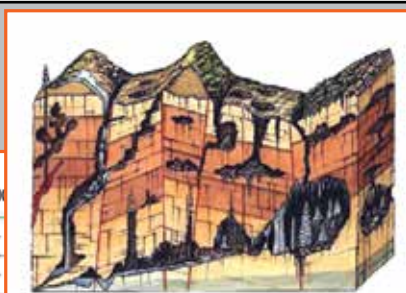


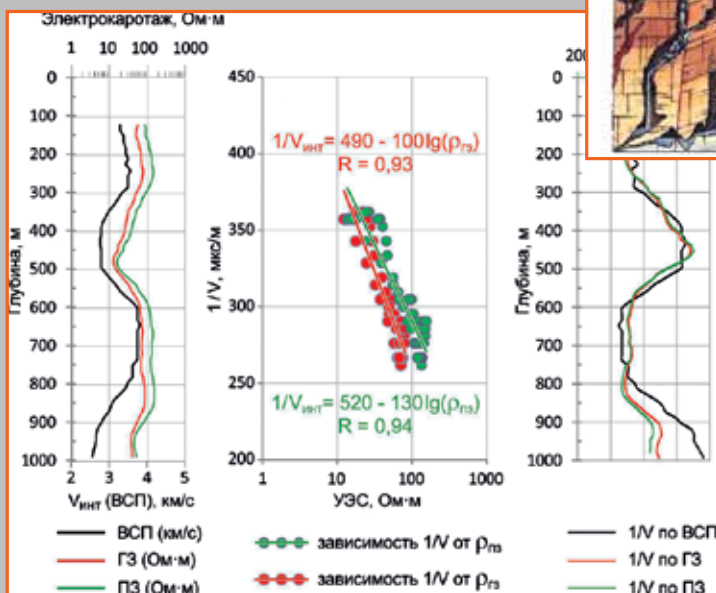


4.2019 Геофизика

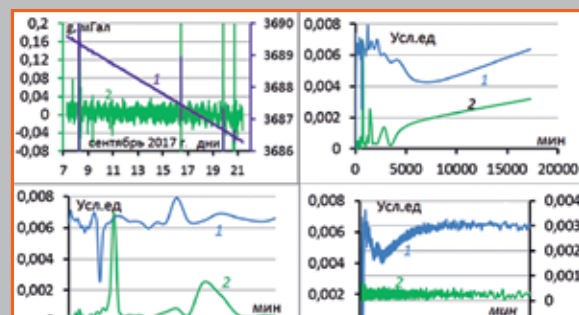
Пример определения корреляционной связи удельного электрического сопротивления (УЭС) и интервальных скоростей (V) по данным каротажа скважины Логатская-361



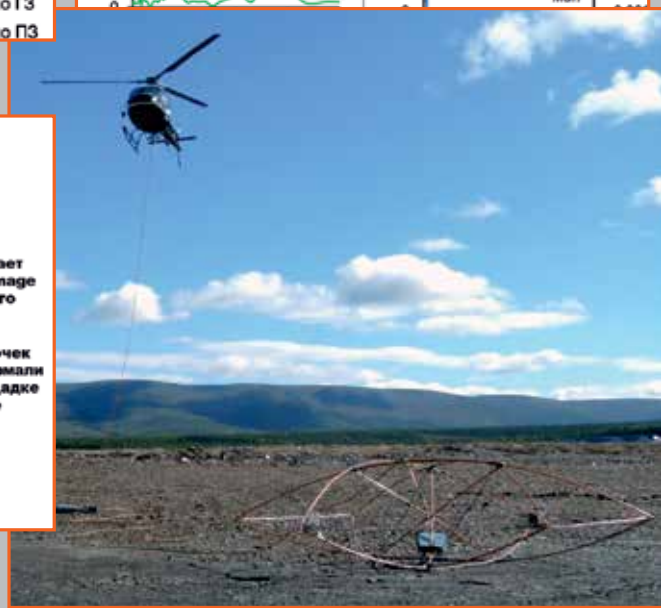
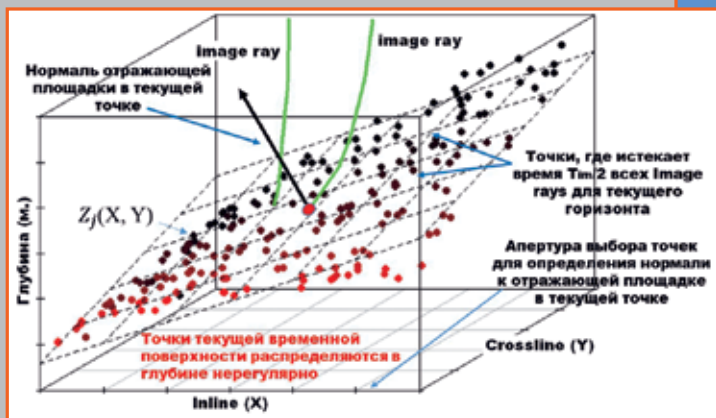
Схематическая модель макрокаверн и трещин как продуктов образования карстовых воронок по разломам в рифовых постройках и над ними



Периодограммы неприливной вариации силы тяжести до и после исключения данных о землетрясениях



Определение нормалей к отражающим площадкам в глубине с помощью линейной регрессии



Комплекс «Экватор» на съемке месторождения Сухой Лог в Иркутской области (2019 г.)

1

2

3

4

5

6

ГеоЕвразия

Geo Eurasia
2020

Международная геолого-геофизическая конференция и выставка
«Современные технологии изучения и освоения недр Евразии»

НАПРАВЛЕНИЯ ПРОГРАММЫ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НЕФТЕГАЗОВОЙ
ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РУДНОЙ
ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ
ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

ДЛЯ ДОКЛАДЧИКОВ

- 25 сентября Окончание приема кратких аннотаций;
25 октября Оповещение авторов о включении
в программу;
1 декабря Публикация предварительной программы.

ДЛЯ УЧАСТНИКОВ

- 25 сентября Окончание льготной регистрации;
25 декабря Окончание предварительной регистрации;
3-6 февраля Регистрация на месте.

ДЛЯ ЭКСПОНЕНТОВ ВЫСТАВКИ

- 25 августа Окончание бронирования выставочных
площадей по льготной цене;
1 декабря Окончание бронирования
выставочных площадей.

ОРГАНИЗАТОР



ООО «ГеоЕвразия»
www.geoea.ru

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дата проведения конференции	3-6 февраля 2020 г.
Дата проведения выставки	3-5 февраля 2020 г.
Место проведения	Центр международной торговли, г. Москва
Ожидаемое количество участников	1000
Площадь выставки	1200 м ²

3-6 февраля 2020 | ЦМТ (Краснопресненская набережная, 12) | Москва

www.gece.moscow | info@gece.moscow | +7 (495) 765 23 64



СОДЕРЖАНИЕ

Д.В. Яковлев, С.А. Каплан, В.П. Клокова, Е.Ю. Соколова, А.Л. Шпекторов, Г.Е. Слинчук
Построение скоростной модели верхней части разреза в условиях распространения многолетнемерзлых пород с учетом данных наземной электроразведки 2

О.О. Литвякова, С.Н. Птецов, Е.М. Вороновичева
Технологии обработки и анализа отраженных волн с целью описания трещиноватости карбонатных резервуаров на основе 3D-сейсморазведки и бурения 9

Д.А. Неклюдов, М.И. Протасов, К.Г. Гадильшин, Н.Г. Исаков
Алгоритм 3D кинематической томографии на отраженных волнах для построения начальной скоростной модели для миграционного скоростного анализа 14

А.С. Гриневский, Д.Е. Мирошниченко, И.Н. Керусов, Н.В. Шалаева
Методические особенности азимутальной AVA-инверсии на примере месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции 22

А.С. Гаркин
Амплитудно-фазовая коррекция сейсмического импульса, основанная на модели 30

В.В. Попов, Н.Е. Фоменко, А.С. Коваленко
Импульсный нейтронный каротаж – перспективный метод новых комплексов геофизических исследований скважин на угольных месторождениях 37

А.М. Петрищевский
Рифтогенные структуры и нефтегазоносность в реологических гравитационных моделях земной коры 42

В.М. Керцман, Е.В. Мойланен, Ю.Г. Подмогов
Возможности аэрогеофизики при поисках золоторудных месторождений различного типа 52

К.М. Ермохин
Метод определения структуры внутреннего магнитного поля Земли 60

Ю.В. Антонов, А.К. Рыбин, В.Е. Матюков
Спектральный анализ неприливных вариаций электромагнитного и гравитационного полей 63

CONTENTS

D.V. Yakovlev, S.A. Kaplan, V.P. Klokova, E.Yu. Sokolova, A.L. Shpektorov, G.E. Slinchuk
Construction of seismic velocity model using electromagnetic data on permafrost layer 2

O.O. Litviakova, S.N. Ptetsov, E.M. Voronovicheva
A new approach to imaging and analysis of seismic reflection and well data for prediction of fractured areas 9

D.A. Necklyudov, M.I. Protasov, K.G. Gadyl'shin, N.G. Isakov
Algorithm of 3D reflection tomography for building an initial velocity model for migration velocity analysis 14

A.S. Grinevskiy, D.E. Miroshnichenko, I.N. Kerusov, N.V. Shalaeva
Methodological aspects of azimuthal AVA inversion: a West Siberian case study 22

A.S. Garkin
Model-based amplitude phase correction 30

V.V. Popov, N.E. Fomenko, A.S. Kovalenko
Pulsed-neutron logging – perspective method of the new complexes of the geophysical well researches on coal deposits 37

A.M. Petrishchevsky
Rift structures and oil-gas bearing in the gravity rheological models of the crust 42

V.M. Kertsman, E.V. Moilanen, Yu.G. Podmogov
Possibilities of airborne geophysics for gold-ore deposits of different type 52

K.M. Ermokhin
Method for determining the structure of the Earth's internal magnetic field 60

Yu.V. Antonov, A.K. Rybin, V.E. Matiukov
Spectral analysis of non-tidal variations of the gravitational and electromagnetic fields 63

ДИСКУССИИ, ОБСУЖДЕНИЯ

В.С. Могилатов, А.В. Злобинский
Оперативное математическое обеспечение трехмерного подхода в электромагнитных зондированиях становлением поля 70

V.S. Mogilatov, A.V. Zlobinskiy
Operative software for the three-dimensional approach in transient electromagnetic method (TEM) 70

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: А.А. НИКИТИН

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛ. РЕДАКТОРА: Л.А. Золотая, А.В. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: В.Ю. Абрамов, И.А. Безрук, Ю.И. Блох, М.Л. Владов, Е.А. Давыдова, М.С. Денисов, Г.М. Золоева, С.А. Кириллов, А.С. Лаврик, И.Н. Модин, И.А. Мушин, В.И. Петерилье, Е.Е. Поляков, С.Н. Птецов, В.И. Рыжков, Р.Б. Сержантов, В.П. Цирульников, Р.А. Шакиров, В.А. Шевнин

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЕАГО:

115191, г. Москва, ул. 2-я Рощинская, д. 10
Тел. (495) 952-47-15, тел./факс (495) 952-44-79
E-mail: journal@eago.ru
www.moeeago.ru, geofdb.com
Свидетельство о регистрации журнала № 0110923 от 21.07.1993
ISSN 1681-4568

