающих их насыпных грунтов. Геофизические исследования на стадии рабочей документации выполняются с целью получения дополнительных материалов и данных для оценки инженерно-геологических условий. В задачу геофизических исследований входит:

определение глубины подошвы насыпных грунтов, выявление аномальных неоднородностей разреза в подстилающих грунтах.

При инженерных изысканиях в зимний период и в районах развития многолетнемерзлых толщ районах применяются следующие методы: электроразведка методом вертикального электроразведывания (ВЭЗ) в бесконтактной модификации (БЭЗ), метод георадиолокационного обследования (георадиолокационное профилирование), сейсморазведка МПВ.

Электроразведка

Электроразведка ВЭЗ в модификации бесконтактной технологии (БЭЗ) применяется в условиях развития с поверхности скальных и многолетнемерзлых пород (ММП). Для выполнения работ используется аппаратура «ERA-MAX», с рабочей частотой 4.88 Гц. При работе методом БЭЗ для обеспечения глубины исследований до 20 м используется экспресс-установка (линия АВ длиной 54 м, с закрепленной линией MN=1 м). Действующие значения разносов линии АО: 1.4; 2.0; 2.7; 3.7; 5.2; 7.2; 10; 14; 20; 27. Всего 10 разносов. Шаг между установками БЭЗ по профилю ~ 200 м.

► Рис. 1. Подъездная автодорога к месторождению.



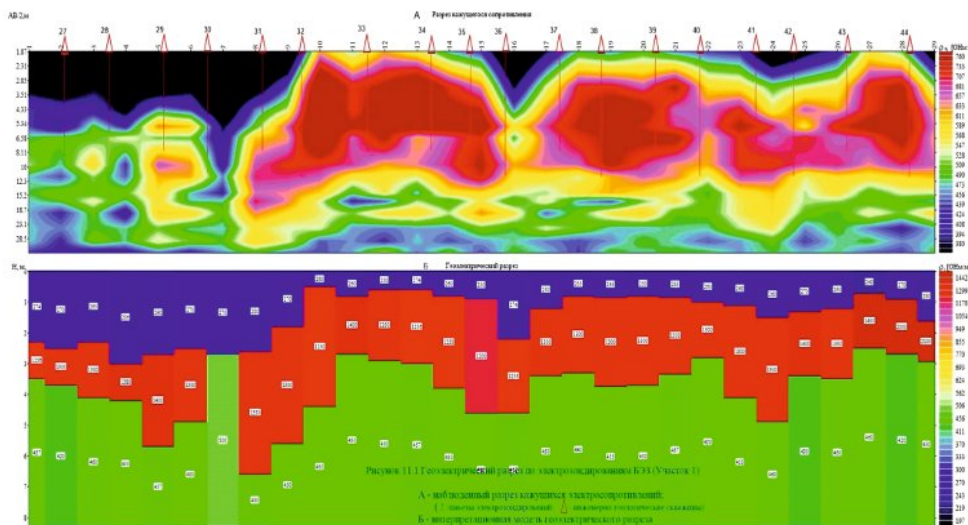


Рис. 2. Пример геоэлектрического разреза по профилю подъездной автодороги (Результаты электроразведки БЭЗ).

Обработка полевых записей электроразведки БЭЗ выполняется по программе «PI2WIN» с трансформацией в параметры электрического сопротивления и построением геоэлектрических разрезов наблюдаемых кажущихся значений электрического сопротивления и интерпретационной геоэлектрической модели (рис.1).

Георадиолокация

Георадиолокационное профилирование выполняется с помощью георадара «ОКО-2» с антенным блоком 250 МГц, с шагом наблюдений по профилю - 10 см. Управление, регистрация и запись георадарограмм производится на ПК планшетного типа. Количество накоплений определяется в процессе опытных работ на объекте.

Метод георадиолокационного профилирования заключается в излучении импульсов электромагнитных волн в исследуемую среду и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев, имеющих различные электрофизические свойства.

Основная задача, решаемая методом георадиолокационного профилирования, определение положения границ раздела сред или объектов в зондируемых средах. Модель изучаемой среды представляется

в виде слоистой толщи с постоянными электрофизическими свойствами каждого слоя и наличием локальных и протяженных объектов, отличающихся по электрофизическим свойствам от вмещающей среды.

Результатом георадиолокационного исследования является георадиолокационный профиль или радарограмма – массив амплитуд отраженных сигналов с дополнительной информацией по каждому шагу зондирования, записанный в файл и визуализируемый в виде вертикального разреза исследуемой среды.

Георадиолокационное профилирование выполняется по профилю оси автодорог с учетом прохождения георадара через инженерно-геологические скважины, размещенные в пределах полотна отсыпки.

Технология и режимы регистрации определяются перед началом производственных работ в ходе проведения опытно-методических исследований. Технология полевой методики и регистрации реализуется с учетом зимних климатических условий (низкие отрицательные температуры). Антенный блок георадара буксируется по профилю автодороги на жесткой сцепке спецавтотранспортом со скоростью пешехода.



▲ Рис. 3. Технология георадарного профилирования при обследовании подъездной автодороги.

Регистрация радарограмм выполняется в непрерывном режиме в отапливаемом салоне технологического транспорта. Накопление зондирующих импульсов 8-16. Привязка георадарных профилей осуществляется к пикетажу автодороги. Длина георадарных профилей ~ 1000 м.



▲ Рис. 4. Наблюдаемая на ПК радарограмма по георадиолокационному профилю подъездной автодороги.

Сейсморазведка (МПВ)

Сейсмозондирования методом преломленных волн (МПВ) выполняется по профилям подъездных автодорог, дамб гидротехнических сооружений (ГТС), хвостов, хранилищ промстоков для решения задач выделения аномалий скоростных неоднородностей, обусловленных

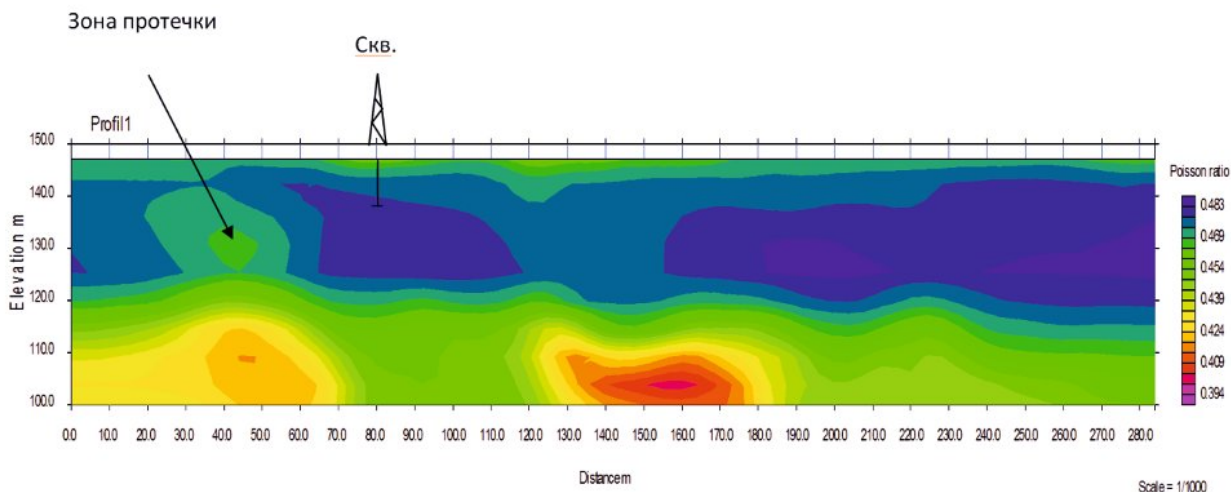
изменением литологического состава, физико-механических характеристик пород, зонами протечки плотин и дамб. Профили точечных зондирований располагаются по гребню плотин, дамб. При выполнении работ МПВ используются блоки системы бескабельной телеметрической сейсморегистрирующей «SCOUT» (СБТС), (разработка СКБ СП, г. Саратов). На профиле по оси дамбы отрабатываются расстановки, на каждой из которых располагаются по 24 канала (БСД) с шагом между пунктами приема 2-5 м. Длина одной расстановки составляет 92 м. Возбуждение упругих колебаний производится с использованием ударного источника (кувалда) сейсмических колебаний в пределах расстановки с шагом 8 метров между пунктами возбуждения (ПВ) и с отработкой выносных ПВ на удалении от флангов в 18-24 метра.



▲ Рис. 5. Фото 4 Технология сейсмозондирования МПВ на дамбе хранилища промстоков.

На каждом ПВ выполняется последовательно возбуждение продольных и поперечных волн. Для регистрации этих типов волн используются сейсмоприемники, ориентированные вертикально и горизонтально. На каждом ПВ проводится запись сейсмограмм продольных и поперечных волн.

Длина записи, шаг дискретизации, усиление подбираются в ходе опытных работ. Число накоплений устанавливается



▲ Рис. 6. Вертикальная карта значений коэффициента Пуассона по разрезу дамбы.

опытным путем по достижению уверенной корреляции волн в первых вступлениях. В обработку передаются файлы сейсмограмм в формате «sgy».

На рис. 2 представлена вертикальная карта значений коэффициента Пуассона, полученная по результатам профильного сейсмозондирования дамбы. На карте выделена локальная зона пониженных значений коэффициента Пуассона, которая отражает скоростную неоднородность, обусловленную сменой литологического состава (песчаная линза в толще суглинков).

Рассмотренные выше геофизические методики и системы, успешно применяются при решении инженерно-геологических задач в районах развития многолетнемерзлых толщ и в периоды сезонного промерзания верхней части разреза, обеспечивают оперативное получение необходимой информации о физико-механических характеристиках грунтов. Результативные геофизические разрезы дополняют инженерно-геологические разрезы изучаемых линейных объектов на междускважинных участках.

Количественные оценки качества сейсмического материала на различных этапах обработки

- Абизгильдин Р.И., ЗАО НПЦ «ГеоСейсКонтроль»; МГУ., г.Москва
- Белоусов А.В., ЗАО НПЦ «ГеоСейсКонтроль»; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г.Москва

Введение

В процессе проведения полевых работ на территории России достаточно давно используется система получения оконных количественных оценок качества полевого сейсмического материала, основанная на выделении на полевых сейсмограммах зон преобладания определенного типа энергии (сигнал, помеха, микросейсмический шум и др.) [1]. Критерием для признания материала качественным служит превышение порогового значения по совокупности оценок, признанных значимыми для исследуемой площади. Несмотря на наличие критики и необходимости учета и рассмотрения неметодических (нетехнологических) факторов в структуре оценки качества, указанные оценки представляются наиболее объективной возможностью оперативного получения информации в полевых условиях.

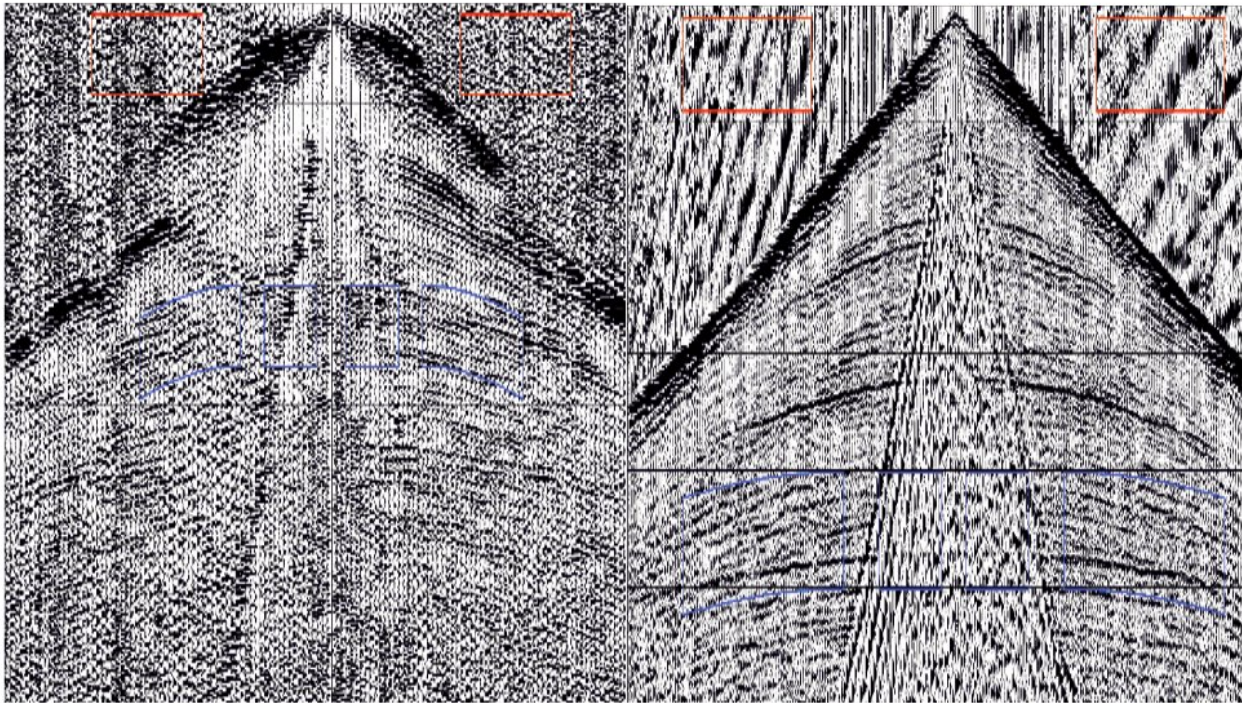
В то же время, отдельный и особый интерес представляют вопросы контроля обработки сейсмического материала. Достаточно большие проблемы в данном вопросе вызваны необратимым изменением амплитудно-частотных свойств записи в целом и оконного интервала в частности в ходе воздействия любой процедуры сигнальной обработки, направленной на шумоподавление и восстановление качественного изображения земной среды.