ООО «ПолиПРЕСС»:

Е.Н. Васильева – компьютерная верстка
И.Г. Чижикова – корректура
170041, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 7, пом. II
Тел./факс (4822) 55-16-76
E-mail: polypress@yandex.ru; www.poly-press.ru
Отпечатано в ООО «ПолиПРЕСС»
Тираж 250 экз. Заказ № 7352

УДК 550.834, 551.345, 550.837

ПОСТРОЕНИЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Д.В. Яковлев¹, С.А. Каплан², В.П. Клокова²,
Е.Ю. Соколова^{2, 3}, А.Л. Шпекторов², Г.Е. Слинчук⁴

¹ ООО «Северо-Запад». 108811, Россия, г. Москва, 22-й км Киевского шоссе, бизнес-центр «Румянцево», корп. А, офис 412а; e-mail: nw.yakovlev@gmail.com

² Отделение ВНИИГеосистем ФГБУ «ВНИГНИ». 117105, Россия, г. Москва, Варшавское ш., д. 8; e-mail: lab6-vniigeosistem@yandex.ru

³ ИФЗ РАН. 123242, Россия, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1; e-mail: sokol_l@mail.ru

⁴ МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

Аннотация. *Породы зоны многолетней мерзлоты, занимающей около 60% территории России, по своим физическим свойствам отличаются от талых аналогов. Сейсмические скорости и удельное электрическое сопротивление возрастают в мерзлых породах. При построении моделей глубинного распределения сейсмических скоростей необходимо учитывать искажения, вносимые высокоскоростными слоями вечной мерзлоты, которые к тому же характеризуются боковой неоднородностью (талики) и переменной мощностью. Геоэлектрические разрезы, построенные по линиям сейсмических профилей, позволяют определять изменения глубины подошвы слоя многолетней мерзлоты. Кроме того, основываясь на известных (региональных, литературных и каротажных данных) и новых экспериментально установленных локальных корреляционных зависимостях между сопротивлением и сейсмическими скоростями, можно определить начальные скорости плохо разрешимых приповерхностных сейсмических горизонтов для их использования в дальнейшем при моделировании и инверсии. В статье предлагается методика использования электроразведочных данных о строении слоя многолетней мерзлоты при построении уточненных глубинно-скоростных разрезов по линиям сейсмических профилей МОВ-ОСТ. Основой для ее разработки послужили данные комплексных региональных геофизических работ, проводимых в настоящее время в восточной части Енисей-Хатангского регионального прогиба с целью выявления перспективных нефтегазоносных зон.*

Ключевые слова. *Сейсморазведка МОВ-ОСТ, МОГТ, магнитотеллурические зондирования, многолетнемерзлые породы, поправки в скоростные модели за ВЧР, Енисей-Хатангский региональный прогиб, нефтегазопоисковый геофизический комплекс.*

CONSTRUCTION OF SEISMIC VELOCITY MODEL USING ELECTROMAGNETIC DATA ON PERMAFROST LAYER

D.V. Yakovlev¹, S.A. Kaplan², V.P. Klokoval², E.Yu. Sokolova^{2, 3}, A.L. Shpektorov², G.E. Slinchuk⁴

¹ North-West Ltd. 108811, Russia, Moscow, 22nd km Kievskoye shosse, Business centre Rumyancevo, office 412a; e-mail: nw.yakovlev@gmail.com

² Department VNIIGeosystem FGBU VNIIGNI. 117105, Russia, Moscow, Varshavskoye shosse, 8; e-mail: lab6-vniigeosistem@yandex.ru

³ IFZ RAS. 123242, Russia, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1; e-mail: sokol_l@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University. 119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory, GSP-1

Abstract. *Permafrost rocks, which cover about 60% of the territory of Russia, differ in their physical properties from thawed counterparts. Seismic velocities and electrical resistivity increase significantly in frozen rock. When building models of the depth distribution of seismic velocities, special consideration is needed for the distortions introduced by high-speed permafrost strata, which are also characterized by lateral heterogeneity (taliks) and variable thickness. Goelectrical sections constructed along the lines of seismic profiles allow us to determine the variations in thickness of the permafrost layer. In addition, basing on known (regional, literary and well-logging data) and newly established correlation dependences between resistance and seismic velocities, it is possible to determine the initial velocities of the highest, unresolved, horizons for their usage in seismic modeling and inversion. The geophysical data obtained in the Eastern part of the Yenisei-Khatanga regional trough, located in the center of Taimyr peninsula, served as a ground material for elaboration of the methodology of the electrical exploration data on the structure of the permafrost implementation for the seismic exploration section construction. Regional geophysical work is currently being carried out in this area in order to identify oil and gas prospective zones.*

Key words. *CCP seismic explorations, magnetotelluric soundings, permafrost rocks, seismic velocity model corrections for upper section part heterogeneity, Yenisei-Khatanga regional trough, geophysical complex for oil and gas explorations.*

ВВЕДЕНИЕ. Многолетнемерзлые породы (ММП), которые покрывают около 60% территории России, отличаются по своим физическим свойствам от талых аналогов. Сейсмические скорости и электрическое сопротивление значительно увеличиваются в мерзлой породе, что обусловлено прежде всего изменением агрегатного состояния поровой влаги, занимающей относительно большой объем

в приповерхностных горизонтах любых литотипов, а также температурной зависимостью свойств минерального скелета [Фролов, 1998]. Эта ситуация существенно отлична от представлений о верхней части разреза (ВЧР), обычно используемых в сейсмических исследованиях. Согласно им, модель ВЧР, как правило, двуслойная, включающая зону малых скоростей (ЗМС) и подстилающего ее

относительно высокоскоростного слоя. Для определения характеристик такой модели служат времена годографов прямых и преломленных волн в первых вступлениях, определяемых по сейсмограммам общего пункта возбуждения при стандартных наблюдениях (МОВ-ОСТ) или специальных – МПВ. На их основе рассчитываются статические поправки до линии приведения, задаваемой в пределах второго слоя, в предположении о вертикальности распространения лучей сейсмических волн в ЗМС независимо от удаления источник – приемник. В условиях развития ММП такая модель неприменима, даже в разрывах сплошности ММП – в таликах, в которых величины скорости распространения волн близки к их значениям в подстилающем слое. Связано это с тем, что, во-первых, на кровле слоя под ММП не формируется преломленная волна с высокой граничной скоростью (головная волна) и, во-вторых, в зоне ММП лучи сейсмических волн отклоняются от вертикали и тем значительнее, чем больше удаление источник – приемник. В этих условиях восстановление характеристик подобной высокоскоростной ВЧР по сейсмическим данным весьма затруднено, а их значения необходимы при построении методики расчета статических поправок и при определении скоростных характеристик всего комплекса осадочных пород.

При региональных исследованиях, проводимых по заказу Роснедр, помимо сейсмических работ, выполняются и электроразведочные исследования методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по единой совокупности линейных профилей. По результатам МТЗ возможно получение достоверной и достаточно детальной информации о вариациях глубины подошвы и величин удельного сопротивления (УЭС) толщи ММП [Яковлев и др., 2018]. Тем самым создаются предпосылки для построения сейсмической модели ВЧР в процессе совместной (интегрированной) обработки данных МОВ-ОСТ и МТЗ.

Методика учета толщи ММП

В рассматриваемой методике совместной обработки данных МОВ-ОСТ и МТЗ в условиях существования ММП определение сейсмических характеристик ВЧР строится с учетом оценок параметров пластовой глубинно-скоростной модели (ПГСМ) [Веденяпин и др., 2018], получаемых, в частности, в системе Prime [Лангман С.Л., Силаенков О.А., 2011]. Обратим внимание, что ПГСМ, наряду с динамическими разрезами (временными и глубинными), является основным результатом сейсмических исследований, структурно и вещественно характеризующих осадочные комплексы отложений. В условиях малочисленности глубоких скважин или их полного отсутствия на региональном этапе наличие ПГСМ особенно важно и имеет самостоятельное значение.

Методика учета строения толщи ММП по электроразведочным данным состоит из трех этапов.

Первым этапом в методике является обобщение имеющейся информации о данных АК и/или ВСП

и электрического каротажа скважин, расположенных на территории исследований и сопредельных площадях. При этом эти данные подлежат осреднению на интервалах глубин, соответствующих разрешающей способности сейсмического метода при решении обратных кинематических задач (от десятков до первых сотен метров). По результатам обобщения устанавливаются величины параметров зависимости между значениями скоростей распространения продольных волн (V) и УЭС (ρ) в изучаемой среде, определяемой эмпирически, в частности, по формуле (1):

$$1/V = \alpha - \beta \cdot \lg \rho, \quad (1)$$

где α и β – константы.

Учитывая градиентный характер изменения электрических и акустических свойств в окрестности подошвы ММП, эффективное положение ее по глубине может быть оценено по сопоставлению данных МТЗ и сейсморазведки, составляющее содержание представленного ниже второго этапа методики.

Вторым этапом в методике является анализ значений УЭС в пределах ВЧР и связанных с ними толщин верхнего слоя, в пределах которого развиты ММП. Цель этого этапа – определить пороговое значение УЭС в верхнем высокоомном слое, соответствующее мощности первого, высокоскоростного слоя ПГСМ. Изменяя пороговые значения УЭС, получаем набор соответствующих им глубин прогнозируемой подошвы ММП и осредненных значений УЭС в ее пределах. По установленной конкретной зависимости (1) прогнозируются значения интервальных скоростей в первом, приповерхностном слое, с учетом которого по сейсмическим данным рассчитывается вариант ПГСМ от уровня дневной поверхности (обращаем внимание на то, что попутно тем самым решается проблема выбора линии приведения в условиях высокоскоростной ВЧР). Критерием оптимального выбора варианта оценки мощности ММП и, соответственно, порогового УЭС из нескольких возможных служит выдержанность значений скоростей во втором, подмерзлотном слое в процессе построения ПГСМ для каждого из вариантов.

Третьим этапом методики является расчет скоростных характеристик слоя ММП по всей сети профилей с увязкой на их пересечениях с последующим построением ПГСМ.

Экспериментальные данные

В качестве полигона для опробования методики учета электроразведочных данных о строении ММП при построении скоростных сейсмических разрезов была выбрана центральная часть Таймырского региона в пределах Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП), где практически повсеместно присутствует мощная зона ММП. Общая протяженность используемых геофизических профилей превышает 3000 пог. км (рис. 1).