В связи с отсутствием единого принятого количественного подхода к оценке качества обработки материалов нами предпринята попытка проанализировать применимость полевых оценок к обраба-

тываемому материалу, фактически – анализ изменения полевых оценок в ходе обработки.

Описание эксперимента

Для анализа оконных оценок было выбрано два профиля – с относительно плохим (профиль 1) и с хорошим (профиль 2) исходным качеством материала при достаточно изменчивом рельефе. Необходимо оговориться, что для сохранения корректности проводимого сравнения в обрабатываемый материал введены только высокочастотные статические поправки, связанные с плавающим уровнем приведения. Рассчитаны оконные оценки на исходных данных и на данных после ключевых процедур обработки, таких как полосовая фильтрация, частотно-зависимое медианное шумоподавление, поверхностно-согласованная деконволюция и коррекция амплитуд и др. Кроме того, выполнено сравнение амплитудно-частотных характеристик записи после потрассных и поверхностно-согласованных процедур. Окна для оценки амплитудно-частотных свойств записи были выбраны в областях преобладания отраженных волн, поверхностных волн и микросейсм (рисунок 1). В зоне преобладания отраженных волн они повторяют форму годографа с заданной скоростью по результатам скоростного анализа. Диапазон удалений для обоих профилей 1000 – 2000 м. Временной интервал анализа для первого профиля – 1200 – 1400 мс, для второго профиля – 2000 – 2400 мс.



▲ Рис. 1. Пример выбора окон анализа для профиля 1 (сейсмограмма слева) и для профиля 2 (сейсмограмма справа). Сейсмограммы отображены с использованием АРУ в окне 400 мс.

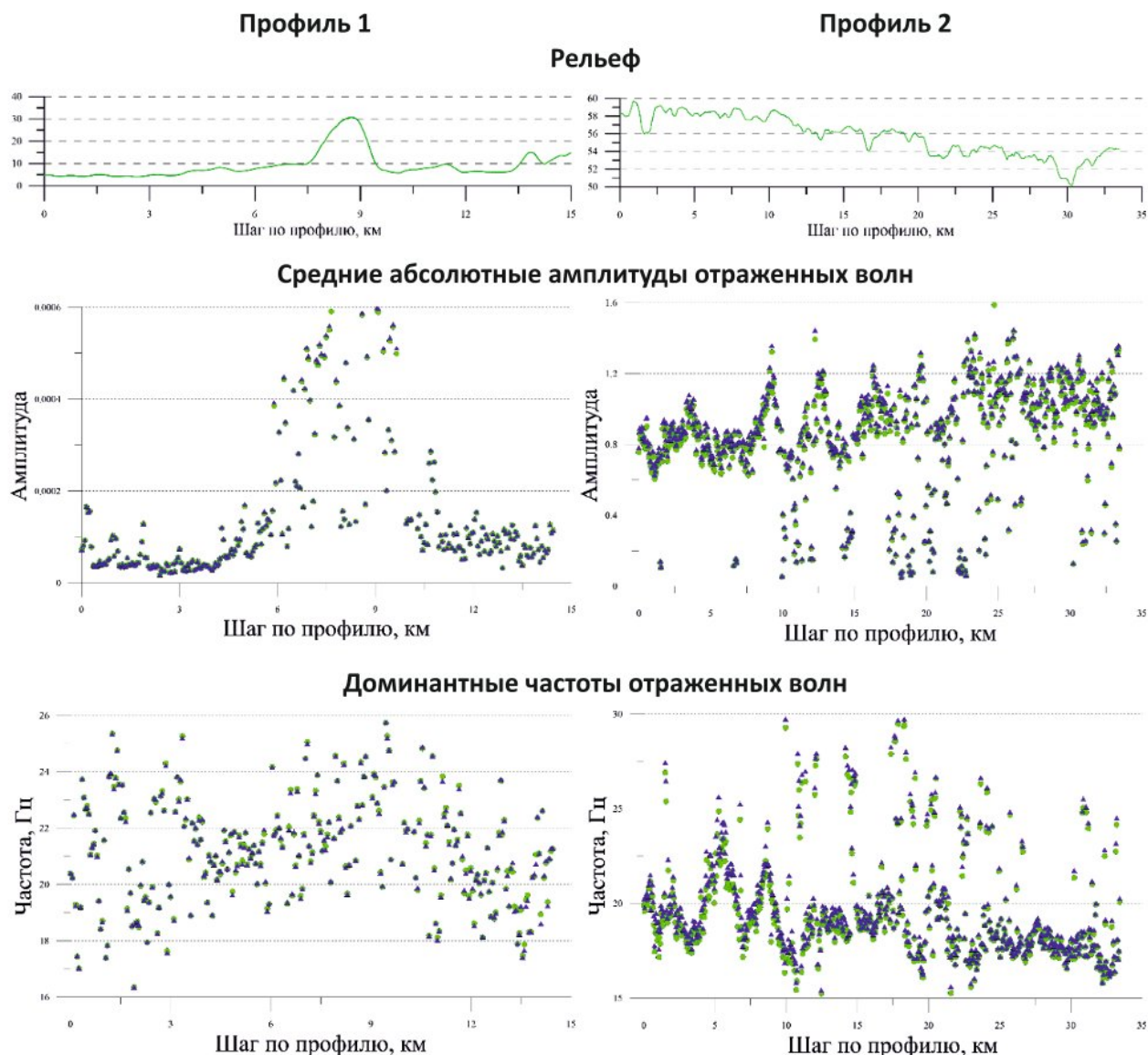
Оконные оценки являются интегральными суммами нескольких факторов, один из которых – структурный [2]. В процессе обработки важно максимально сохранить его выраженность в амплитудно-частотных свойствах записи, при этом исключив все остальные факторы. В связи с этим после каждого этапа обработки сейсмических данных выполнялось построение графиков средних абсолютных амплитуд и доминантных частот вдоль профиля, рассчитанных в области преобладания отраженных волн. Процедуры обработки подбирались таким образом, чтобы в целом сохранить распределение амплитуд и частот по профилю.

Влияние статических поправок на оконные оценки

В районах с изменчивым рельефом и неоднородным строением ВЧР статические поправки могут существенным образом изменить распределение амплитуд и частот, рассчитанных в окне. Это связано с

тем, что большие временные сдвиги трасс изменяют соотношение колебательных процессов в окне, изменяя тем самым и оконные атрибуты. В связи с этим были рассчитаны статические поправки за рельеф для плавающего и фиксированного уровней приведения.

На рисунке 2 представлены графики рассчитанных атрибутов по профилям, на которых показаны оконные оценки на данных без статики и с введенной статикой за рельеф для фиксированного уровня. Так как статика за плавающий уровень приведения позволяет учесть аномалии, связанные с резкими колебаниями рельефа, то существенного влияния на оконные оценки она не оказывает. Полная статика за рельеф, в зависимости от выбранного уровня приведения и скорости замещения, оказывает заметное влияние на рассчитанные атрибуты, в основном уменьшая средние абсолютные амплитуды без изменения распределения. При этом, распределение доминантных частот несколько меняется в зависимости от



▲ Рис. 2. Графики атрибутов по профилям до (●) и после (▲) ввода полной статики за рельеф.

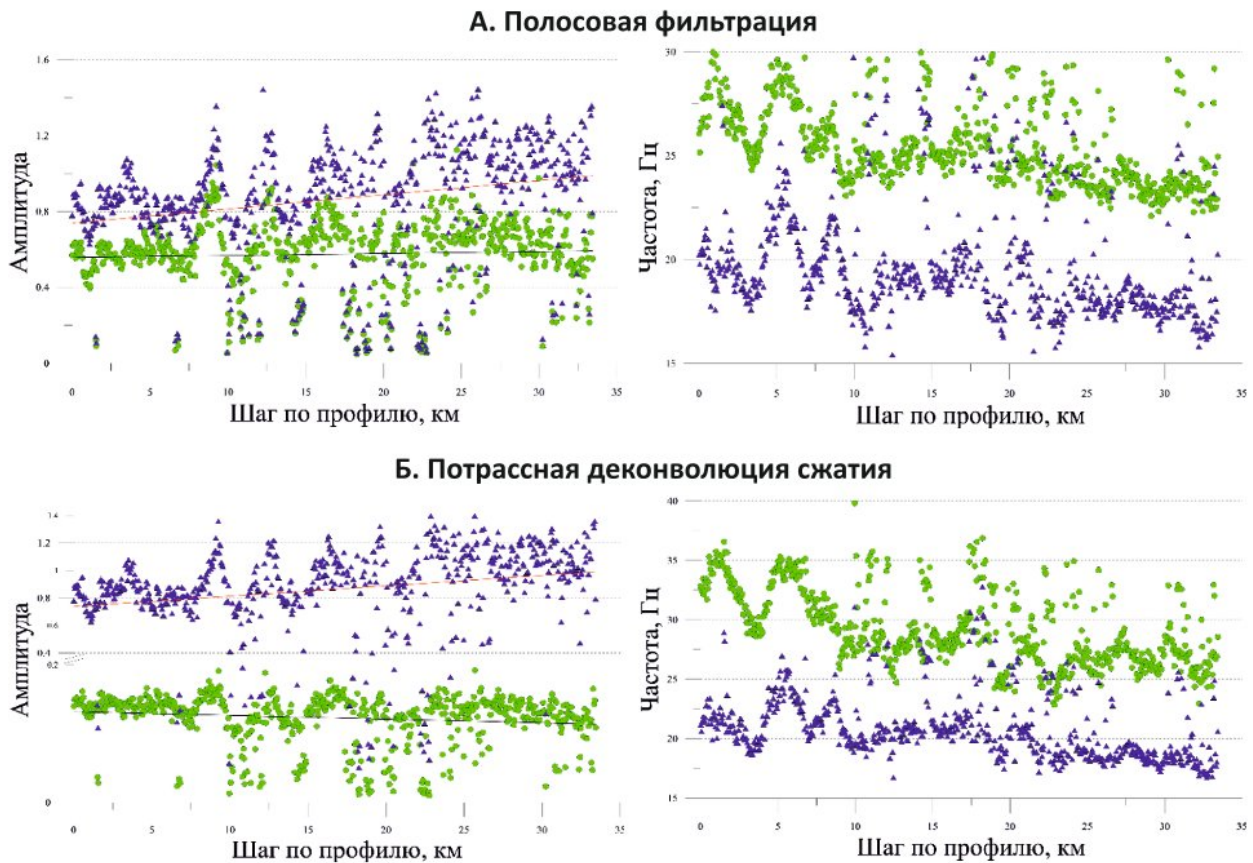
величины сдвига трассы, так как меняется соотношение полезного сигнала и шума в окне.

Влияние потрассных процедур на оконные оценки

В процессе обработки особое внимание стоит уделять контролю потрассных процедур, если они используются в основном графе, так как их аппарат не предполагает разложения на факторы и их учета. Поэтому возможно существенное искажение амплитудно-частотных свойств записи. В связи с этим были выполнены оцен-

ки на данных после полосовой фильтрации и потрассной деконволюции сжатия.

На рисунке 3а представлены графики средних абсолютных амплитуд и доминантных частот в окне до и после полосовой фильтрации 15-20-60-80 Гц по профилю 2. Видно, что распределение частот вдоль профиля меняется незначительно — увеличивается центральная частота и количество высокочастотных отскоков при сохранении общего тренда. При этом общий тренд амплитуд незначительно изменяется при сохранении локальных особенностей.



▲ Рис. 3. Графики атрибутов по профилю 2 до (●) и после (▲) процедур обработки. Красным цветом показана линия тренда для исходных данных, черным – для данных после применения процедуры.

На рисунке 3б представлены графики средних абсолютных амплитуд и доминантных частот в окне до и после потрассной деконволюции сжатия по профилю 2. Длина оператора 240 мс, уровень белого шума 1%. В связи с расширением спектра после деконволюции увеличиваются доминантные частоты в окне. Однако существенно изменяется поведение амплитуд вдоль профиля: линия тренда для данных после деконволюции меняет наклон на противоположный. При этом все локальные особенности сохраняются.