Основу геофизического комплекса составляют сейсморазведка (метод общей глубинной точки – МОГТ 2D) и электроразведка методом маг-

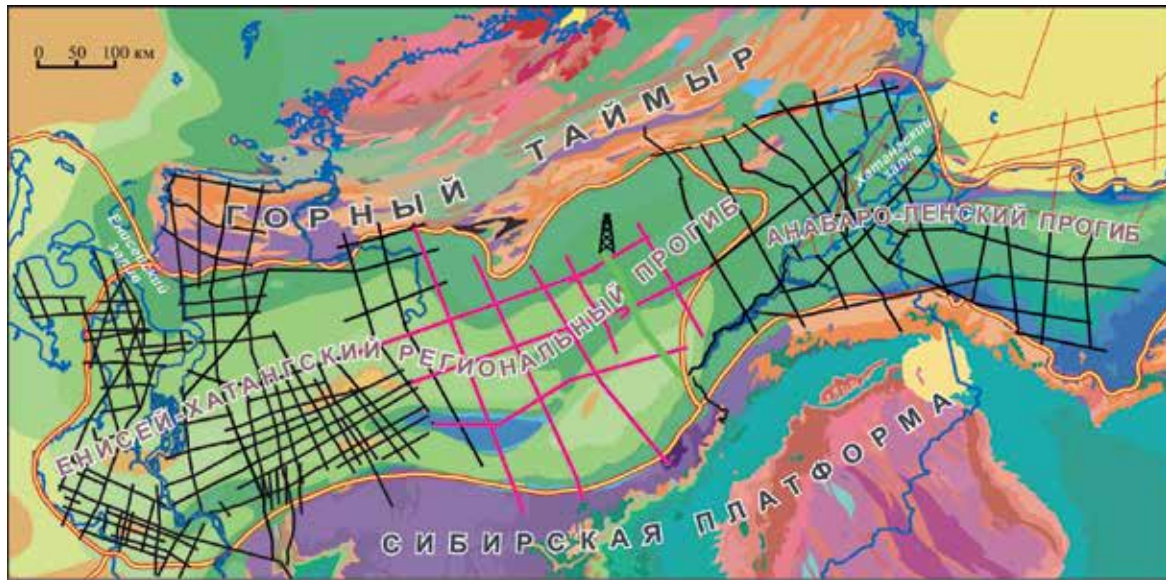


Рис. 1

Положение на геологической карте Таймырского региона региональных геофизических профилей, используемых для анализа соотношений электрического сопротивления и сейсмических скоростей в толще ММП

нитотеллурического зондирования (МТЗ). МТЗ-зондирования нацелены на изучение особенностей состава и строения юрско-меловых толщ и изучение палеозойских комплексов [Афанасенков, Яковлев, 2018]. В то же время полученные результаты по региональной сети профилей показывают, что метод

МТЗ в современном исполнении также позволяет изучать строение криолитозоны: определять мощность толщ пород в мерзлом состоянии, выявлять неоднородность их строения, обнаруживать подмерзлотные аномалии, которые могут быть связаны с углеводородами (УВ) [Яковлев и др., 2018].

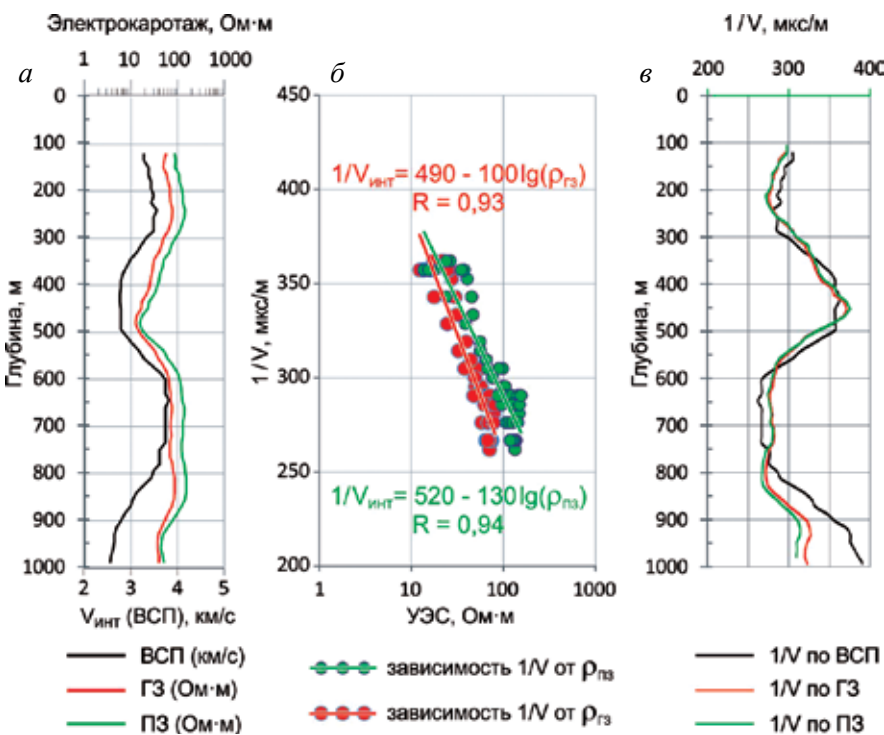


Рис. 2

Пример определения корреляционной связи удельного электрического сопротивления (УЭС) и интервальных скоростей (V) по данным каротажа скважины Логатская-361 (положение см. на рис. 1).

а – исходные осредненные каротажные диаграммы,
б – графики зависимости 1/V от УЭС,
в – сопоставление графиков параметра 1/V по ВСП с расчетными по УЭС

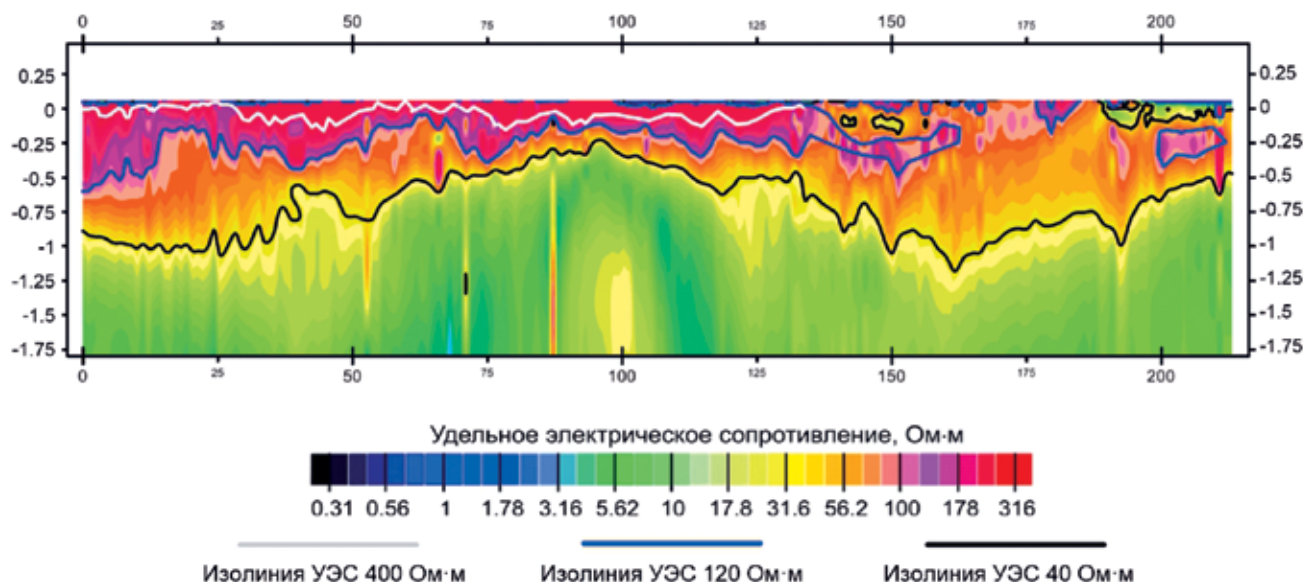


Рис. 3

Выделение слоев с различными пороговыми значениями УЭС в пределах толщи многолетнемерзлых пород по профилю 601 (положение см. на рис. 1) Восточно-Таймырской площади Енисей-Хатангской НГО

На первом этапе построения сейсмической модели ВЧР по скважинным данным была проанализирована зависимость интервальной скорости (V) от УЭС (ρ) для верхних слоев разреза, включая ММП. Так, для условий ЕХРП проведенное в отдельных скважинах сопоставление данных ВСП, полученных с шагом 15 м по глубине, со сглаженными по глубине кривыми электрического каротажа в зоне ММП показало удовлетворительную их сходимость (рис. 3). Это позволило спрогнозировать зависимость (1) значений медленности распространения волн в ММП ($1/V$) от величин электрического сопротивления (потенциал-зонд или двухметровый градиент-зонд), необходимую для определения характеристик зоны ММП по комплексу данных МТЗ и сейсморазведки МОВ-ОСТ. При этом в большинстве случаев использовались данные потенциал-зонда как наиболее распространенного метода на изучаемой территории. Отличия в прогнозе значений медленности по градиент-зонду характеризуются: смещением – 0,4 мкс/м и среднеквадратичным отклонением – 6,5 мкс/м, что составляет менее 2% от прогнозируемой медленности. Опробование установленной зависимости на данных других скважин, исследованных ВСП, показало достаточно удовлетворительную сходимость в прогнозе медленности – коэффициент корреляции 0,83.

Следующий этап построения сейсмической модели ВЧР – определение по электроразведочным данным мощности первого, высокоскоростного слоя. В упомянутой работе [Яковлев и др., 2018] для района опробования методики проведен анализ характера изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) при переходе к отрицательным температурам для терригенных юрско-меловых отложений, слагающих верхнюю часть разреза в пределах большей части территории ЕХРП. Согласно результатам анализа для ММП значения УЭС находятся в диапазоне от 7–30 до 100–500 Ом·м. При

этом по имеющимся геотермическим измерениям в скважинах для различных литотипов пород и минерализации поровой влаги были выявлены корреляция глубины подошвы толщи ММП с изолиниями 30–40 Ом·м и вариации мощности этого слоя, составляющие от десятков метров (в западном и центральном частях прогиба) до одного километра. Большие мощности ММП связаны с более песчанистыми (более высокоомными в мерзлом состоянии) породами в верхних горизонтах, которые распространены в восточной части прогиба.

На основе результатов проведенного анализа на начальном этапе мощность первого слоя ПГСМ соответствовала глубине залегания подошвы толщи ММП на карте, построенной по профильным изолиниям УЭС 30–40 Ом·м (из работы [Яковлев и др., 2018]), а затем и по большим пороговым значениям УЭС (рис. 3). Как уже сказано выше, критерием оптимального выбора порогового УЭС для оценки мощности ММП из нескольких возможных вариантов служит выдержанность значений скоростей во втором, подмерзлотном слое в процессе построения ПГСМ. После перебора нескольких вариантов в качестве оптимального был выбран порог фиксации неоднородностей выше эмпирической границы УЭС = 120 Ом·м (включая талики).

Таким образом, на втором этапе по электроразведочным данным была определена эффективная толщина первого, высокоскоростного слоя ПГСМ.