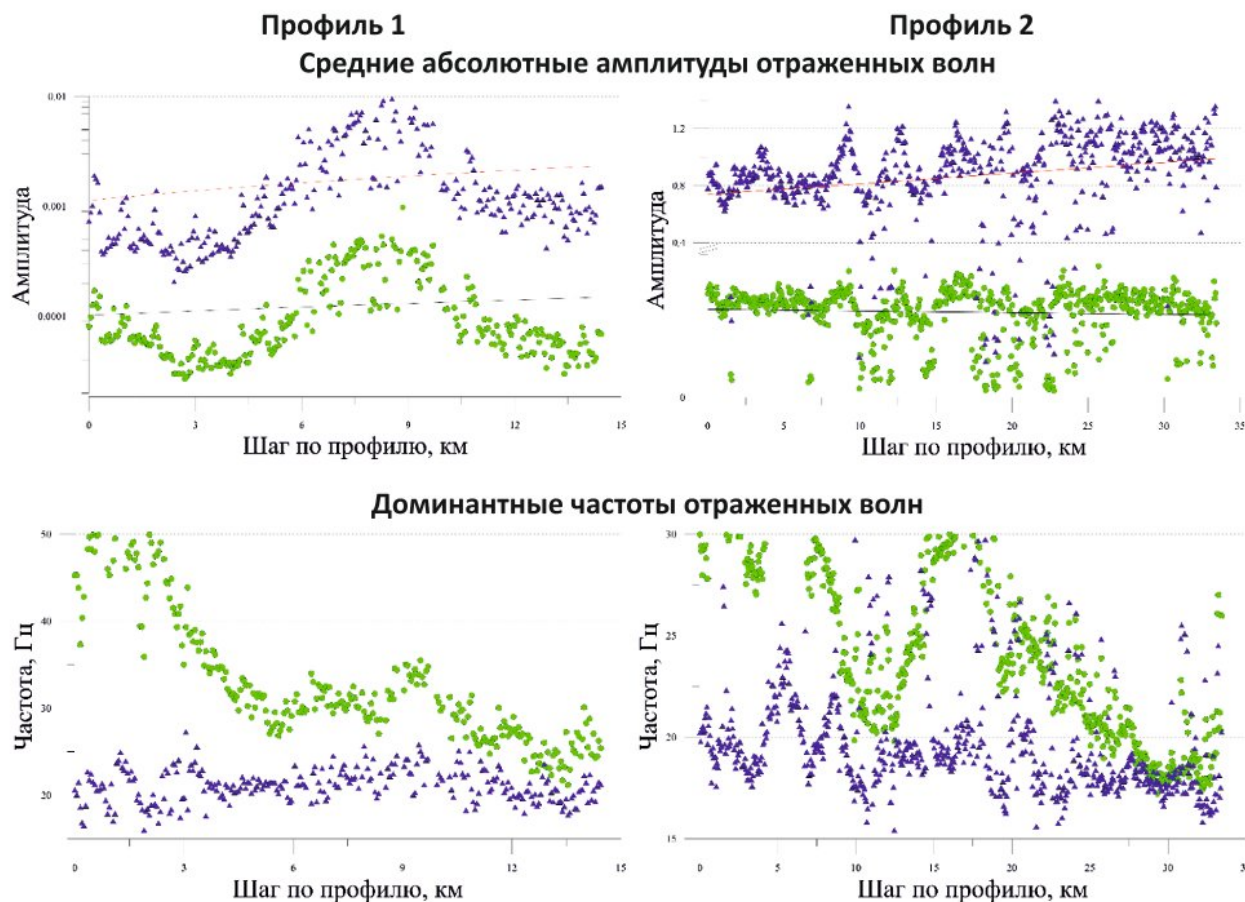
Для профиля 1 получены схожие результаты.

Влияние поверхностно-согласованных процедур на оконные оценки

В основе поверхностно-согласованных процедур лежит разложение на факторы,

отвечающие источнику, приемнику, удалению и структуре [3]. На практике при выполнении поверхностно-согласованных процедур обычно учитываются факторы источника и приемника, что позволяет стабилизировать результат операций и сильнее выделить в амплитудно-частотных свойствах сейсмической записи структурный фактор. В рамках основного графа обработки была выполнена поверхностно-согласованная деконволюция сжатия.

На рисунке 4 представлены графики средних абсолютных амплитуд и доминантных частот в окне до и после поверхностно-согласованной деконволюции сжатия. Длина оператора 240 мс, уровень белого шума 1%. Учитываются факторы источника и приемника. Для профиля 1 тренд оценок, очевидно, сохраняется; для профиля 2



▲ Рис. 4. Графики атрибутов по профилям до (●) и после (▲) процедур поверхностно-согласованной обработки. Красным цветом показана линия тренда для исходных данных, черным – для данных после применения процедуры.

наблюдается ослабление линейной компоненты тренда с выходом на постоянное значение за счет существенного уменьшения амплитуд. Отметим, что частоты по второму профилю за счет поверхностного согласования оказались ниже, чем после потрассных процедур.

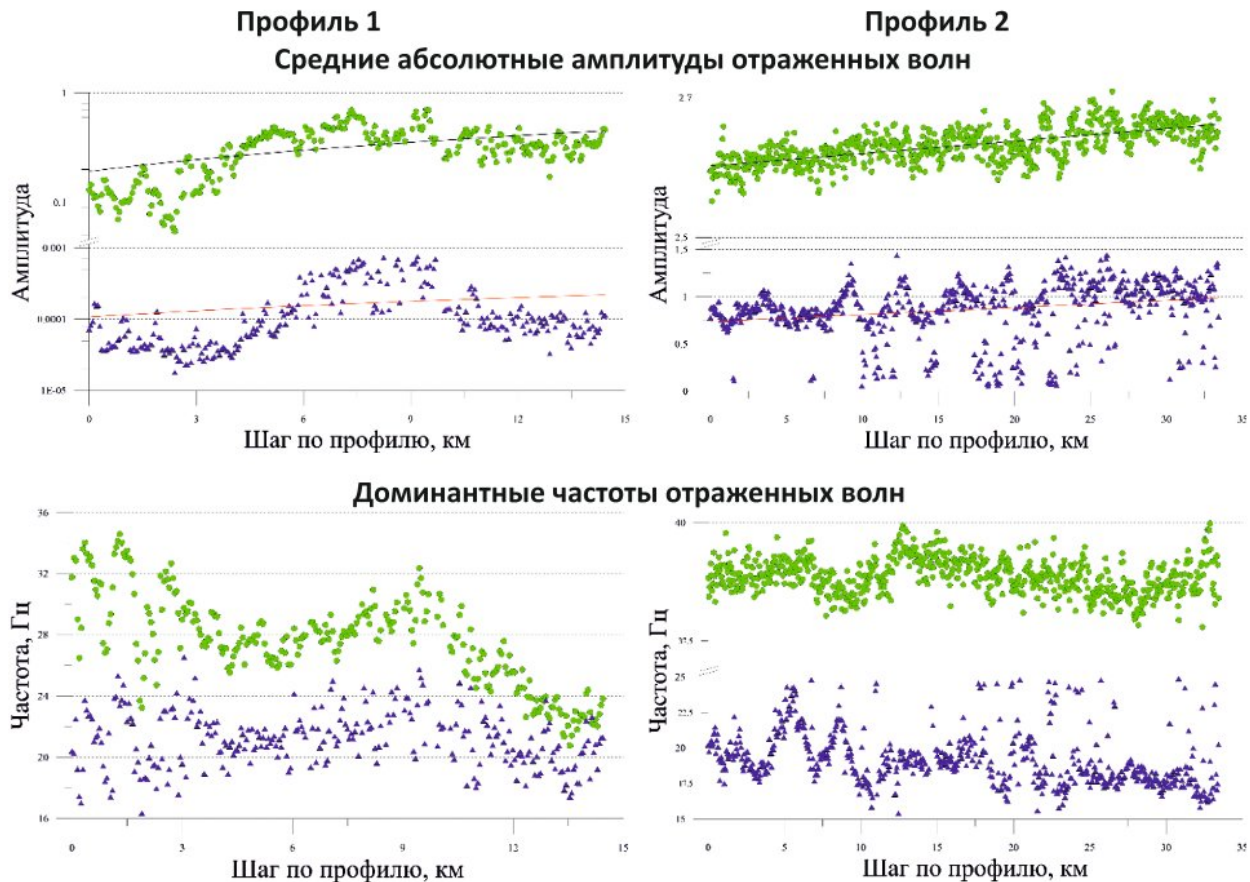
Оконные оценки до и после обработки.

После выполнения всех процедур обработки были рассчитаны оконные оценки по финальным сейсмограммам. Результаты представлены на рисунке 5. Как можно заметить, для обоих профилей в ходе обработки сохранился общий тренд средних абсолютных амплитуд в окне. В случае профиля 2 доминантные частоты после обработки достаточно выровнены

вдоль профиля, что может говорить о качественном выполнении поверхностно-согласованного набора процедур. Для профиля 1 можно заметить, что частотный состав записи после обработки неравномерный вдоль профиля.

Заключение

На наш взгляд, количественные оконные оценки качества, широко применяемые для описания полевого сейсмического материала, могут быть использованы для сопровождения процесса обработки. Они позволят объективизировать последовательность принятия решений по выбору процедур и параметров обработки, обеспечивая тем самым улучшение качества обработанного сейсмического материала.



▲ Рис. 5. Графики атрибутов по профилям на входе (●) и выходе (▲) полного цикла поверхностно-согласованной обработки. Красным цветом показана линия тренда для исходных данных, черным – для данных после применения процедуры.

Основным критерием качества можно считать сохранение исходного тренда оценок.

Литература

1. Крылов И.Б. Записки о качестве первичного сейсмического материала и его оценках. М.: Научные технологии. 2016.
2. Блюменцев А.М., Мельчук Б.Ю. К вопросу о качестве геофизических технологий // Приборы и системы разведочной геофизики. 2012. № 1. С. 8-11.
3. Taner M., Koehler F. Surface consistent corrections // Geophysics. 1981. Vol. 46. No.1. P. 17-22.

Подробнее об авторах



Абизгильдин
Руслан Ильдусович

геофизик ЗАО НПЦ
"ГеоСейсКонтроль",
магистрант МГУ
им. М.В. Ломоносова



Белоусов
Александр Валерьевич

доцент кафедры разведочной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, к.т.н.

Проблемы современной инструментальной базы полевых технологий

■ Ясницкий Ю.С., Geospace Technologies Corp., г. Хьюстон

История широкого применения сейсморазведки при поисках и разведке месторождений нефти и газа насчитывает уже более 70 лет. За это время техника и полевые технологии сейсморазведочных работ претерпели несколько этапов революционных изменений, что каждый раз существенным образом сказывалось на результативности и производительности выполняемых работ, обеспечивая повышение эффективности нефтегазовой сейсмической разведки при решении основной задачи - разведать, подтвердить и извлечь максимальное количество углеводородов при минимальных затратах финансов и времени.

По разнообразию и сложности используемых технических, программных средств и полевых технологий сейсморазведка существенно превосходит все другие геофизические методы. При этом иногда положение дел складывается таким образом, что различные участники процесса, а именно представители различных структур индустрии, имеют своё видение актуальных проблем, не всегда совпадающее с мнением коллег. У производителей, представителей научной сферы и производителей аппаратуры могут складываться даже противоположные взгляды на решение тех или иных задач и зачастую убедить их уступить и принять точку зрения коллег весьма сложно.

Переходя к конкретике, нужно сказать, что каждая нефтяная компания рассматривает свои задачи под собственным углом видения, используя различные подходы к освоению собственных лицензионных участков. Одни недропользователи вкладывают значительные ресурсы в максимально эффективное использова-

ние своих месторождений, выполняя доразведку месторождений и улучшая прогнозные данные, а также проводя чрезвычайно затратные мероприятия по повышению коэффициента извлечения полезных ископаемых, включая сложно извлекаемые запасы. Другие компании стремятся сократить расходы на моделирование до минимально-достаточных значений и вкладывают деньги исключительно в быстрые проекты, не инвестируя в сложные и долговременные программы. Одной из главных причин, сдерживающих развитие технологий разведки и добычи, является тот факт, что природные ресурсы являются политэкономическим инструментом. В последнее время даже лучшие аналитические агентства не могут дать достоверные долгосрочные прогнозы, касающиеся движения цен на полезные ископаемые. Таким образом, крупные инвестиции в разработки прогрессивных и сложных методов разведки и добычи природных ресурсов становятся весьма рискованным мероприятием с весьма непредсказуемыми результатами. Однако остаётся шанс, что некоторые игроки будут продолжать делать ставку на технологичность, заглядывая в будущее немного дальше завтрашнего дня, и тем самым двигаясь вразрез общей тенденции. Такая стратегия, учитывая цикличность развития экономики и волнообразный характер рыночных процессов, с большой долей вероятности, способна привести к успеху.