Учет характеристик слоя, соответствующего ММП по данным электроразведки, при построении ПГСМ приводит к получению нового варианта модели с возможным изменением состава слоев при неизменности, естественно, модели эффективных скоростей. Из сопоставления полученных вариантов ПГСМ (рис. 4) следует, что при задании верхнего слоя с характеристиками ММП, полученными в соответствии с описанной методикой, вариант ПГСМ (б) отличен в целом от варианта, рассчитанного только

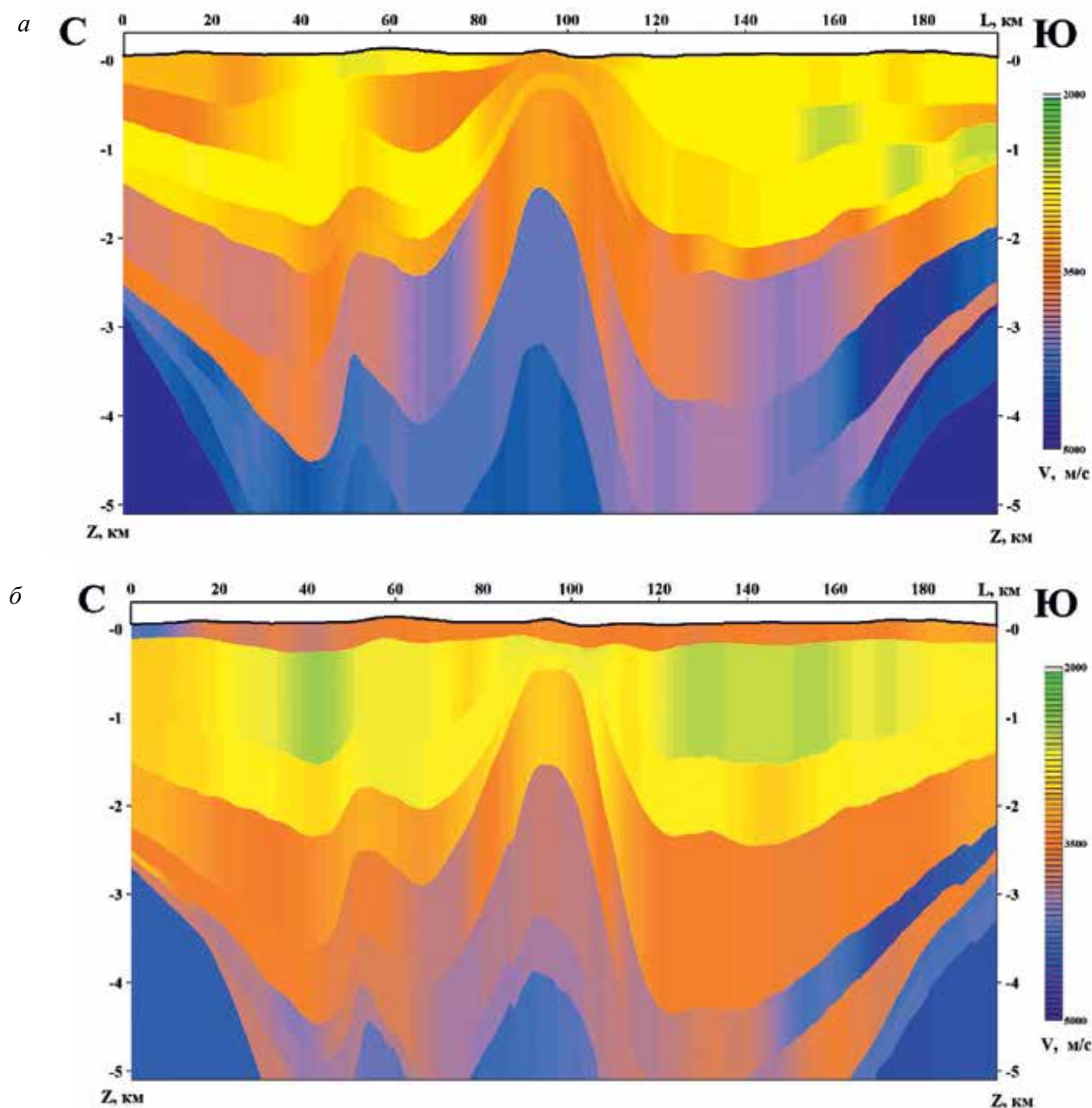


Рис. 4

Сопоставление глубинно-скоростных моделей по профилю 601 (положение см. на рис. 1) Восточно-Таймырской площади Енисей-Хатангской НГО, построенных только по сейсмическим данным (а) и с учетом слоя ММП, восстановленного по данным МТЗ (б)

по сейсмическим данным (а), большей регулярностью значений интервальных скоростей по профилю. При этом наибольший эффект связан с верхними тремя слоями, что иллюстрируется гистограммами значений интервальных скоростей в слоях, соответствующих ММП и подстилающих (рис. 5).

Слой ММП, построенный только по сейсмическим данным, характеризуется относительно меньшими значениями скоростей – гистограмма (а) на рис. 5, что связано прежде всего с включением в него части подмерзлотных пород, также с низкой точностью оценок скоростей. Слой ММП с характеристиками, прогнозируемыми по данным МТЗ (гистограмма (б)), отличается более высокими значениями скоростей и большим диапазоном их изменений. В связи с этим подмерзлотный слой характе-

ризуется существенно более ограниченным диапазоном изменения скорости (гистограмма (в)).

При опробовании предлагаемой методики этап подготовки электроразведочных материалов для прогноза значений скорости по данным МТЗ был реализован в системе ГИС INTEGR0 [Черемисина и др., 2018] и включал следующую последовательность шагов:

- 1) генерализация выбранной изолинии УЭС (120 Ом·м) по электроразведочным разрезам вдоль сейсмических профилей;
- 2) построение зависимостей по профилям медианно-осредненных УЭС по слою, ограниченному снизу этой изолинией;
- 3) построение изоповерхности УЭС 120 Ом·м по площади исследования.

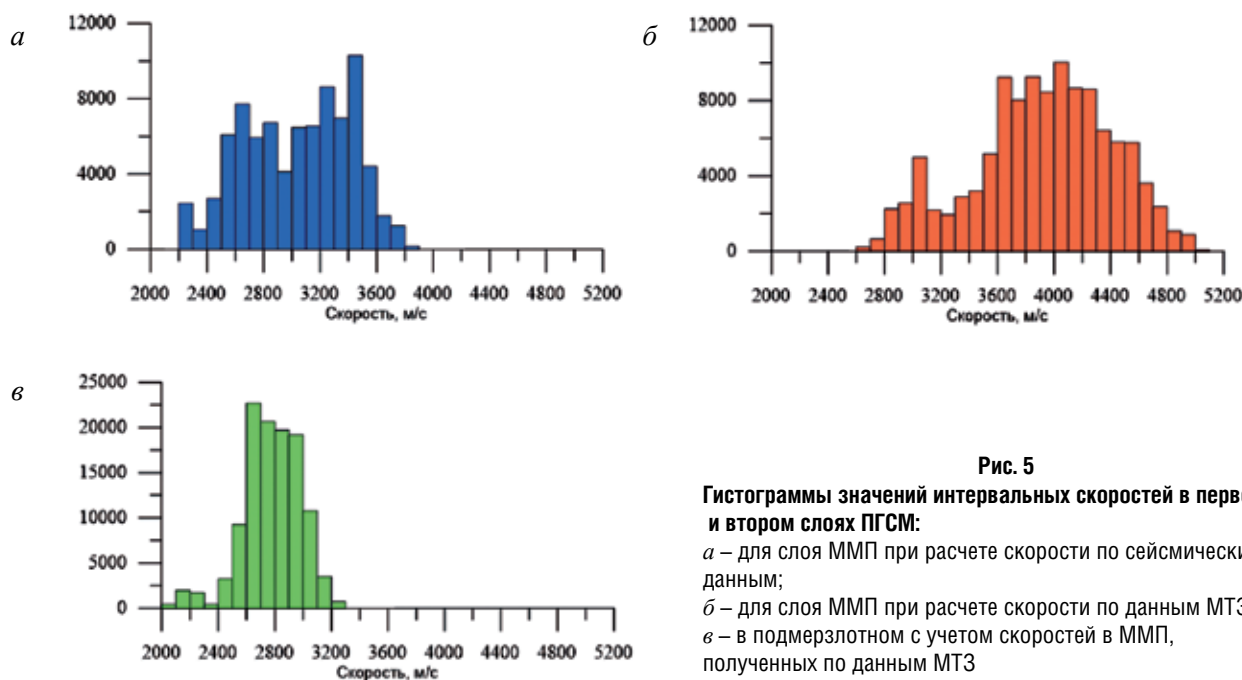


Рис. 5

Гистограммы значений интервальных скоростей в первом и втором слоях ПГСМ:

a – для слоя ММП при расчете скорости по сейсмическим данным;

б – для слоя ММП при расчете скорости по данным МТЗ;

в – в подмерзлотном с учетом скоростей в ММП, полученных по данным МТЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Подводя итог изложенному, констатируем:

- предложена методика совместной обработки данных сейсморазведки и электроразведки, получаемых на региональном этапе исследований на нефть и газ, обеспечивающая устойчивое построение скоростной модели верхней части разреза (ВЧР) в условиях развития многолетнемерзлых пород (ММП);

- в составе методики предложены процедуры пересчета данных МТЗ в прогнозные значения интервальных скоростей в толще ММП, а также критерии

оптимальности выбора характеристик ММП средствами итеративной оценки значений интервальных скоростей;

- апробация методики, проведенная на материалах обработки комплекса данных МОВ-ОСТ и МТЗ, полученных на региональных профилях восточной части Енисей-Хатангского регионального прогиба, показала, что благодаря ее применению удалось построить пластовые глубинно-скоростные модели, в которых влияние изменчивости скоростной характеристики ВЧР на интервальные скорости в последующих слоях модели было исключено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасенков А.П., Яковлев Д.В. Применение электроразведки при изучении нефтегазоносности Северного обрамления Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 7. С. 1029–1049.
2. Веденяпин О.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., Рок В.Е. Методические и технологические аспекты полномасштабного моделирования в обработке сейсмических данных // Геоинформатика. 2018. № 3. С. 45–58.
3. Лангман С.Л., Силаенков О.А. Кинематико-динамическое преобразование – инструмент параметризации wavefield волнового поля // Конференция «Геомодель-2011», Геленджик. 11–15 сентября 2011 г.
4. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
5. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Любимова А.В. ГИС INTEGRO – импортзамещающий программно-технологический комплекс для решения геолого-геофизических задач // Геоинформатика. 2018. № 3. С. 8–17.
6. Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 5. С. 77–95.

REFERENCES

1. Afanasenkov AP, Yakovlev DV. Application of electrical prospecting for studies of the Siberian platform oil and gas potential. *Geology and Geophysics*. 2018; 59(7): 1029–1049 (in Russian).
2. Vedenyapin OA, Kaplan SA, Lebedev YeB, Rok VYe. Methodical and technical aspects of full-wave modeling in seismic data processing. *Geoinformatika*. 2018; (3): 45–58 (in Russian).
3. Langman SL, Silayenkov OA. Kinematic-dynamic transformation as an instrument of full-wave field parameterization. Proceedings of Geomodel-2011 conference, Gelendzhik, 11–15 September 2011 (in Russian).
4. Frolov AD. Electrical and elastic properties of ice and frozen rocks. A.D. Frolov. Pushchino, ONTI PNTS RAN, 1998, p. 515 (in Russian).
5. Cheremisina YeN, Finkelshtein MYa, Lyubimova AV. GIS INTEGRO – import substituting software and technological complex for geological and geophysical problem solutions. *Geoinformatika*. 2018; (3): 8–17 (in Russian).
6. Yakovlev DV, Yakovlev AG, Valyasina OA. Permafrost studies in the Northern framing of Siberian platform based on regional geoelectrical survey data. *Earth's Cryosphere*. 2018; 22(5): 77–95 (in Russian).

Положительная рецензия от 14.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



ЯКОВЛЕВ
Денис Васильевич

Ведущий геофизик ООО «Северо-Запад», выпускник кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ (2002 г.). Область научных интересов – применение электроразведки при региональных и нефтегазопоисковых геолого-разведочных работах. Соавтор более 20 опубликованных работ.



КАПЛАН
Самуил Абрамович

Заведующий лабораторией отделения геоинформатики ВНИИГеосистем ФГБУ «ВНИГНИ», кандидат технических наук. В 1958 г. окончил Московский нефтяной институт, горный инженер-геофизик. Автор более 100 опубликованных и фондовых работ и 3 изобретений. Специалист в области создания и применения аппаратных, алгоритмических и программных средств обработки, интерпретации данных сейсморазведки, а также интегрирования геоинформации, получаемой различными методами полевой и скважинной геофизики.



КЛОКОВА
Валентина Прокопьевна

В 1971 г. окончила Московский институт нефти и газа имени И.М. Губкина. Старший научный сотрудник отделения геоинформатики ВНИИГеосистем ФГБУ «ВНИГНИ». Научные интересы: комплексная интерпретация геолого-геофизических данных при поисках и разведке месторождений углеводородов с привлечением литологической и петрофизической информации, прогнозирование акустических и плотностных характеристик пород для построения эффективных сейсмических моделей.



СОКОЛОВА
Елена Юрьевна

Ведущий научный сотрудник отделения геоинформатики ВНИИГеосистем ФГБУ «ВНИГНИ» и ИФЗ РАН, кандидат физико-математических наук, выпускница кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (1979 г.). Научные интересы: комплексная интерпретация глубинных и разведочных геофизических данных, геоэлектрика, геоэлектродинамика, геодинамика.



ШПЕКТОРОВ
Андрей Львович

Старший научный сотрудник отделения геоинформатики ВНИИГеосистем ФГБУ «ВНИГНИ», выпускник кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ (1975 г.). Научные интересы – обработка и интерпретация сейсмических данных.



СЛИНЧУК
Григорий Евгеньевич

Магистрант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов – совместная инверсия данных электроразведки и сейсморазведки.

УДК 550.834.05

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН С ЦЕЛЬЮ ОПИСАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ОСНОВЕ 3D-СЕЙМОРАЗВЕДКИ И БУРЕНИЯ

О.О. Литвякова^{1,2}, С.Н. Птецов³, Е.М. Вороновичева¹¹ ООО «ПетроТрейс». 115114, Россия, г. Москва, ул. Летниковская, д. 10, стр. 4;
e-mail: olga.litvyakova@ptgeos.com² МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, отделение геофизики, кафедра сейсмометрии и геоакустики.
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1³ Пенсионер

Аннотация. В статье авторами продемонстрированы новые технологии прогноза трещиноватости по сейсмическим данным с учетом данных волнового акустического каротажа и микроимиджеров в скважинах. Описываемый подход был успешно опробован на нескольких месторождениях Тимано-Печорской провинции. Данные бурения новых скважин подтверждают успешность сейсмического прогноза зон трещиноватости.

Ключевые слова. Сейсморазведка 3D, карбонатные резервуары, трещиноватость, глубинная миграция, сейсмическая анизотропия, каверны, динамический анализ.

A NEW APPROACH TO IMAGING AND ANALYSIS OF SEISMIC REFLECTION AND WELL DATA FOR PREDICTION OF FRACTURED AREAS

O.O. Litviakova^{1,2}, S.N. Ptetsov³, E.M. Voronovicheva¹¹ PetroTrace LLC. 115114, Letnikovskaya str. 10, bld. 4, Moscow, Russia; e-mail: olga.litvyakova@ptgeos.com² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Seismometry and Geoacoustics. 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia³ Retired person

Abstract. In this paper the authors are presenting the new approach for predicting fractured areas using seismic data together with well log information (sonic and micro imagers). Proposed approach was successfully applied on several discoveries in Timano-Pechora province. Recently drilled wells confirmed presence of the predicted fractured areas.

Key words. 3D seismic, carbonate reservoirs, fractures, depth migration, seismic anisotropy, caverns, dynamic analysis.

ВВЕДЕНИЕ. Изучение строения карбонатных резервуаров с целью повышения эффективности геологоразведки и снижения геолого-техногенных рисков при бурении является актуальной задачей. Наличие кавернозных полостей и связанных с ними зон повышенной трещиноватости создает препятствия и проблемы при бурении скважин, в том числе связанные с прихватом бурового инструмента, аномально высоким поглощением бурового раствора. При использовании буровых растворов с повышенной плотностью существенно ухудшаются свойства естественной трещиноватости карбонатных коллекторов, что резко снижает эффективность разведки ловушек нефти и газа.

При бурении важна информация не только о местоположении каверн, их размерах и положении в пространстве, но также данные о распределении зон естественной трещиноватости пород с высокой продуктивностью. Помимо этого, информация о трещиноватости необходима для прогноза каналов вероятного обводнения залежей.

В данной работе авторами рассматривается разработанный метод прогноза трещиноватости по сейсмическим данным с учетом данных волнового акустического каротажа и микроимиджеров в скважинах. С методологической точки зрения данный

подход является завершенной разработкой и был успешно опробован на нескольких месторождениях Тимано-Печорской провинции. Данные бурения новых скважин подтверждают сейсмический прогноз наличия каверн и зон трещиноватости.

Модель макрокаверн и макротрещин для карбонатных резервуаров

Геологическим и петрофизическим основанием использования данных 3D-сейсморазведки для прогнозирования крупных каверн и трещинных зон является прежде всего сопоставимость размеров этих объектов. Очевидно, что одиночные микротрещины с размерностью первых миллиметров и сантиметров не могут быть выявлены по данным сейсморазведки. Это предмет изучения керна и детальных скважинных методов исследования. Но изучение свойств аналогов карбонатных резервуаров на обнажениях, их сопоставление с данными волнового акустического каротажа и микроимиджеров в единой шкале глубин, а также согласование этих данных с объемными данными результатов глубинной миграции позволяют идентифицировать наиболее крупные из каверн карстовой природы и систем, связанных с ними в объеме трещин. Наш многолетний опыт показал, что карстовые воронки размерами в десятки метров,

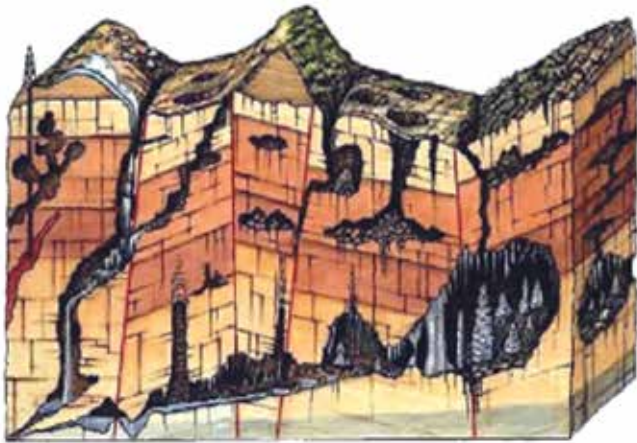


Рис. 1

Схематическая модель макрокаверн и трещин как продуктов образования карстовых воронок по разломам в рифовых постройках и над ними [3]

тектонические разломы с оперяющими их системами трещин вполне могут быть идентифицированы с данными бурения при условии применения новых технологий обработки данных 3D-сейсморазведки и комплексной мультимедицинарной интерпретации сейсмических отражений и дифракций в единых глубинных масштабах. В нашей работе [3] приведены примеры применения подобной интерпретации для схематично показанной модели строения карбонатных резервуаров на рис. 1.

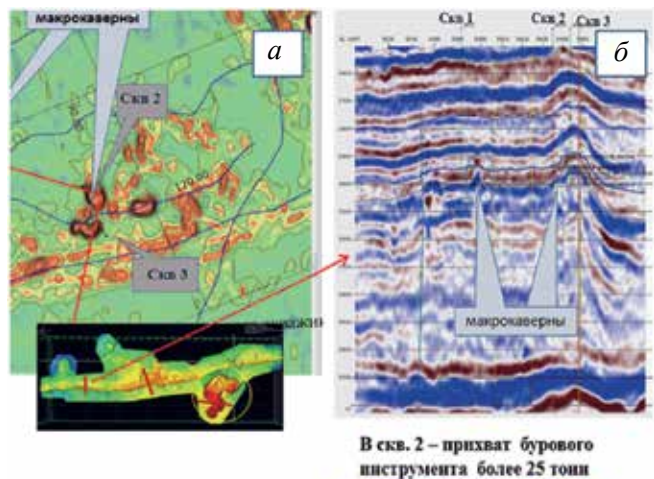
Обнаружение карстовых полостей по данным бурения и спецметодов ГИС

В процессе бурения скважин макрокаверны и трещины могут быть вполне уверенно определены, так как такие ослабленные зоны характеризуются высоким поглощением бурового раствора, прихватами бурового инструмента, данными геолого-технологического контроля в процессе бурения и данными современных промыслово-геофизических методов. Попадание ствола скважины в такие каверны чревато дополнительными финансовыми и временными затратами: суммарные сроки бурения увеличиваются на недели, доходя до нескольких месяцев, а дополнительные затраты на буровой раствор и химические реагенты увеличиваются в разы. Но если знать о карсте и кавернах заранее, то при современных технологиях бурения скважин можно предусмотреть особенности технических требований к буровому инструменту и методик бурения и не только избежать вышеперечисленных затрат, но и повысить дебиты скважин в 3–4 раза за счет бурения в зоны более высокой трещиноватости в окрестности макрокаверн. Выделение подобных областей представляется возможным также и по комплексу методов ГИС и спецметодов. Макрокаверны ярко отражаются в характеристиках интервальных времен, сопротивлений, нейтронных методов, плотности пород, наличия трещин [3]. Однако в этом случае они могут быть охарактеризованы всего лишь вдоль ствола скважины. Бурение же, в свою очередь, не дает представления о положении каверн в межскважинном пространстве.

Обнаружение карстовых полостей по материалам данных 3D-сейсморазведки

С помощью новых технологий обработки данных 3D-сейсморазведки была опробована и разработана методика прогнозирования объектов, повышающих геолого-техногенные риски бурения. В отношении крупных каверн можно определенно сказать, что сейсморазведка 3D имеет уникальную возможность определять положение и глубину крупных каверн диаметром от 10 метров и высотой от 20 метров. Такие огромные каверны, связанные с карстом и тектоническими разломами, имеют аналоги на обнажениях и описаны в литературе, например, в виде связанных между собой карстовых полостей, которые отмечены для известняков девонского возраста на современных склонах Урала. Разумеется, на глубине около 2–3 км такие крупные каверны заполнены менее плотными породами переотложенных известняков и доломитов с более высокими проводящими свойствами по отношению к вмещающей толще.