Инструментальная база полевых технологий в геофизике представляет собой весьма широкий спектр технических средств, предназначенных для изучения, разработки и эксплуатации природных ресурсов. По функциональному назначению эти технические средства использу-

ются для решения трех основных задач: создание, приём и обработка сигналов. И если разобрать и разложить на столе совершенно различные по своему предназначению геофизические приборы, будь то контроллер сейсмоисточника, георадар, полевой регистратор кабельной или бескабельной системы или скважинный зонд, то окажется, что основная компонентная база будет одна и та же: аналогово-цифровые преобразователи, ППВМ (полевая программируемая вентильная матрица), центральный процессор, сетевые контроллеры, память и контроллеры систем геопозиционирования. Самое интересное заключается в том, что на уровне компонентной базы электроники существует практически полная монополия нескольких производителей микросхем. И на самом деле, какой бы прибор любого из производителей геофизического оборудования мы ни подвергли полной разборке, перечисленные компоненты на 70% будут совпадать во всём спектре различных геофизических приборов. Так, к примеру, и в скважинном зонде, и в полевом регистраторе кабельной телеметрической, бескабельной или автономной сейсмосистемы, и в контроллере источника сейсмических сигналов будет идентичная конфигурация центрального процессора, вентильной матрицы, сетевых и GPS контроллеров, памяти и АЦП. Причём будут они от одних и тех же производителей, и, скорее всего, одних и тех же моделей. В настоящее время монополия на электронную компонентную базу геофизических приборов принадлежит компаниям Siemens, Texas Instruments, U-Blox, Cirrus Logic, NXP Semiconductors, Trimble и Transcend.

Производители геофизического оборудования во всём мире собирают практически идентичные по своему функционалу микрокомпьютеры, которые и являют-

ся основными функциональными элементами тех или иных приборов. Такая ситуация возникла при эволюционном переходе от аналоговых систем к цифровым в начале 80-х годов двадцатого века. До упомянутой смены поколений можно было абсолютно достоверно распознать страну-производителя системы, всего лишь взглянув на элементы компонентной базы электрической схемы прибора. При появлении современной компонентной базы обнаружилась тенденция к резкому росту количества производителей геофизического оборудования на рынке. При этом, с одной стороны задача первичного проектирования и дизайна приборов в «железе» существенно упростилась, а с другой — встал вопрос доводки готового устройства на программном уровне, что оказалось задачей не менее, а зачастую, более сложной.

Ситуация разрозненности между производителями стала серьёзно накаляться с начала двухтысячных годов. На рынке появилось множество новых компаний, которые на фоне технологического взлёта полупроводниковой индустрии пришли к выводу, что создать изделие из готовых компонентов будет не так уж и сложно и на уровне концептов можно заявить новые недоступные ранее возможности. По отношению к ситуации, сложившейся на рынке геофизического оборудования, напрашивается ёмкое определение «печального оптимизма». Не имея возможности провести детальную доработку продуктов и пройти стадию внутреннего массового стрессового тестирования спроектированного оборудования, основная масса новых игроков, не утруждаясь, выдаёт весьма громкие маркетинговые лозунги, обещающие своим клиентам «легкую жизнь».

Маркетинговая линия многих начинающих компаний максимально подстрое-

на под озвучиваемые желания нефтяных и сервисных компаний и не важно, в какой степени требуемые параметры возможно в действительности реализовать на практике. Главное — заявить всем, что именно они производят оборудование, полностью соответствующее всем поставленным требованиям. Ситуация многократно осложнилась в последние три – пять лет с момента выхода на рынок множества китайских производителей, которые либо просто копируют готовые продукты крупнейших брендов в обход всех патентных и интеллектуальных прав, либо же собирают изделие, выпуская его на рынок с минимальной обкаткой и тестированием. Программные составляющие китайских решений находятся в чрезвычайно сыром виде.

В свою очередь, у потенциальных конечных пользователей оборудования формируется ложное представление об истинном положении дел в индустрии, связанное с ожиданием того, что приобретенное оборудование будет соответствовать заявленным производителем характеристикам, а также будет отвечать общемировым стандартам надежности.

В действительности же, только несколько производителей в мире с богатой историей и высочайшей компетенцией персонала, имеют возможность создать по-настоящему качественный и отлаженный продукт, обещая при этом лишь то, на что это продукт действительно способен.

Для возможности производства в сжатые сроки десятков тысяч устройств нужна соответствующая производственная база, отлаженный процесс и заполненные необходимыми компонентами склады. Таким образом, ещё до заключения первых контрактов с пользователями необходимо инвестировать сотни миллионов условных денежных единиц в разработку и дальнейшую отладку оборудова-

ния, а также в создание и наладку производственной линии. В процессе реального тестирования устройств нередко обнаруживаются существенные недостатки, что вынуждает отправлять под списание тысячи единиц произведенных устройств. Увы, все крупные производители очень хорошо знакомы со столь типичной ситуацией. В противоположность добросовестным производителям, у которых слово не расходится с делом, новые игроки предпочитают проводить тестирование на собственных клиентах и практически всегда оказываются в неловких ситуациях, что в условиях довольно узкой сферы бизнеса неминуемо ведет к потере репутации и недоверию клиентов в будущем. Далее мы разберем несколько конкретных примеров, не называя из деликатности конкретные бренды.

Как и в любом другом бизнесе, при производстве геологоразведочного оборудования критически важны: ведение грамотной стратегии планирования действий на годы вперед, тесная взаимосвязь с клиентами и принятие верных решений. Единственное неверное решение может поставить под удар всю компанию, в особенности, когда бренд имеет узкую специализацию и компания не будет способна выдержать провал отдельной линейки выпускаемого оборудования.

Один из новых игроков на рынке показал решение, в теории способное удовлетворить самые нескромные запросы и ожидания геологоразведчиков, а именно, полностью бескабельную систему, способную передавать регистрируемые данные в реальном времени. Надо заметить, что производитель предпочёл использовать в маркетинговых слоганах именно термин «реальное время», а не квазиреальное. Заявляется, что доступны конфигурации, полностью сопоставимые

с сейсморазведочными кабельными системами, передающие регистрируемые данные в центральную систему в реальном времени. То есть производитель с ходу готов пообещать, что в реальных полевых условиях, после расстановки 6 – 8 тысяч станций по 3D профилям система активируется, произведёт корректную адресацию каждого блока и будет стабильно передавать данные в «реальном времени» с активной расстановки. При этом активная расстановка может быть и 3.5 и более тысяч каналов. Все современные телеметрические системы передачи данных построены с использованием известных сетевых протоколов (TCP, UDP и TCP/IP) и имеют классические топологии (кольцо, звезда или смешанный тип). При этом неизбежны и ограничения, накладываемые определенной структурой и используемым протоколом передачи данных. Адресация в кабельной системе происходит по цепочке и конфликтов авторизации устройств при автоматическом назначении метрики происходить не должно. Хотя такое случается и в кабельных сетях, причём не так уж и редко. А это означает, что конфликтующие приборы исключаются из маршрутизации и на определенных участках расстановка вдруг перестаёт «отвечать». В бескабельных же сетевых системах всё многократно сложнее: маршрутизатор даёт команду на активацию всем приборам в зоне радиовидимости, затем принимает от них ответное «слово», после чего происходит назначение метрики сегмента сети, и управляющая команда на активацию следующего участка сети передаётся следующему маршрутизатору. При этом роль маршрутизаторов берут на себя те же самые полевые регистраторы, выступая, в зависимости от ситуации, либо обычными участниками децентрализованной сети, либо маршрутизаторами.

Самая главная сложность заключается именно в построении одноранговой сети, когда маршрутизатор даёт команду на активацию в зоне радиовидимости, радиус которой может составлять несколько километров. При этом мощность сигнала на внешних участках радиуса будет значительно ослаблена. Сигнал на активацию, скорее всего, будет принят, а вот ответный сигнал может не дойти или дойти далеко не с первой сотни попыток. При этом уже будет активироваться следующий сегмент сети и уже следующий маршрутизатор может принять ответные сигналы от одиноких оставшихся участников первого сегмента. При этом собственная адресация на заданном уровне уже будет занята участниками своего сегмента и произойдёт конфликт адресации, что потребует отсылки команды на переинициализацию обоих сегментов сети, а дальше ситуация может банально повториться. В самом тривиальном случае, отдельные блоки просто не будут инициализированы. При более пессимистичном варианте время активации расстановки будет стремиться к бесконечности. Это лишь первый этап. Далее встаёт проблема асимметрии мощностей передатчиков. В зависимости от внешних условий связи, каждый участник сети – станция с полевым регистратором – может менять мощность радиоизлучения. Внешние условия всегда будут отличаться на разных участках расстановки. При этом изменения, как правило, будут иметь не плавный, а ступенчатый характер. Так, например, поле перешло в лесопосадку, затем в низменность с туманом, где поглощение высокочастотного сигнала будет просто колоссальным, или на определённом участке расстановки начнется дождь. Именно в таких переходных зонах и будут возникать основные сложности. Если передатчики (А) на

граничной полосе эксклюзивной зоны передают сигнал на повышенной мощности, к примеру, 250 мВт, а соседние станции (В) из ординарной зоны на 50–80 мВт, то неизбежно на граничной зоне возникнут места, где станции «В» будут хорошо слышать станции «А», но станции «А» не услышат соседей «В» или связь будет очень слабой – асимметрия. Сигнал есть, связи нет или скорость передачи данных в одну сторону будет высокой, а в другую сторону крайне низкой, с огромным количеством ошибок и, как следствие, с постоянными повторными запросами на передачу пакетов с несовпавшей контрольной суммой.

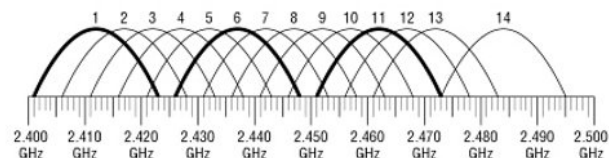
Следующая проблема и злейший враг бескабельных систем в сейсморазведке – интерференция высокочастотных сигналов беспроводной телеметрии. Решение использовать открытые полосы радиочастот в диапазонах 2,4 ГГц и 5 ГГц имеет положительные и отрицательные последствия. Отрицательных значительно больше. Положительные стороны – меньше сложностей с легализацией на территории некоторых государств (Россия не входит в их число. В России не требуется специальная регистрация в ФСБ и радиочастотном комитете только для систем, работающих в помещениях на частотах 2,4 и 5 ГГц и мощностью излучения не более 110 мВт) и возможность реализации широкого пропускного канала данных. Однако, минусов, как было упомянуто ранее, значительно больше. Когда полосы часто для передачи данных ограничены 100 МГц для частотного диапазона 2,4 ГГц (2400–2500 МГц) и 150 МГц для полосы 5 ГГц свободных от интерференции (не перекрывающихся по частотам) каналов остаётся немного. В табл. 1 представлены частотные каналы в спектральной полосе 2,4 ГГц [1].

Общая диаграмма перекрытия частот-

Канал WiFi	Нижняя частота	Центральная частота	Верхняя частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

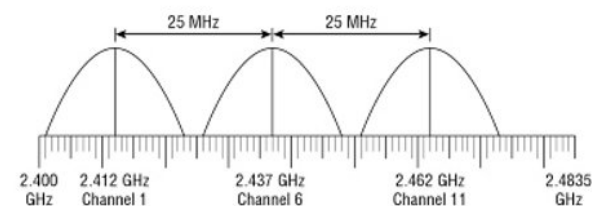
▲ Табл. 1.

ных каналов в полосе 2,4 ГГц представлена на рис. 1.



▲ Рис. 1.

В полосе частот WiFi 2.4GHz доступны 3 неперекрывающихся канала: 1, 6, 11. Данное выделение строится на требовании IEEE по обеспечению минимума в 25 МГц для разнесения центров неперекрывающихся частотных каналов WiFi. При этом ширина канала составляет 22 МГц (рис.2).



▲ Рис. 2.

Ниже представлена сетка рабочих каналов WiFi и частоты в 5GHz (табл.2, 3, 4) [1].

Для вычисления центральной частоты канала WiFi можно использовать следующую формулу: $5000 + (5 * N) / \text{MHz}$, где N это номер канала WiFi, например 36, 40 и т.д. [1].

Канал	36	40	44	48
Центральная частота, МГц	5180	5200	5220	5240
Полоса	UNII-1			

▲ Табл. 2.

Канал	149	153	157	161
Центральная частота, МГц	5745	5765	5785	5805
Полоса	UNNII-3			

▲ Табл. 3.

Канал	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
Центральная частота, МГц	5260	5280	5300	5320	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700
Полоса	UNII-2														

▲ Табл. 3. (Продолжение).

Формирование каналов в полосе 5 ГГц представлено на рис. 3.

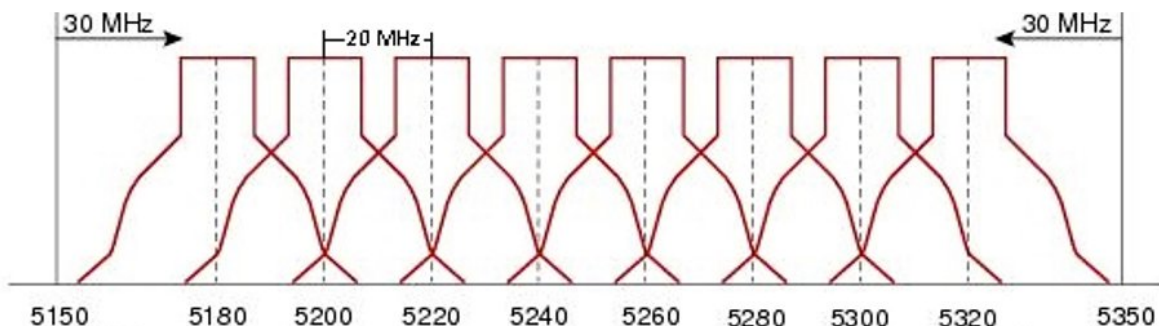
При этом дистанция от граничных диапазонов составляет 30 МГц, а межканальное разнесение составляет 20 МГц.

Таким образом, когда имеется лишь несколько доступных каналов и каждый полевой регистратор старается использовать наименее загруженный в момент получения собственной метрики, а затем ту же операцию проводят и все соседние каналы, то появляется множество устройств, работающих в одних и тех же участках спектра. Каждое дополнительное устройство, подключившееся к работе в том же спектре, будет интерферировать с полезным сигналом, передаваемым в данный момент другим блоком. Причём, дальнейшее наращивание плотности сети (применительно к системам сейсморазведки — это увеличение плотности расстановки) будет кратно

увеличивать проблемы интерференции и будет препятствовать получению требуемых характеристик производительности или сделает данные характеристики крайне нестабильными. Промежуточный вывод — чем плотнее расстановка, тем хуже она будет работать. Более того, при достижении определённого предела в наборе плотности, в один момент система просто перестанет выполнять функции телеметрии. Увы, с физикой не поспоришь. Часто даже не самые очевидные условия могут играть решающую роль. Так, например, всего лишь дождик или утренний туман способен полностью порушить ещё час назад стабильно работающую расстановку! И особенно летом в лесу, в утренние часы, когда роса будет конденсироваться на листьях и траве.

Изначально концепт системы с радиотелеметрией создавался для систем мониторинга гидроразрыва пласта, где не

▼ Рис. 3.



требуется большая плотность и значительное количество приборов для решения целевой задачи. Затем систему было решено приспособить для более крупного и доходного рынка сейсморазведки. Скорее всего, производитель не проводил масштабного стрессового тестирования системы при различных условиях и не учел тенденции на уплотнение шага регистрации. В настоящее время не существует достаточно надежной технологии для реализации полностью бескабельной телеметрии, работающей в реальном времени в масштабах тысяч каналов.

Значительно лучше ситуация с «полуслепыми» системами. Такие системы ведут автономную регистрацию 24 часа в сутки или по заранее заданному расписанию, обеспечивая при этом бескабельный доступ к регистраторам для контроля актуальных статусов расстановки и выгрузки данных на основе списков отметок моментов (время с точностью до микросекунды, показывающее начало воздействия на каждом пункте возбуждения). Сейсмоданные записываются во внутреннюю энергонезависимую память и хранятся там до момента выгрузки всех данных на сервер. В этом случае исключается возможность потери данных в результате нестабильной работы радиотелеметрии и надежность всей системы значительно повышается. Существует несколько действительно работоспособных систем от различных производителей и при этом каждая имеет свои уникальные особенности. Полуслепая концепция и есть та золотая середина, которая соответствует современному уровню технологического развития компонентной базы, удовлетворяя в достаточной степени нужды геологоразведчиков. Но опять всё не столь радужно и такие системы тоже не идеальны. Недостатки чаще всего связа-

ны с особенностями системы, которые должны были бы упростить методику работы с системой. Также сложности обязательно возникают, когда производитель в угоду запросам пользователей или же по своему собственному видению впадает в крайность, сдвигая продукт с той самой золотой середины в сторону «практически бескабельной телеметрии» или противоположную ей - «практически слепой системы», без возможности оперативного контроля состояния полевой расстановки. Разберем несколько примеров.

Один из производителей в самом начале периода становления бескабельных систем приобрел стартап небольшой компании с полным пакетом интеллектуальных прав на разработку. На тот момент времени, это была, возможно, наиболее технологически продвинутая система, имевшая, к сожалению, «детские болезни», которые она пронесла через весь свой цикл существования. Причина, по которой «детские болезни» так и не были исправлены, является методика создания изделия, о которой шла речь в начале статьи. Замена отдельного компонента может потребовать редизайна всей управляющей платы, то есть всего устройства. Замена контроллера GPS или же сетевого контроллера Wi-Fi потянет за собой полный редизайн блока питания, новую разводку дорожек на плате (стоит упомянуть, что печатные платы сейчас используются многослойные, в 8 или даже в 16 слоёв с собственной разводкой на каждом слое), разработку нового ядра для программируемой вентильной матрицы (FPGA), иного загрузчика для инициализации устройств и новой высокоуровневой управляющей программы для центрального процессора. В рамках отдельной линейки продуктов, особенно учитывая дальнейшее довольно длитель-

ное тестирование в полевых условиях, такие усилия будут практически равнозначны полному перезапуску линейки, что потребует колоссальных затрат. Для компании, у которой есть несколько успешных линеек оборудования проще было оставить бескабельную разработку «как есть», при этом вполне успешно вытягивая продукт за счёт заслуженного годами положительного имиджа компании. Так что же не так с бескабельной системой вышеупомянутого производителя? Тут сыграли несколько факторов одновременно.

Во-первых, это слабая антенна GPS приёмника. На самом деле это один из важнейших факторов стабильности и надёжности наземных бескабельных систем регистрации. GPS используется в первую очередь не для позиционирования приборов, а для точной временной синхронизации каждого регистратора в отдельности и системы в целом. В регистраторах наземных бескабельных сейсмосистем, в отличие от морских нодальных сейсмосистем, средства поддержки постоянной температуры внутренних часов не устанавливаются по экономическим соображениям. При этом среднесуточные температурные флуктуации могут достигать слишком больших величин, чтобы ими можно было пренебречь. При потере сигнала GPS на относительно длительное время внутренние часы регистратора начнут уходить в ту или иную сторону и частота дискретизации уже не будет точно соответствовать заданному значению. Именно поэтому качество исполнения блока GPS является критически важным и напрямую влияет на конечный результат.

Во-вторых, это стремление удовлетворить основной запрос геофизиков восточного региона на контроль расстановки в реальном времени. В качестве радиопе-

редатчика был выбран стандарт Wi-Fi на открытой частоте 2.4 ГГц, основные недостатки которого мы разбирали на предыдущем примере. Соответственно, тут возникают те же проблемы. Кроме того, в этой системе отсутствует возможность массовой скачки данных по кабельному интерфейсу. Если с каждого блока требуется скачать, к примеру, 10 Гб данных, а блоков при перекладке оборудования привезли сразу 3000, то на сервера нужно будет передать 30 терабайт данных. С использованием Wi-Fi интерфейса на это потребуется около 70 часов при идеальных условиях. А ведь на непрерывную передачу данных в течении 70 часов потребуются полностью заряженные аккумуляторы! Поэтому эта система и не сохраняет сырой массив данных, с которым можно было бы производить множество операций постобработки, дающих значительное преимущество в интерпретации (суточный мониторинг шумового поля, подключение специальных методик обработки СЛБО и СЛОЭ, динамическое изменение размера активной расстановки и нарезка данных с различной длительностью данных, бесшовные данные Continuous Receiver Gather), а выгружает нарезку данных, основанную на таблицах отметок моментов возбуждения.

В дополнение к сказанному, приёмопередатчик Wi-Fi довольно невелик в отношении потребления электроэнергии, в особенности в условиях слабого сигнала, когда требуется использовать максимальное усиление на передатчик. При наличии внутренней батареи не самой высокой ёмкости, в реальных условиях автономность блока составляет в среднем менее 10 дней. И это при условии положительных температур и нового оборудования, т.е. с литий-ионными батареями, ёмкость которых соответствует заявленной величине, которая обычно рассчиты-

вается при температуре 20 °С. При отрицательных температурах батарея может терять до 60% от первоначальной ёмкости (в среднем потеря составляет 10% ёмкости на каждые 10 градусов С). Дело в том, что все 100% батарей производятся на заказ в Китае и производители батарей обозначают нижний рабочий температурный предел в -20 °С. Все остальные цифры (-40; -50 градусов) производители геофизического оборудования указывают на собственный страх и риск.

Следующим примером может послужить оборудование от производителя, достигшего определённых успехов со своей морской нодальной системой. Наземное оборудование этого производителя в целом показало весьма надёжную и стабильную работу, но сложности пришли с противоположной стороны. Полевые регистраторы не имеют никакого бескабельного интерфейса в угоду упрощения конструкции блоков и повышения их надёжности. Производитель любит говорить об исключительной надёжности своей продукции, но опыт подсказывает, что абсолюта не существует, и в особенности это касается электроники. Рассматриваемые полевые регистраторы всё же имеют диагностическую карту, отображаемую последовательностью сигналов и цветовым кодом светодиода на корпусе каждого регистратора, а также имеют проводной диагностический разъём, позволяющий собирать детальные статусы расстановки с помощью планшетного компьютера, подключаемого кабелем к каждому из нескольких тысяч расставленных на поле приборов. Разумеется, такой способ не реализуем на практике и пользователь вынужден слепо верить, что все каналы пишут качественный материал. В результате, такая система регистрации допускает возможность появления недиагности-

рованных бракованных данных и пропущенных трасс.

Использование концепции полностью слепой системы получило некоторое распространение. В настоящее время такие системы регистрации предлагают несколько компаний. Один из новых производителей предлагает слепые трехкомпонентные модули в исполнении, напоминающем болотофоны, и роботизированную систему установки модулей. Робот, заряженный сотней приборов, сам проезжает по координатам пунктов приёма, разбуривает лунки глубиной в 30 сантиметров и устанавливает в них приборы. Конечно, заглубление электродинамических датчиков безусловно положительно сказывается на качестве данных, но в настоящее время подобного рода системы способны функционировать только на концептуальном уровне. Гораздо правильнее, как нам кажется, использовать роботизированные системы не на земле, а в воздухе, в связке с полуслепой системой, где автономный дрон способен за час пролететь на высоте 50 – 70 метров по координатам большей части расстановки со скоростью около сотни километров в час, собрать на миниатюрный приёмопередатчик все статусы работы со всех полевых регистраторов и уже через час предоставить для контроля качества все необходимые данные. После этого можно провести анализ и принять решение об обслуживании отдельных приборов, если это необходимо. Такой облёт можно совершать несколько раз в сутки или в непрерывном режиме и всегда иметь актуальную информацию о работе всей системы. В качестве коммуникационного модуля разумно использовать протоколы с низким профилем электропотребления и бинарной передачей сервисных данных.

Следует отметить, что производителям часто приходится устранять проблемы,

упущенные на стадии проектирования. В качестве примера можно привести случай, когда из-за неправильно спроектированного корпуса прибора приемопередающая антенна была расположена слишком близко к внутренней стенке прибора под острым углом и высокочастотный сигнал попросту отражался от пластиковой стенки, в результате чего радиопокрытие не соответствовало расчётному. Уже готовый модуль, находящийся на стадии производства, пришлось в срочном порядке отправлять на доработку с изменением дизайна антенны.

Среди сейсморегистрирующих систем, предлагаемых в настоящее время производителями геофизического оборудования, несколько особняком стоит так называемая комбинированная система, в которой совмещены кабельный и бескабельный принципы сбора данных. Изначально концепт такой тандемной системы близок к идеальному, избавляя от многих проблем как кабельных, так и бескабельных систем регистрации, пытающихся работать в приближенном к реальному времени. Из очевидных недостатков остаются только классические сложности, связанные с расстановкой и транспортировкой габаритной кабельной системы и стоимость системы в целом. Такая система обеспечивает честную передачу данных и контроль расстановки в реальном времени, высокую надёжность в сравнении с кабельными системами и легко преодолевает большинство инцидентов, связанных с разрывами и повреждениями кабеля, если только не случится двойной разрыв в сегменте, зависимость от линейных блоков, питающих сегменты с обеих сторон. При этом вероятность именно такой конфигурации отказа довольно низка и будет немедленно обнаружена с точностью до крайних перед разрывом приборов. Проблема

расстановки профиля в эксклюзивной зоне решается выкладкой сегментов расстановки бескабельными регистраторами, интегрированными в систему, либо любой другой бескабельной системой с подключением данных, собранных с эксклюзивного участка, на стадии обработки данных.