Примеры таких карстовых полостей есть в Тимано-Печорском нефтегазоносном бассейне (Тимано-Печорский НГБ) на Западно-Хоседаюском месторождении, в интервале пласта D_3fm на глубинах около 2000 м. Пример отображения таких крупных карстовых полостей показан на рис. 2, б (сверху справа) – на сечении сейсмического куба в глубинной области и на карте когерентности, рассчитанной вдоль горизонта D_3fm . Карстовая природа каверн подтверждается их положением по глубине,



В скв. 2 – прихват бурового инструмента более 25 тонн

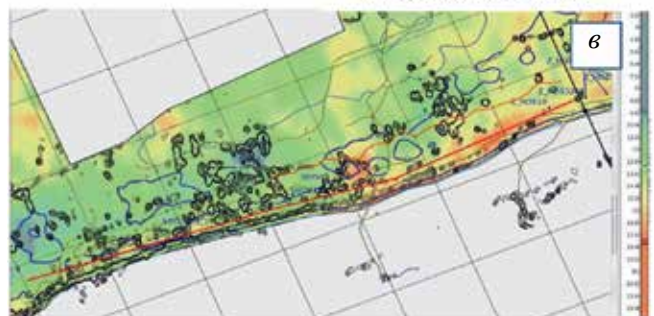


Рис. 2

Выявление зон поглощения бурового раствора, связанных с кавернами, в пласте D_3fm по сейсмическим данным: б – фрагмент сечения сейсмического куба в глубинной области, а и в – фрагменты карты когерентности

стратиграфии и литологии по данным бурения. Все карстовые полости находятся вблизи кровли фаменского рифа, в зоне лагунных фаций.

На карте когерентности на рис. 2, а (сверху слева) скважина попала в такую макрокаверну. На карте когерентности снизу (рис. 2, в) показаны следы макрокаверн, не вскрытых бурением.

Для выделения вышеописанных каверн и зон повышенной трещиноватости в межскважинном пространстве авторами были использованы кубы широкоазимутальной глубинной миграции до суммирования. Преимуществом данной технологии является то, что она позволяет сохранить азимутальную информацию о распространении отраженных волн в процессе глубинной миграции данных и совместить ее с азимутальным анализом анизотропии скоростей по скважинным данным. В дальнейшем возможно выполнить азимутальный анализ отраженных волн и получить сейсмические изображения в определенных азимутальных секторах, которые могут нести в себе новую дополнительную информацию о крупных кавернах и окружающих каверны трещинных зонах.

На предварительном этапе перед миграцией данных было выполнено построение детальной ани-

тропной глубинно-скоростной модели. Построение глубинно-скоростной модели осуществлялось методом послойной когерентной инверсии, позволяющим учитывать преломление сейсмических лучей на границах пластов. Уточнение интервальных скоростей проводилось с помощью глобальной сейсмической томографии. Для учета различий между изотропной и анизотропной скоростью использовались параметры Томсена: V_{vert} , δ и ϵ . Для достижения спрямленности осей синфазности отраженных волн параметры Томсена [6] были также уточнены методом томографии (рис. 3). Анизотропная глубинно-скоростная модель, построенная с учетом высокой детальности структурного плана, позволила скомпенсировать искажения амплитуд, возникших как результат влияния высокоскоростной толщи переменной мощности, перекрывающей целевые отложения, а также сформировать качественное глубинное изображение среды, учитывающее анизотропные свойства [2].

С построенной глубинно-скоростной моделью была выполнена полноазимутальная глубинная миграция до суммирования в области локальных углов наклона отражающей площадки [1, 5]. Полученные мигрированные сейсмограммы были использованы для выполнения азимутального анализа амплитуд,

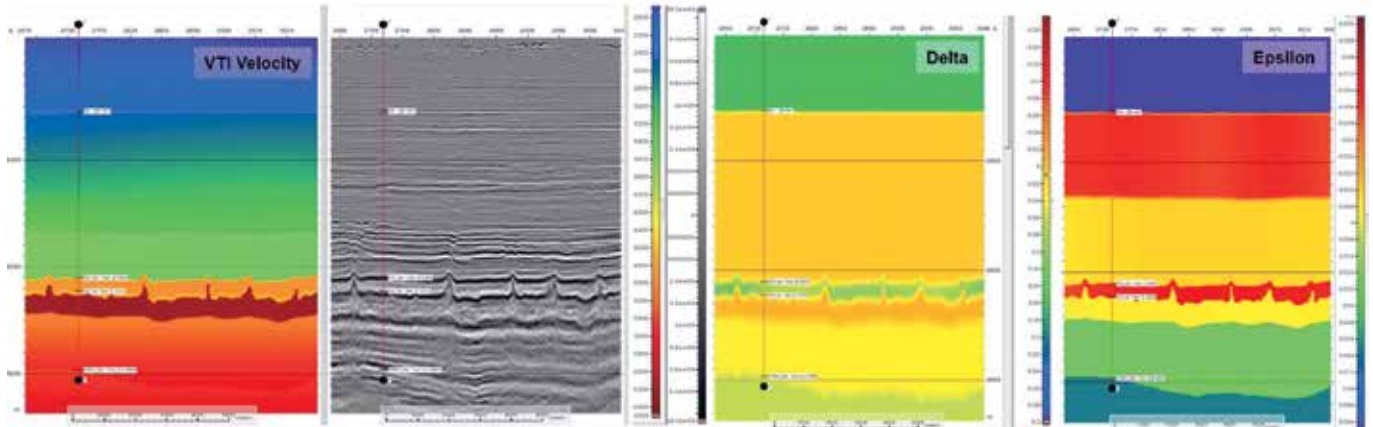


Рис. 3

Результат построения анизотропной ГСМ и миграции с ней.

Слева направо: VTI скорость, мигрированное сейсмическое изображение, куб параметра δ , куб параметра ϵ

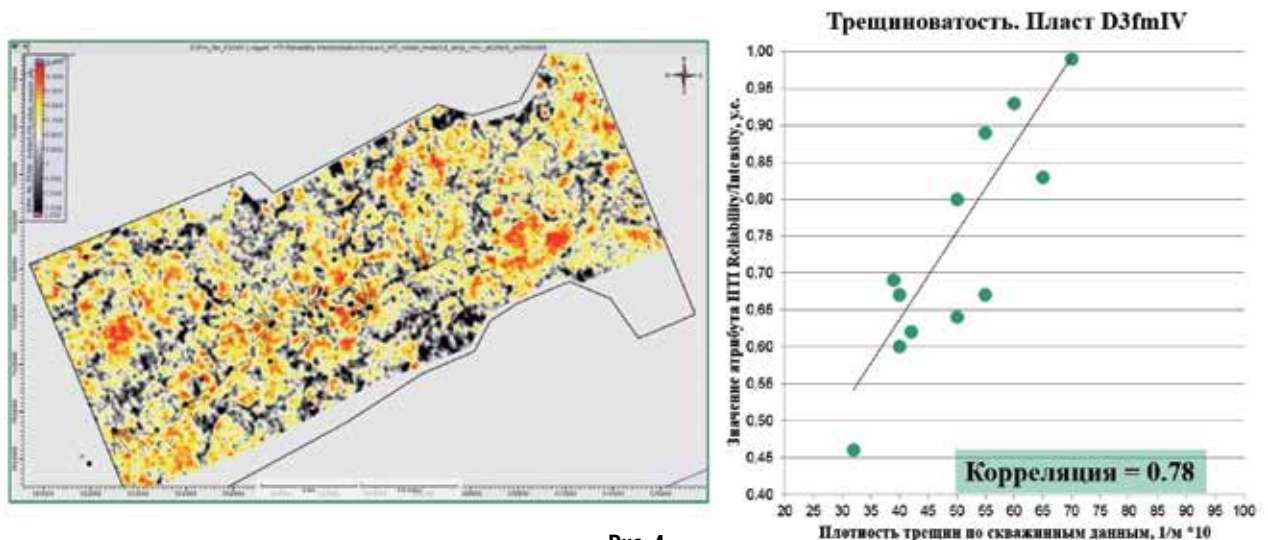


Рис. 4

Карта динамического атрибута «Интенсивность анизотропии амплитуд» вдоль целевого горизонта (слева) и сопоставление данных о плотности трещин по сканирующим скважинным методам и значений атрибута интенсивности анизотропии (справа)

в результате которого были рассчитаны различные динамические атрибуты. Атрибут «интенсивности анизотропии амплитуд» [6], который рассчитывается как отношение огибающих анизотропного AVO-градиента к изотропному, был проанализирован авторами более детально (рис. 4, слева).

На данном месторождении имелось достаточно большое количество скважин с измеренными значениями азимутов и плотности трещин по данным микроимиджеров. Благодаря этому были сопоставлены данные о плотности трещин по скважинным данным и значения рассчитанного атрибута (значения снимались в целевом, литологически выдержанном пласте D_3fmIV мощностью 20 м). Сопоставление данных прямого измерения (плотность трещин по микросканерам) и косвенного метода (атрибут, рассчитанный по сейсмическим данным) дало корреляцию 78 процентов, которая в первом приближении может быть описана линейной функцией (рис. 4, справа).

Полученное сопоставление позволяет говорить о том, что с методологической точки зрения авторами был получен и опробован инструмент для прогноза трещиноватости по сейсмическим данным.

Помимо выполненного анализа динамического атрибута, рассчитанного по сейсмограммам, по суммарным кубам был выполнен расчет карт когерентности, спектральная декомпозиция резонансных частот, а также было проведено сопоставление полученных материалов со скважинными характеристиками.

На рис. 5 в овале показано положение макрокаверны (размер в плане составляет около 50 м), наличие которой доказано бурением скважины. В насто-

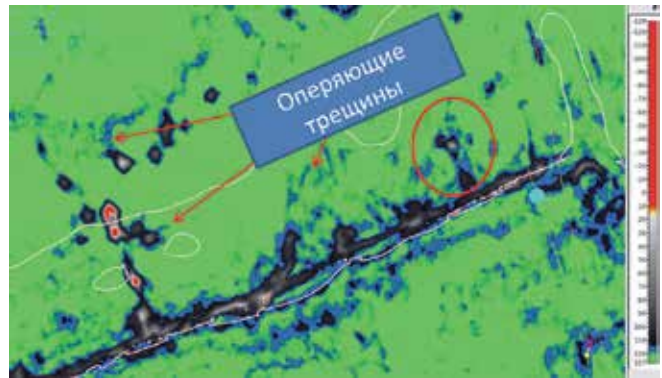


Рис. 5

Спектральная декомпозиция резонансных частот после глубинной миграции (карта значений вдоль целевого горизонта).

Цветовое смешение амплитуд на резонансных частотах в диапазонах частот 5–80 и 40–80 Гц и атрибута когерентности с макрокаверной на глубине 1940 м

ящее время эта скважина после подготовки и установки цементных мостов дает дебит нефти, в разы превышающий соседние скважины. Аналогичные каверны имеются в западной части площади, но они еще не вскрыты бурением.

Также, помимо каверн, на карте спектральной декомпозиции резонансных частот ярко проявляются и оперяющие трещины, характеризующие направления основных напряжений в породе. В сочетании с тектонической моделью, построенной по данным 3D-сейсморазведки, такой комплексный анализ представляет собой геологически обоснованный подход к изучению трещиноватости карбонатных резервуаров.