Неочевидный недостаток станции берет начало из ее же достоинств. При обрыве линии каждый отдельный регистратор на телеметрическом кабеле способен переключаться в бескабельный режим с установкой радиотелеметрии с соседним блоком, находящимся после разрыва. Межлинейные блоки способны перестраивать маршрутизацию данных и перенаправлять сигнал с помощью радиотелеметрии в обход обрывов отдельных линий, не имеющих связи с собственными межлинейными блоками. Конечный пользователь вероятнее всего будет затягивать с ремонтом повреждённых кабелей, продолжая работу до тех пор пока не наберется критическая масса неисправностей и сама система не перестанет справляться с перемаршрутизацией телеметрии. В конечном итоге, если затягивать с ремонтом, то, когда настанет момент переброски линий, потребуется потратить весьма значительное время на ремонт множества порывов, устранения утечек кабелей. В массовом объёме это приведёт к эффекту «дорожной пробки», когда полевые ГМЛ к середине сезона столкнутся с массовым ремонтом. Безусловно, это вопрос организации работы конечного пользователя, но с практической точки зрения высокая надёжность гибридной системы будет провоцировать пользователей к откладыванию ремонта.

Стоит упомянуть историю одной из старейших компаний, ставшей жертвой ряда совершенных ошибок и неверных маркетинговых ходов. Компания была

создана в 1968 году в г. Хьюстон в Соединенных Штатах и начинала свою деятельность с производства специализированных систем синхронизации сейсмоисточников. Затем было развернуто производство электродинамических геофизических датчиков. Компания начала приобретать всемирную известность, в том числе и благодаря весьма успешной серии геофонов SM. Позднее, в производственном портфеле компании появились наземные сейсморазведочные станции, сейсмовибраторы, системы синхронизации и программные комплексы, на равных конкурирующие с европейским законодателем рынка. Практически на протяжении всей своей истории, компания приобретала технологии и интеллектуальные права у других игроков на рынке. В середине 90-х годов XX века, были приобретены права на технологию сейсмовибраторов у компании «Western Geophysical», а затем, шесть лет спустя, была приобретена линейка сейсмоконтроллеров «Pelton». Таким образом, к середине 2000 годов, компания могла предложить практически полный спектр сейсморазведочного оборудования и сервисов для наземных и морских сейсморазведочных работ.

Но каждая последующая модификация системы и новые модели станций не несли в себе явных инноваций. Если вторая серия системы полностью соответствовала современному уровню развития и в некоторых областях превосходила конкурентов, то следующие поколения оборудования содержали в себе всё меньше и меньше инноваций и начали по всем параметрам уступать конкурентам. Дизайн в железе был надежным, но при этом значительно отставал по массогабаритным параметрам. Основная проблема оказалась в программной составляющей выпускаемых компанией продуктов. В самом начале статьи упоминалось, что

при построении системы из набора компонентов, доступных на рынке, одну из наибольших сложностей представляет программная адаптация аппаратных компонентов и общая программная среда взаимодействия. Сейсмостанция, как класс оборудования, представляет собой большую компьютерную сеть, и её правильное функционирование является критически важным для работы всей системы. Если в программной составляющей допущено множество, пусть даже и

некритических ошибок, то это потребует от конечного пользователя развития особых приспособленческих навыков. За несколько сезонов оператор, постоянно работающий с одной и той же системой, способен подстроиться под нестабильно работающую систему и не допускать последовательности действий, способных вызвать очередной сбой. Но любой новый сотрудник, начавший работу после обучения работы с оборудованием, будет попросту не готов начать использовать систему, как это описывается в руководстве пользователя или во время специализированных курсов. Такого рода сбои называются регулярными и к ним кое-как можно приспособиться. Нерегулярные ошибки, возникающие сами по себе, без инициирования особой последовательностью действий, являются куда более существенными и не оставляют возможности предсказать поведение системы.

В определённый момент, конечными пользователями была накоплена критическая масса претензий и никто не захотел обновлять устаревающий парк оборудования на новые версии системы, отдав предпочтение другим маркам.

Хочется также затронуть некоторые проблемы морских нодальных систем, которые в своём современном состоянии очень близки по концепции к наземным слепым бескабельным системам. По сути,

это те же бескабельные четырехканальные регистраторы, лишенные приёмников GPS. Хронирование времени осуществляется по тем же алгоритмам, только временные промежутки между подсчётами фазовой ошибки от референтных временных отсчётов, полученных по GPS, составляют десятки дней. Донные станции синхронизируются дважды: перед раскладкой и после подъёма на борт. Во время первого отсчёта замеряется точность хода часов по микросекундной шкале. При взятии второго отсчёта замеряется фазовый сдвиг. Впоследствии при формировании сейсмических файлов значение фазового сдвига применяется для сжатия или растяжения отдельных трасс. Как правило, применяется линейная интерполяция. Для того, чтобы получить качественные данные, фазовый сдвиг не должен быть значительным и ход часов должен быть стабилен. Другими словами, небольшой уход часов вполне допустим, но величина ухода должна быть стабильной и постоянной на протяжении всего времени автономного действия регистратора. Только тогда данные можно будет выровнять.

Существует два подхода в реализации стабильного хронирования для донных регистрирующих систем. Классическим вариантом можно назвать применение кварцевых часов, а инновационным – установку миниатюрных цезиевых атомных часов, работающих на основе квантового эффекта КПН (когерентного пленения населенностей).

Как известно, стабильность хода кварцевых часов зависит от температурного режима и применяемой системы компенсации. Золотым стандартом является применение термостатированного кварцевого осциллятора с двойной печкой (OCXO Oven-controlled crystal oscillator) (рис.4). Такая компоновка позволяет

поддерживать постоянную температуру, при которой работа кварцевого осциллятора наиболее стабильна.



▲ Рис. 4. Термостатированный кварцевый осциллятор с двойной печкой.

Первый и второй контуры печки независимы и управляются отдельно, поддерживая строго заданную температуру ядра даже при резком изменении внешних условий. А это именно тот сценарий, при котором и работают нодальные системы, когда донные регистраторы, пролежавшие на палубе несколько часов и изрядно нагретые солнцем, сбрасывают в холодную воду. К основному недостатку системы с двойной печкой можно отнести довольно длительное время, необходимое для фазовой автоподстройки частоты (Phase-Locked loop), когда фаза осциллятора подстраивается так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала, которым выступает ежесекундно получаемый импульс в секунду (PPS – pulse per Second), синхронизированный с GPS временем. Происходит сравнение фазы входного и опорного сигналов и фиксируется ошибка, равная разности между фазами. Сигнал ошибки затем используется в качестве управляющего для генератора, управляемого напряжением, обеспечивающего обратную отрицательную связь. В случае отклонения выходной частоты от опорной, сигнал ошибки увеличивается,

воздействуя на управляемый генератор в сторону уменьшения ошибки. Так повторяется до тех пор, пока система не достигнет равновесного состояния, и выходной сигнал не будет зафиксирован на частоте опорного. Учитывая известный факт старения кварцевой системы, и, как следствие, ухудшение со временем заводских характеристик, еще одним недостатком можно считать увеличивающееся с возрастом время синхронизации системы.

В 2011 году компания Symmetricom, впоследствии приобретенная Microsemi Corp., представила миниатюрную систему цезиевых атомных часов на чипе (рис.5).



▲ Рис. 5. Чип цезиевых атомных часов.

Продукт получил весьма широкий спектр применения и быстро нашел применение в различных высокотехнологичных продуктах, в том числе эти чипы стали применять и производители сейсморазведочных донных станций. Но применение этой инновационной и дорогостоящей технологии не стало панацеей. Во-первых, данные чипы весьма дороги и их установка целесообразна в наиболее дорогие модификации. Во-вторых, не существует альтернативы. Такого рода цезиевые атомные осцилляторы на

данный момент выпускает только один производитель на рынке, а монополист, как известно, всегда может и будет диктовать собственные условия. Так и случилось, когда компания Symmetricom перешла под контроль MicrosemiCorp со сменой высшего руководства. В ходе организации массового выпуска донных систем, построенных на основе атомных часов, вдруг выяснилось, что продукт имеет непредсказуемые показатели старения, приводящее к частым и, что самое плохое, внезапным рассинхронизациям. Предугадать момент потери синхронизации и раскалибровки чипа невозможно. Этот факт производитель прямо указывает в официальном листе спецификаций продукта, упоминая также, что все параметры соответствуют температуре 25 градусов Цельсия [2]. Для перекалибровки необходимо отправлять чип производителю, причём микросхема не должна быть впаяна в плату. И, казалось бы, что уже и так непреодолимая сложность была ещё более усугублена отказом нового руководства компании принимать устройства, ранее выпущенные компанией Symmetricom. Сразу несколько компаний-производителей донных сейсморегирующих систем оказались в заложниках у диктующего собственные правила игры производителя чипов. Так следует отметить, что в текущем году все производители, включая тех, кто ранее производил донные станции исключительно с атомными часами, расширили собственную линейку и начали продвигать модификации с термостатированными кварцевыми осцилляторами. Преимущества атомных часов - быстрая начальная синхронизация, теоретическая независимость от температурных колебаний и опять же теоретическая точность хода – были нивелированы не всегда корректным поведением производителя микросхем и

непредсказуемым поведением самой системы атомных часов.

Крупные производители геологоразведочного оборудования стараются преодолеть стагнацию рынка, используя периоды спада производства для совершенствования технологий и разработки инновационных решений. Хотелось бы верить, что сервисные и нефтяные компании будут следовать тем же курсом, делая ставку на новейшие технологии, позволяющие в итоге добиваться целей с меньшими экономическими затратами именно благодаря инновациям в производственном полевом цикле и повышению надежности оборудования, а не за счёт единовременной экономии при закупке некачественных китайских изделий, выполненных с нарушением патентных и интеллектуальных прав крупнейших производителей, и, как правило, не соответствующих собственным спецификациям, заявленным в документации к их продуктам. Российский рынок геофизического оборудования следовало бы обезопасить от недобросовестных азиатских производителей, прибегающих к политике демпинга, продающих оборудование зачастую ниже себестоимости за счёт максимальной экономии на производственных материалах и компонентах приборов. Идеальным решением было бы создание независимой сертификационной лаборатории на территории Российской Федерации по контролю и сертификации ввозимого и произведенного в России геофизического оборудования и принятие соответствующих норм на законодательном уровне.

Литература

1. Частоты, частотные полосы и частотные каналы сетей стандарта WiFi IEEE 802.11 2.4GHz, 5 GHz, www.wi-life.com [2017]
2. Chip Scale Atomic Clock (CSAC), <https://www.microsemi.com> [2017].



Акционерное общество
«НИЖНЕ-ВОЛЖСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ»

Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики был создан в начале 1961-го года решением Министерства геологии СССР, получив статус одного из наиболее крупных региональных научных центров.

Наделенный правами головной организации, институт возглавил научно-исследовательские, региональные геолого-геофизические и детальные поисково-разведочные работы десятков научных и производственных организаций, участвовавших в региональных программах изучения Поволжья и Прикаспия. Результатом работ явилось открытие многочисленных месторождений, в том числе — уникального Астраханского газоконденсатного месторождения, гигантского нефтегазоконденсатного месторождения Карачаганак, и других, таких, как Жанажол, Тенгиз, Урихтау, Алибекмола — названия этих месторождений широко известны, и в каждом из них был заложен талант и труд специалистов НВНИИГГ.

Как региональный институт АО «НВНИИГГ» осуществляет:

- мониторинг геологоразведочных работ и обоснование направлений ГРП на территории Приволжского и Южного ФО (Волго-Уральская, Прикаспийская и Северо-Кавказская НГП);
- мониторинг лицензирования недр и ресурсной базы УВ Волго-Уральской, Прикаспийской и Северо-Кавказской НГП;
- региональные, зональные и детальные работы на углеводородное сырье Поволжья и Прикаспия комплексом геофизических и геологических методов;
- оценку ресурсной базы УВ сырья региона.

Сегодня АО «НВНИИГГ» — это единственная государственная организация в Поволжско-Прикаспийском регионе, способная обеспечивать научное, методическое, аналитическое и информационное сопровождение всех видов геологоразведочных работ на территории Приволжского и Южного Федеральных округов. Значительные по объему полевые сейсморазведочные и электроразведочные работы проводит Филиал НВНИИГГ — Саратовская геофизическая экспедиция. Геофизическая экспедиция на протяжении всего своего существования была и является опытно-методической базой для большинства отечественных конструкторских бюро в области разработки геофизического оборудования. Если испытанные нами технологии оказываются эффективными, они получают широкое внедрение в практику геологоразведочных работ.

г. Саратов, ул. Московская, д. 70
Факс: 8-8452-263-243

География проводимых институтом исследований весьма обширна и охватывает не только территории Приволжского, Южного и Северо-Западного округов. Также АО «НВНИИГГ» имеет значительный опыт работ в Восточной Сибири, на шельфе Баренцева, Карского и Каспийского морей.

Институт обладает высоким научным потенциалом, в нем работают 10 докторов, 14 кандидатов наук, 1 действительный член и 2 члена-корреспондента РАН, 3 действительных члена Академии горных наук, 2 академика МАМР, 3 члена AAPG, 1 член Российской экологической академии.

Институт располагает надежной базой для научно-исследовательских работ, мощной информационной геологической и геофизической базой: полевые сейсмические записи, диаграммы ГИС (около 1,5 млн. км каротажа), патентные фонды (около 60 тыс. единиц учета), в том числе 150 собственных патентов и авторских свидетельств, научная библиотека (порядка 50 тыс. единиц хранения), кернохранилище (более 700 тыс. образцов керна, 100 тыс. литологических шлифов, 400 тыс. палеонтологических шлифов), справочно-информационный центр (более 220 тыс. единиц учета), уникальные палеонтологические коллекции института, коллекции образцов минералов, горных пород, нефтей, воды созданных на материале керна скважин, пробуренных за последние 50 лет.

Институт обладает современным программно-алгоритмическим обеспечением для интерпретации геофизических данных, моделирования бассейнов и резервуаров УВ. Созданная интегрированная интерпретационная технология на базе авторских разработок института и программных пакетов признанных мировых лидеров, таких, как HALLIBURTON, PARADIGM, LANDMARK, ROXAR, BEICIP-FRANLAB и др., обеспечивает создание постоянно действующих геологических моделей бассейнов, зон нефтегазоаккумуляции, площадей и месторождений углеводородов.

В АО «НВНИИГГ» разработана, документально оформлена, внедрена и поддерживается в рабочем состоянии система менеджмента качества с учетом всех требований ГОСТ Р ИСО 9001-2008 и специфики деятельности организации.

Институт организует крупные региональные совещания по обмену опытом и геологической информацией, по созданию региональных комплексных проектов проведения геофизических и буровых работ в пределах Российской Федерации и СНГ.

В 1991 году институт учредил и регулярно издает региональный научно-технический журнал «Недра Поволжья и Прикаспия», который освещает современные проблемы геологии, геохимии, промысловой и разведочной геофизики, бурения, охраны недр.

E-mail: director@nvniigg.san.ru
<http://www.nvniigg.ru/>

Современная технология поисков и разведки залежей СВН на основе комплекса геофизических методов

■ И.А. Титаренко, И.П. Соколова, А.В. Титаренко, АО Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, г. Саратов

В последние годы состояние минерально-сырьевой базы углеводородов характеризуется существенным снижением разведанных запасов и крайне низкими темпами их прироста. Перспективы добычи нефти и дальнейшее развитие ТЭК как в России, так и за рубежом, связываются с разработкой трудноизвлекаемых запасов, в том числе сверхвязких нефтей (СВН), которые могут рассматриваться как комплексное сырье, используемое в медицине, биотехнологиях, химических технологиях, микроэлектронике и других областях народного хозяйства.

На территории Российской Федерации основные перспективы поисков залежей СВН и природных битумов связаны с отложениями пермского возраста в центральной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (ВУНГП). Благоприятными условиями для постановки здесь соответствующих геологоразведочных работ являются малые глубины залегания битумоносных и нефтесодержащих пермских толщ, наличие горнодобывающих и нефтеперерабатывающих комплексов, развитая транспортная инфраструктура и др.

Доминирующим геофизическим методом поисковых работ на нефть и газ традиционно считается сейсморазведка МОГТ, призванная решать задачи по выделению в разрезе локальных структурных и литолого-фациальных неоднородностей, предопределивших формирование ловушек УВ различных генетических типов.

Однако, в деле изучения потенциально продуктивных верхнепермских отло-

жений она, по мнению большинства специалистов, неэффективна. Основная проблема здесь заключается в малых глубинах залегания верхнепермских отложений, требующих от сейсморазведки МОГТ получение геологически информативной сейсмической записи практически на начальных временах регистрации отражений, что само по себе сопряжено с определенными техническими трудностями.

Информативная запись на традиционных разрезах МОГТ, направленных на освещение перспективного девонско-каменноугольного интервала осадочного чехла, в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции начинается, как правило, на временах регистрации T_0 равных 200-300 мс и более. В тоже время, отражение от кровли вмещающих природные битумы на Аверьяновском месторождении Республики Татарстан казанских отложений теоретически может быть зарегистрировано на временах T_0 не превышающих 30-40 мс. То есть, для получения информации о геологическом строении битумонасыщенных песчаников Аверьяновского месторождения по сейсмическим данным, необходимо, чтобы эти данные имели достаточную степень кратности профилирования и информативную запись уже на временах $T_0 \leq 20-30$ мс, что является недостижимым для глубинно ориентированных систем наблюдения МОГТ, даже в случае целенаправленной переобработки этих материалов на уровне верхней части разреза с использованием самых современных методико-технологических возможностей (Рис. 1).

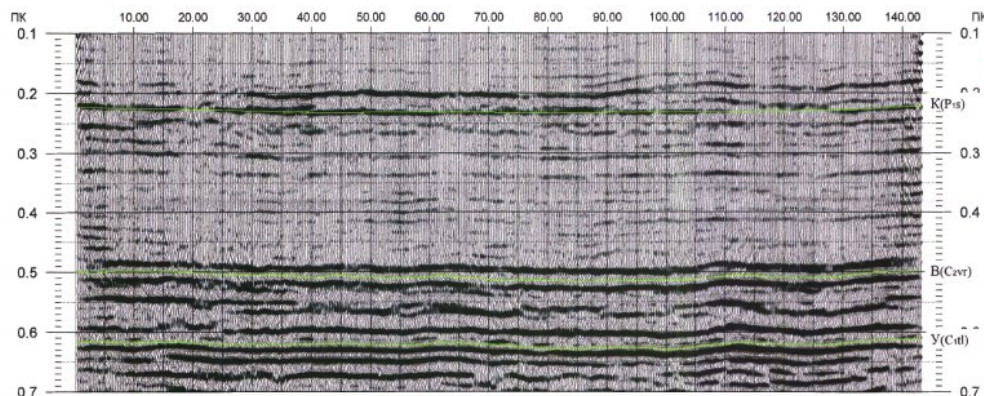


Рис. 1. Суммарный временной разрез по профилю 151012 (ОАО «Татнефте-геофизика»).

В рамках поиска оптимального решения данной проблемы в 2015 году по заказу Департамента по недропользованию по Приволжскому федеральному округу специалистами АО «НВНИИГГ» на территории двух небольших участков в западном секторе Республики Татарстан (на территории Мелекесской впадины) были проведены комплексные опытно-методические работы в объеме 100 пог. км в составе: малоглубинная модификация МОГТ-2D и электротомография.

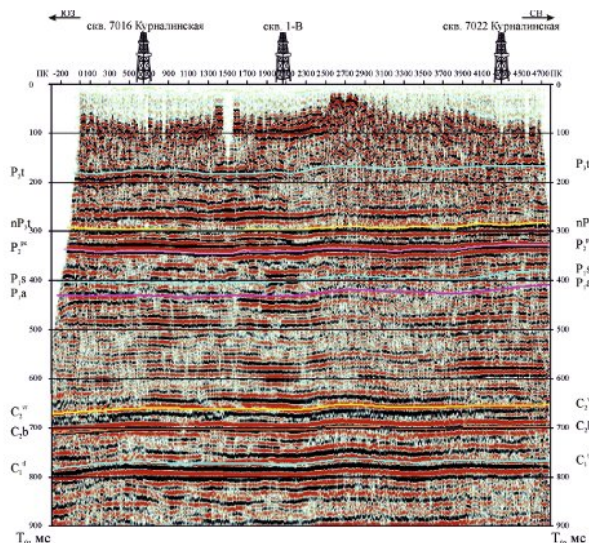
На этих участках в качестве полевой расстановки была использована центрально-симметричная система наблюдений со 120-ти кратным профилированием. Расстояние между пунктами возбуждения было выбрано равным 10 м, между пунктами приема – 5 м. Минимальное удаление «взрыв-прибор» составляло 10 м, максимальное – 1200 м. Возбуждение сейсмических колебаний осуществлялось электромагнитным импульсным источником «Енисей КЭМ-4» с напряжением заряда – 850 В. Для сбора данных использовалась бескабельная система SCOUT с 481 активным каналом. Регистрация сигналов проводилась одиночными сейсмоприемниками GS-One. Длительность регистрации составляла 2 с с шагом дискретизации записи равным 1 мс. Параллельно с работами МОГТ осуществлялось изучение скоростных неоднородностей в верхней части разреза методом прелом-

ленных волн (МПВ), на основе результатов которого впоследствии вычислялись значения априорных статических поправок в сейсмотрассы ОГТ.

Цифровая обработка полученных в поле сейсморазведочных данных выполнялась в обрабатывающем комплексе ECHOS/FOCUS 2D/3D компании Paradigm. При этом в целях максимального сохранения информации на уровне верхней части сейсмической записи, отвечающей отложениям послекунгурского возраста, включая потенциально насыщенные на территории Мелекесской впадины СВН и битумами приказанскую и пещищенскую толщи казанского яруса средней перми, к наблюдаемым в поле временам регистрации сигналов было прибавлена постоянная величина равная 200 мс. В результате этого отражения от целевых толщ на суммарных временных разрезах МОГТ по отработанным профилям стали фиксироваться на 200 мс ниже своего истинного положения, зато кратность суммирования сейсмической записи на их уровне составила 80 и более трасс.

Итогом такого нетрадиционного подхода к проведению сейсморазведочных работ МОГТ явилось получение таких временных разрезов, которые обеспечили надежное выделение и прослеживание отражающих границ не только в девонско-каменноугольном, но и в пермском интервале сейсмической записи, включая внутриформационные

отражения на уровне приказанской и пещищенской толщ (Рис. 2).



▲ Рис. 2. Суммарный временной разрез МОГТ по профилю 174-14-15 в пределах восточного участка опытно-методических работ.

Получение таких разрезов позволило осуществить полноценное решение структурной задачи на участках отработанных профилей и выполнить динамическую интерпретацию сейсмической записи в интервале пермских отложений по авторской технологии «Вероятностно литологического прогноза» (УВЛП) [1]. По линиям профилей были подготовлены прогнозные литолого-скоростные разрезы, отражающих характер распределения мощностей, литологических и стратигра-

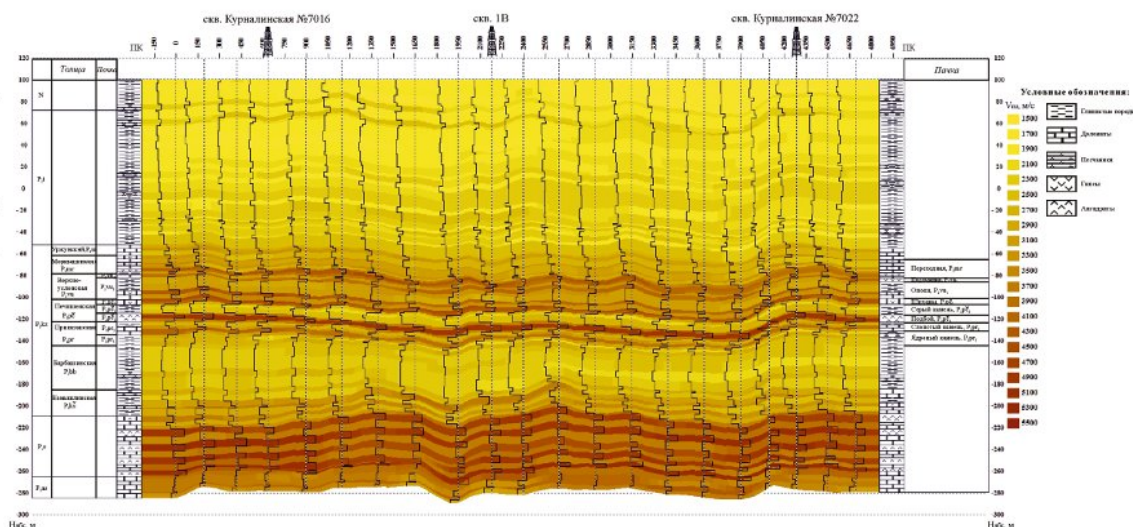
фических соотношений в соответствующей части осадочного чехла (Рис. 3).

Данная информация была использована на этапе комплексирования сейсморазведочных материалов с материалами электроразведки в едином координатном пространстве.

Электроразведка, как известно, является на сегодняшний день чуть ли не единственным наземным геофизическим методом, позволяющим с довольно высокой степенью успешности регистрировать эффекты от залежей углеводородов. Поскольку залежи СВН и битумов в отложениях пермской системы залегают на сравнительно небольших глубинах и сосредоточены в маломощных пластах, для выработки максимально надежных комплексных геофизических критериев их выявления электроразведочные работы проводились методом «электротомографии» по линиям сейсмических профилей МОГТ-2D.

Электротомография (Electrical resistivity tomography, resistivity imaging) – современное направление электроразведки методом сопротивлений. В отличие от классических методик вертикальных электрозондирований, в электротомографии за счет использования более плотных систем наблюдения осуществляется своеобразная «подсветка» геологических

► Рис. 3. Результат сейсмической динамической инверсии методом ©ВЛП по профилю 174-14-15 в пределах восточного участка опытно-методических работ.