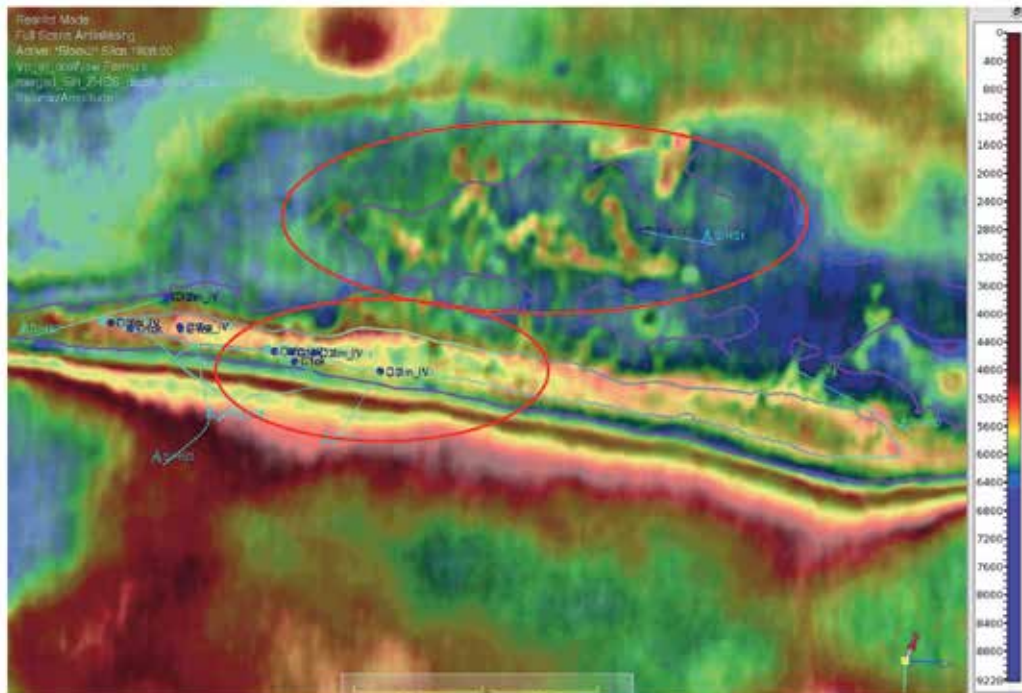


Рис. 6

Результаты нейронной инверсии (карта значений вдоль целевого горизонта).

В красных овалах показаны аномалии скоростных неоднородностей; голубые линии – траектории наклонных стволов скважин и положение пластопересечений стволов с гребнем барьерного рифа

В отношении скоростных свойств изучаемых объектов, они характеризуются пониженными значениями в поле псевдоскоростей по данным нейронной инверсии (рис. 6). С геологической точки зрения это может быть связано с разуплотнением карбонатных пород в карстовых воронках в кровельной части рифа.

Выводы. В заключение по проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Прогнозирование каверн по данным 3D-сейсморазведки вполне возможно для снижения геологического риска бурения, локализации проникае-

мых зон и прогноза каналов обводнения залежей ниже каверн под ВНК.

2. Использование широкоазимутальной глубинной миграции в области локальных углов наклона отражающей площадки и спектральная декомпозиция резонансных частот существенно повышают четкость отображения и детальность изучаемых объектов.

3. Данные бурения новых скважин (поглощение бурового раствора, ГТИ, данные спецметодов) подтверждают сейсмический прогноз наличия каверн и зон трещиноватости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланда Е.И. Роль дифракционной компоненты волнового поля при построении сейсмических изображений // Технологии сейсморазведки. 2013. Вып. 10. № 1. С. 5–31.
2. Литвякова О.О., Есинов Б.С., Птецов С.Н., Королев А.Е., Вороновичева Е.М. Передовые технологии обработки сейсмических данных с целью выделения рассеянной компоненты волнового поля для прогнозирования свойств резервуара // НГН. 2017. № 1.
3. Птецов С.Н. Отображение макрокаверн в волновое поле 3D-сейсморазведки на нефтяных месторождениях Тимано-Печорского региона. Москва, 2016. Тезисы на 2-й конференции ЕАГО «Карбонатные резервуары – 2016».
4. Canning Anat. Azimuthal AVA analysis using full-azimuth 3D angle gathers // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2009. P. 256–259.
5. Koren Zvi. Full-azimuth angle domain imaging // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2008. P. 2221–2225.
6. Thomsen Leon. Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. Vol. 51. № 10. P. 1954–1966.

REFERENCES

1. Landa EI. Rol difrakcionnoj komponenty volnovoogo polya pri postroenii sejsmicheskikh izobrazhenij. *Tekhnologii sejsmorazvedki*. 2013; 10(1): 5–31 (in Russian).
2. Litvyakova OO, Esinov BS, Ptetsov SN, Korolev AE, Voronovicheva EM. Peredovye tekhnologii obrabotki sejsmicheskikh dannyh s celyu vydeleniya rasseyannoj komponenty volnovoogo polya dlya prognozirovaniya svoystv rezervuara. *NGN*. 2017; (1) (in Russian).
3. Ptetsov SN. Otobrazhenie makrokavern v volnovoe pole 3D sejsmorazvedki na neftyanyh mestorozhdeniyah Timano-Pechorskogo regiona. Moskva, 2016 g. Tezisy na 2-j konferencii EAGO «Karbonatnye rezervuary – 2016» (in Russian).
4. Canning Anat. Azimuthal AVA analysis using full-azimuth 3D angle gathers. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2009. P. 256–259.
5. Koren Zvi. Full-azimuth angle domain imaging. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2008. P. 2221–2225.
6. Thomsen Leon. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*. 1986; 51(10): 1954–1966.

Положительная рецензия от 16.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



ЛИТВЯКОВА
Ольга Олеговна

Ведущий геофизик проекта департамента обработки и миграции сейсмических данных ООО «ПетроТрейс», в 2015 г. окончила МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «геолого-геофизические исследования нефтяных и газовых месторождений». Область научных интересов – сейсмические методы изучения геологического строения, обработка и миграция сейсмических данных, построение сейсмических изображений.



ПТЕЦОВ
Сергей Николаевич

С 2000 по 2019 г. работал в компаниях «Парадайм» и «ПетроТрейс» техническим директором, затем главным научным консультантом, в настоящее время пенсионер. Докладчик технических наук, член правления ЕАГО. Автор более 50 публикаций. Область научных интересов – прогнозирование геологического разреза по данным 3D-сейсморазведки и скважинных данных. Последние 10 лет активно занимается исследованиями карбонатных резервуаров и их трещиноватости.



ВОРОНОВИЧЕВА
Елена Михайловна

Менеджер проекта департамента обработки и миграции сейсмических данных ООО «ПетроТрейс». В 1982 г. окончила МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «геолого-геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых». Область научных интересов – обработка и миграция сейсмических данных, построение глубинно-скоростных моделей и сейсмических изображений для регионов со сложным строением, решение проблем поверхностных неоднородностей. Автор 15 научных публикаций.

УДК 550.341

АЛГОРИТМ 3D КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛНАХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МИГРАЦИОННОГО СКОРОСТНОГО АНАЛИЗА

Д.А. Неклюдов¹, М.И. Протасов¹, К.Г. Гадильшин¹, Н.Г. Исаков²

¹ ИНГГ СО РАН. 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Коптюга, д. 3; e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

² ООО «Ингеосервис». 625019, Россия, г. Тюмень, ул. Республики, д. 211

Аннотация. В настоящей работе мы предлагаем алгоритм 3D кинематической томографии для построения начальных глубинно-скоростных моделей для миграционного скоростного анализа. Он основывается на использовании результатов «временной» обработки, а именно стандартного скоростного анализа и временной миграции до суммирования. На реальном примере показывается его эффективность.

Ключевые слова. 3D-томография на отраженных волнах, скоростной анализ, временная миграция до суммирования.

ALGORITHM OF 3D REFLECTION TOMOGRAPHY FOR BUILDING AN INITIAL VELOCITY MODEL FOR MIGRATION VELOCITY ANALYSIS

D.A. Necklyudov¹, M.I. Protasov¹, K.G. Gadyl'shin¹, N.G. Isakov²

¹ IPGG SB RAS. 630090, 3, Koptuyug st., Novosibirsk, Russia; e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

² Ltd. Ingeoservice. 625019, 211, Respublika st., Tyumen, Russia

Abstract. In this paper we propose an algorithm for 3D reflection tomography for constructing initial depth velocity models for migration velocity analysis. It is based on the use of the results of time processing, namely, standard velocity analysis and pre-stack time migration. The real data example shows its effectiveness.

Key words. 3D reflection tomography, velocity analysis, pre-stack time migration.

ВВЕДЕНИЕ. В настоящее время глубинная миграция до суммирования (pre-stack depth migration, PSDM) стала необходимым инструментом в практике обработки сейсмических данных. По устоявшейся традиции результаты глубинной миграции называются глубинными сейсмическими изображениями изучаемой площади. Их ценность особенно отчетливо проявляется в районах со сложным геологическим строением при наличии сильной латеральной изменчивости геологических свойств среды. Степень достоверности глубинных изображений полностью зависит от адекватности глубинно-скоростной модели среды, в которую выполняется PSDM. Для построения глубинно-скоростных моделей, как правило, применяются алгоритмы, основанные на использовании кинематических характеристик зарегистрированных волновых полей. Детальный обзор существующих методов построения глубинно-скоростных моделей выходит за рамки настоящей статьи. Подробное рассмотрение большинства из них может быть найдено в обзорных монографиях [4, 7, 10]. Отметим лишь основные особенности применения алгоритмов кинематической томографии для данных сейсморазведки по методу отраженных волн (МОВ). Основной особенностью является тот факт, что получение входных данных – времен пробега отраженных волн – весьма затруднено (по сравнению с кинематической томографией, основанной на использовании проходящих, головных или рефрагированных волн,

наблюдающихся в первых вступлениях сейсмических записей). Это связано с двумя факторами: 1) объем сейсмических данных, регистрируемых в МОВ 3D, очень велик: в настоящее время речь идет о десятках (и сотнях) терабайт; 2) качество самих данных: сейсмограммы МОВ, как правило, представляют собой сложную картину интерферирующих вступлений волн различных типов. Сама идентификация отраженных волн даже на данных, прошедших предварительную обработку, весьма непростая: протяженные вступления отраженных волн трудноразличимы на глаз, зачастую маскируются сильным фоном когерентных и случайных помех. Все это практически полностью исключает возможность ручного пикирования времен вступлений отраженных волн.

Стандартным практическим методом построения глубинно-скоростных моделей в настоящее время стал миграционный скоростной анализ (migration velocity analysis [10, 12], MVA). Основная идея, заложенная в MVA, в упрощенном виде может быть описана следующим образом. При наличии некоторой, весьма приближенной, начальной глубинно-скоростной модели среды PSDM может быть проведена в нее независимо для набора сейсмограмм общего удаления (ОУ). Набор полученных изображений, соответствующих каждому выносу (и набору азимутов), упорядочивается в так называемые сейсмограммы общей точки изображения (common image gathers, CIG). Каждая трасса CIG

Метод

Общая схема работы алгоритма

соответствует глубинному изображению в фиксированной точке площади при определенном выносе (и азимуте). То есть СІG состоят из всех мигрированных трасс, полученных с разных удалений и изображающих одну и ту же область среды. Если PSDM была выполнена с «правильной» скоростной моделью, то мигрированные отражения на СІG будут выпрямлены, т.к. изображения одной и той же отражающей площадки должны находиться на одинаковой глубине независимо от того, с какого выноса и азимута строилось это изображение. Если же скоростная модель была неадекватна, мигрированные отражения на СІG будут иметь форму, отличную от прямой (говоря другими словами, СІG будут иметь остаточный годограф). Анализ остаточных годографов, проведенный по всему объему сейсмического изображения, позволяет скорректировать текущую глубинно-скоростную модель: кривизна каждого когерентного события на СІG, которое отождествляется с отражателем, пересчитывается в невязку времен пробега соответствующей отраженной волны от этой отражающей площадки (под невязками времен здесь подразумевается разница времен пробега отраженной волны в текущей и «правильной» скоростной модели). Полученные невязки идут на вход процедуре кинематической томографии, в результате работы которой получается уточнение скоростной модели, минимизирующее невязки времен пробега и, соответственно, уменьшающее кривизну остаточных годографов на СІG.