объектов в земной коре с разных позиций источника и проецирование измененного объектом сигнала на приемные линии. Эта методика дает возможность значительно увеличить детальность и достоверность получаемой информации о характере распределения физических неоднородностей на уровне залегания отложений в верхней части разреза.

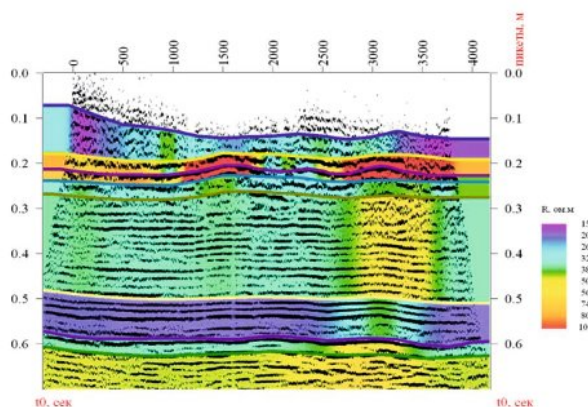
Существуют строгие физические предпосылки для решения задачи по прямому прогнозированию залежей УВ методами электроразведки. Залежь углеводородов можно рассматривать как аномальный по сопротивлению локальный объект, расположенный внутри нормального разреза сопротивлений. Характерные особенности электрических свойств пород в области расположения залежи вызываются целым рядом причин:

- изменением петрофизических свойств пород коллекторов;
- минерализацией подземных вод (ее резкое увеличение в приконтактных зонах газонефтяных залежей);
- непосредственным влиянием самой залежи, как локального высокоомного объекта;
- изменением физических свойств вмещающих пород под действием мигрирующих флюидов, в частности, образованием ореолов кальцитизации и пиритизации;
- наличием статической системы зарядов в области залежи и в приконтактных зонах.

Следует отметить, что изменения геоэлектрических параметров могут быть связаны не только с нефтеносностью, но и с другими физико-геологическими причинами. Поэтому для уменьшения степени неоднозначности прогнозных оценок интерпретация электроразведочных параметров проводится только в комплексе с данными сейсморазведки.

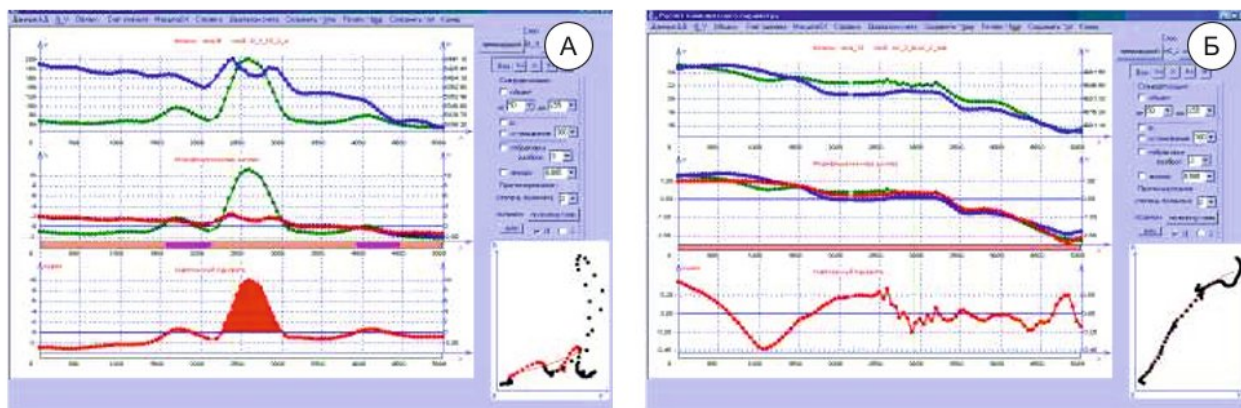
Эффективность такого подхода неоднократно доказана при поиске скоплений УВ в различных регионах ВУНГП. Комплексирование осуществляется уже на начальном этапе интерпретации путем перевода электроразведочных данных в масштаб временного сейсмического разреза и совместного анализа материалов двух независимых методов [2]. Результатом такого комплексирования является согласованная в двух геофизических полях модель изучаемого разреза.

В рамках этой модели среды осуществляется расчет продольного электрического сопротивления и прогнозных значений интервальной скорости, которые используются на этапе прогнозирования участков скопления углеводородов (Рис. 4).



▲ Рис. 4. Распределение интервального сопротивления на сейсмическом разрезе.

Авторская методика прогноза нефтегазоносности основана на различной чувствительности интервальной скорости и сопротивления к петрофизическим свойствам отложений и характеру их флюидонасыщения [3]. При отсутствии в разрезе залежи углеводородов графики интервальных скоростей и продольного сопротивления для определенного стратиграфического интервала разреза ведут себя синхронно, реагируя, в основном, на литолого-фациальную изменчивость отложений (Рис. 5А). В продуктивных интервалах разреза отмечается



▲ Рис. 5. Пример изменения интервальных параметров и КП в непродуктивном (А) и продуктивном (Б) интервалах разреза.

рассинхронизация графиков продольного сопротивления и интервальных скоростей: уменьшение значений интервальных скоростей, обусловленное разуплотнением пород (улучшением их коллекторских свойств), и увеличение значений кажущегося продольного сопротивления, связанного с присутствием в разрезе флюида (нефти или газа) с аномально высоким сопротивлением (см. Рис. 5Б).

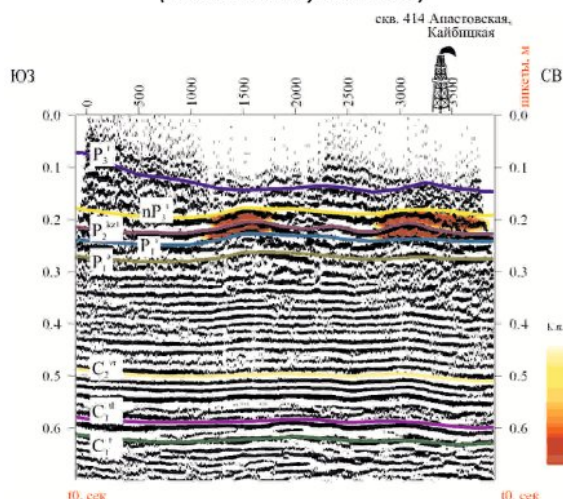
Это обстоятельство положено в основу способа, позволяющего учесть «литологическую» составляющую продольного сопротивления и изучать ту его часть, которая отражает характер флюидонасыщения. Эта составляющая названа авторами комплексным сейсмоэлектрораз-

дочным параметром (КП), положительные значения которого, превышающие фоновые в 2-5 раз, считаются аномальными, и указывают на возможное присутствие в разрезе высокоомных флюидов – углеводородов.

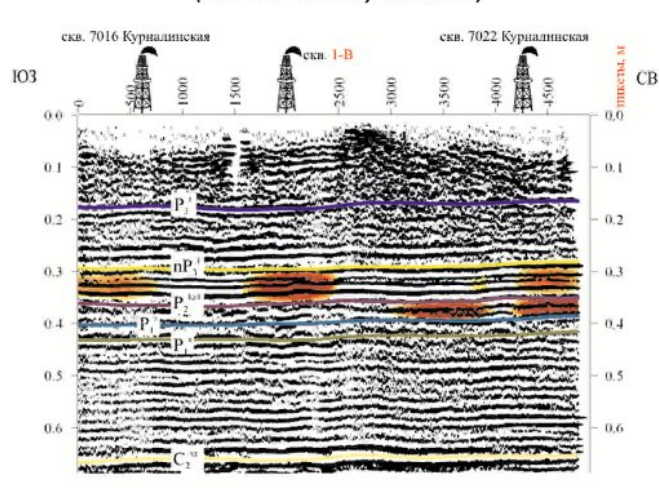
Проведенные в пределах опытных участков на территории Республики Татарстан опытно-методические работы показали хорошее соответствие аномалий комплексного сейсмоэлектрораздочного параметра продуктивным интервалам разреза. По итогам комплексных работ были намечены локальные участки, перспективные на вскрытие битумосодержащих пород пермского возраста (Рис. 6).

▼ Рис. 6. Аномалии КП на сейсмических временных разрезах по опытным профилям МОГТ.

Профиль № 174-14-03
(Западный участок)



Профиль № 174-14-15
(Восточный участок)



В целом, применение на опытных площадях Республики Татарстан разработанной в АО «НВНИИГГ» комплексной сейсмоэлектроразведочной технологии, включающей новые методические приемы проведения полевых работ и авторские наработки интерпретации полученных результатов, позволило получить доказательную базу возможностей ее успешного использования для решения задач поиска и разведки залежей УВ в пермском комплексе отложений. По итогам работ в отложениях пермского возраста спрогнозированы локальные участки, наиболее перспективные на обнаружение залежей СВН, продуктивность которых была подтверждена последующим бурением структурных скважин.

Литература

1. Скорнякова Е.Г., Титаренко И.А. Сейсмопетрофизическое прогнозирование методом ВЛП. «Геофизика, Технологии сейсморазведки II», специальный выпуск, 2003г.
2. Смилевцев Н.П., Соколова И.П.. Патент на изобретение №2155977 Способ геофизической разведки. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г. Москва, 10 сентября 2000г.
3. Смилевцев Н.П., Соколова И.П. Патент на изобретение №2154847 Способ геофизической разведки при поисках нефтегазовых месторождений. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г. Москва, 20 августа 2000г.

Подробнее об авторах



Титаренко
Игорь Анатольевич

заведующий отделом
геофизических
исследований
АО «НВНИИГГ»



Соколова
Ирина Петровна
заведующая сектором
обработки и интерпретации
данных несейсмических
методов разведочной
геофизики АО «НВНИИГГ»,
к.г.-м.н.



Титаренко
Алла Викторовна
заведующая сектором
современных технологий
интерпретации сейсмо-
разведочных данных
и материалов ГИС
АО «НВНИИГГ»

Генератор тока "SKAT II"

и измеритель "MEDUSA-B2"

для геофизических исследований методами постоянных и переменных токов:
ВЭЗ, ЕП, ЧЗ, ВП во временной и в частотной областях,
блуждающие токи и электротомография

Основные характеристики генератора	Значение
Максимальная выходная мощность, Вт	200
Диапазон величины выходного тока, мА	1 ... 1000
Максимальное выходное напряжение, В	± 750
Диапазон рабочих частот (первый набор), Гц	0.019 ... 625
Диапазон рабочих частот (второй набор), сек	0,5 ... 32
Относительная нестабильность установки частот	$\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$
Напряжение питания, В	20 ... 30
Диапазон рабочих температур, °С	минус 40...+60
Габаритные размеры, мм	212*77*235
Масса, кг	2,8



Основные характеристики измерителя	Значение
Количество измерительных каналов	два
Уровень собственных шумов, мкВ	< 1
Максимальное напряжение входного сигнала, В	± 10
Входное сопротивление по постоянному току, МОм	> 60
Диапазон рабочих частот, Гц	0.019 ... 625
Потребляемая мощность, Вт	< 3,5
Время непрерывной работы от внутреннего акк., ч	> 14
Диапазон рабочих температур, °С	минус 40 ... +70
Габаритные размеры, мм	210*110*70
Масса измерителя, кг	1,4

Научно-производственная компания

Сиб Теофиз Прибор

630058, г. Новосибирск, ул. Сиреневая, 29/1, тел.: +7 383 306 30 70, sgd@sibgeodevice.ru, www.sibgeodevice.ru

The background image shows a field with tall grass and a small pond. A large orange SCOUT seismic unit is positioned on the left, with a cable extending from it. The cable runs across the field and connects to a smaller blue unit on the right. The scene is illuminated with a warm, golden light, suggesting a sunset or sunrise.

SCOUT

Бескабельная сейсмосистема

SCOUT - это решение геофизических задач в области сейсморазведки, электроразведки и микросейсмики.

SCOUT работает в труднодоступных местах в комплексе с кабельной системой любого производителя.

Система оснащена всеми необходимыми инструментами контроля состояния полевых блоков и датчиков.

Диапазон рабочих температур от -40 до +70 °C.



**СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**
SKBSPRU

РОССИЙСКОЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ

Россия, 410019, г.Саратов, ул. Крайняя, 129, тел.: (8452) 53-45-06; 570-500, факс: (8452) 27-21-01

sales@skbsp.ru | www.skbsp.ru

Жизнь связала с сейсморазведкой?



Рекомендуем: новейшая беспроводная телеметрическая система **Sercel UNITE**



Предоставление в аренду полного спектра телеметрического оборудования Sercel 408/428; бескабельной системы UNITE. Техподдержка, сервис и обслуживание геофизического оборудования. Производство импульсных источников «Геотон»

Холдинг «ГЕОСЕЙС»
Контактная информация:
Тел. (Москва):
+7 (495) 694-19-07
+7 (495) 694-19-97
Тел. (Тюмень):
+7 (3452) 48-33-72

Электронная почта:
geoton@geoton.ru
geoseis-servis@yandex.ru
geoseisltd@gmail.com
http:
www.geoseisholding.ru
www.geoton.ru