Отметим основные преимущества MVA (также мы будем применять термин «СІP-томография»): 1) определение кинематических данных отраженных волн происходит автоматически на СІG после глубинной миграции, во время которой существенно подавляется уровень случайного и когерентного шума за счет «оптимального» суммирования сейсмических данных; 2) при решении обратной кинематической задачи происходит естественное уменьшение числа параметров, влияющих на кинематику отраженных волн, а именно не только распределение скоростей в среде, но также положение и форма самих отражающих границ. В MVA происходит отказ от использования протяженных сейсмических горизонтов, т.к. изображения на СІG представляются как набор независимых локально-когерентных событий. Таким образом, при работе кинематической томографии в MVA уточняется лишь скоростное строение среды, геометрия отражающих границ, как правило, не включается в процедуру томографического уточнения на ранних этапах построения модели.

Недостаток MVA заключается в необходимости делать PSDM на каждом шаге уточнения скоростной модели. При обработке данных сейморазведки 3D это может занимать очень много времени. Цель настоящей работы – предложить простой и относительно дешевый алгоритм 3D-томографии для того, чтобы сократить количество «дорогих» итераций MVA на первых этапах построения скоростной модели. Для этого мы предлагаем использовать данные, полученные при «временной» обработке.

Сначала PSDM всегда выполняется на заключительном этапе обработки сейсмических данных. На предшествующих этапах, как правило всегда, строятся «временные изображения» изучаемого района с помощью временной миграции до суммирования (pre-stack time migration, PSTM). На кубах изображений PSTM производится предварительная интерпретация, пикирование основных отражающих горизонтов. На этапах, предворяющих глубинную миграцию (мы будем называть этот этап этапом «временной» обработки), всегда строятся скорости суммирования ОГТ, $V_{\text{ОГТ}}$ и скорости временной миграции, V_{MIG} (которые, как предполагается, аппроксимируют среднеквадратические скорости, V_{RMS}). Имея эти данные, можно построить эффективный алгоритм кинематической томографии на отраженных волнах, с помощью которого существенно сократить число дорогих (в вычислительном плане) итераций MVA. Ниже мы опишем детально предлагаемый алгоритм. Вначале сформулируем, что же является входными данными для предлагаемого алгоритма:

1. Начальная глубинно-скоростная модель. Как правило, она строится из имеющихся скоростей временной миграции V_{MIG} путем пересчета их в интервальные скорости по формуле Дикса. В большинстве случаев, даже в районах с умеренными латеральными вариациями скоростей, подобная модель весьма далека от приемлемой глубинно-скоростной модели, которая бы обеспечила построение достоверного глубинного изображения.

2. Набор снятых на суммарном кубе PSTM основных отражающих горизонтов $T_{\text{IM}}^j(X_{\text{IM}}^j, Y_{\text{IM}}^j)$, $j=1, \dots, N$, задаваемых в виде таблицы $(X_{\text{IM}}^j, Y_{\text{IM}}^j, T_{\text{IM}}^j)$, где $X_{\text{IM}}^j, Y_{\text{IM}}^j$ – координаты точки на поверхности наблюдений в изображении PSTM, T_{IM}^j – соответствующее время (время временной миграции). Далее мы рассматриваем каждую поверхность как набор независимых локально-когерентных событий (ЛКС) [8]. Ключевой момент здесь – независимые ЛКС строго привязаны к конкретной отражающей поверхности.

3. Куб скоростей ОГТ, $V_{\text{ОГТ}}(X_{\text{CMP}}, Y_{\text{CMP}}, T_0; az)$ (возможно, набор кубов, зависящих от азимута, az ; детальнее см. ниже). $X_{\text{CMP}}, Y_{\text{CMP}}$ – координаты средних точек на поверхности наблюдений, T_0 – время (двойное) по нормальному лучу.

Далее опишем сам алгоритм построения глубинно-скоростной модели по этапам. На первых этапах производится «численная демиграция через глубину» снятых «временных» отражающих поверхностей. Это происходит с использованием хорошо известной в сейсмике концепции image gau [6], т.е. луча, строящего изображение. Этот термин используется для обозначения фиктивного луча, подходящего к поверхности наблюдения по нормали и соединяющего точку на поверхности наблюдения с отражающей площадкой на мигрированном временном изображении. (Далее для краткости мы будем обозначать его как image-луч.)

Описанные ниже процедуры 1–5 производятся для каждой «временной» поверхности независимо.

1. Для каждой точки на поверхности $T_{IM}^j(X_{IM}, Y_{IM})$ в начальную модель трассируется image-луч. Он выпускается с поверхности наблюдений из текущей точки (X_{IM}, Y_{IM}) по нормали и продолжается в начальной глубинно-скоростной модели, пока не истечет время $T_{IM}/2$. В итоге определяется положение соответствующей точки на отражающем горизонте в глубине (X, Y, Z) . Продолжая таким образом image-лучи для всех точек текущей «временной» поверхности, строится ее отображение в глубине в текущей скоростной модели. Таким образом, происходит «глубинная» миграция «временной» поверхности с помощью image-лучей [6]. Отметим, что, трассируя image-лучи, мы не получаем никакой информации о наклонах отражающих площадок. Все, что можно сказать, – image-луч касается отражающей площадки по истечении времени $T_{IM}/2$.

2. Определение нормалей к мигрированной поверхности в глубине. На предыдущем этапе было получено положение всех точек отражателя в глубине, что можно рассматривать как задание набора значений некоторой функции $Z_j(X, Y)$. Далее необходимо определить численно нормали к поверхности $Z(X, Y)$ каждой точки (рис. 1). Для каждой точки в глубине в некоторой наперед заданной апертуре набираются ее соседи и строится локальная плоскость, наиболее близкая ко всем выбранным точкам в смысле наименьших квадратов. Таким образом, решается классическая задача трехмерной линейной регрессии. В результате по нерегулярному «облаку» мигрированных точек отражателя (X, Y, Z) строится набор локальных отражающих площадок, каждая из которых характеризуется своей нормалью. Отметим, что при миграции в неадекватную глубинно-скоростную модель изначально гладкие «временные» горизонты могут потерять гладкость в глубине. Мы предполагаем, что сохраняется локальная гладкость, которая достигается отбрасыванием максимальных/минимальных значений $Z(X, Y)$ при решении задачи локальной линей-

ной регрессии и локальным сглаживанием полученных нормалей в некоторой апертуре.

3. Из каждой отражающей площадки к поверхности наблюдений трассируется нормальный луч. Таким образом, численно строится соответствие мигрированной поверхности в глубине с кубом скоростей ОГТ, $V_{OГТ}(X_{CМР}, Y_{CМР}, T_0)$. Этапы 1–3 фактически представляют собой «численную демиграцию через глубину» снятых «временных» отражающих поверхностей на кубе PSTM.

4. От каждой отражающей площадки с известной нормалью строится конус отраженных лучей. Для этого из глубины с некоторым шагом по углу раствора (угол отражения) и азимуту выпускается набор лучей. Каждые два сегмента, которые удовлетворяют в точке выхода (т.е. в точке отражения) закону Снеллиуса, образуют луч, соответствующий волне, отраженной от заданной площадки при заданном угле отражения и при заданном азимуте. Предположим, каждый из двух сегментов луча отраженной волны выходит на поверхность (рис. 2). Тогда отраженный луч на поверхности можно однозначно охарактеризовать следующими координатами: $X_{CМР}, Y_{CМР}$ – координатами средней точки двух сегментов, абсолютным выносом h , т.е. расстоянием на поверхности между точками выхода и азимутом на поверхности α . При трассировке сегментов также вычисляется время пробега отраженной волны в текущей модели, которое можно записать как

$$T_{CALC} = T_{CALC}(X_{CМР}, Y_{CМР}, h, \alpha).$$

5. Далее попробуем определить «наблюдаемые» времена в точке выхода отраженных лучей. Для этого мы предлагаем использовать скорости суммирования ОГТ и в качестве «реальных» наблюдаемых времен взять их гиперболическую аппроксимацию:

$$T_{OBS}(X_{CМР}, Y_{CМР}, h, \alpha) = \sqrt{T_0^2(X_{CМР}, Y_{CМР}) + \frac{h^2}{V_{OГТ}^2(X_{CМР}, Y_{CМР}, T_0; \alpha)}} \quad (1)$$

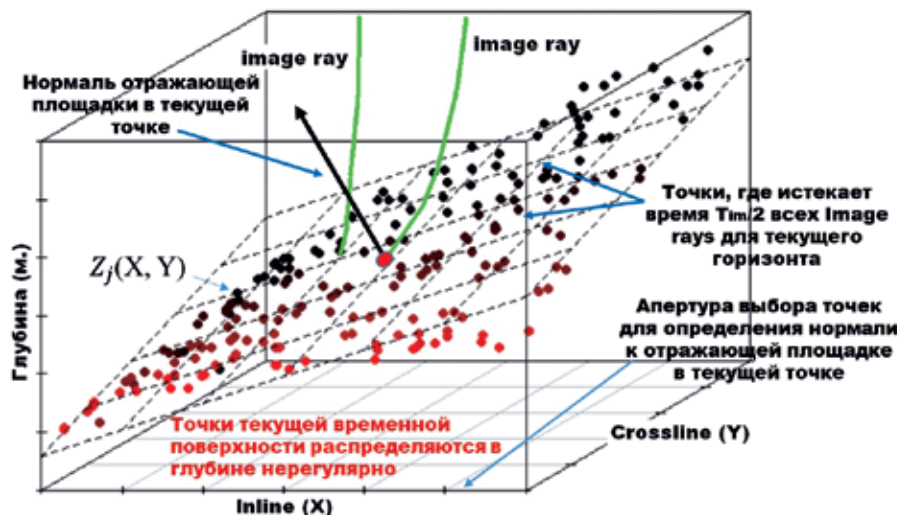


Рис. 1
Определение нормалей к отражающим площадкам в глубине с помощью линейной регрессии



Рис. 2

Расчет конуса отраженных лучей от локализованной в глубине отражающей площадки.

В качестве иллюстрации приведен один отраженный луч

Для каждого отраженного луча, вышедшего на поверхность, не составляет труда по его координатам $X_{СМР}$, $Y_{СМР}$ найти соответствующее этой точке T_0 (для каждой мигрированной «временной» поверхности на шаге 3 мы уже определили «карту» $T_0(X, Y)$; здесь же еще раз отметим, что описываемая процедура производится с каждой поверхностью независимо) и, значит, нужно значение $V_{ОГТ}$ и рассчитать время пробега по формуле (1) в текущей точке на поверхности. Отметим, что подобная аппроксимация реальных времен отраженных волн нередко встречается на практике [1, 5]. Это связано с тем, что скорости суммирования ОГТ представляют собой интегральный параметр, который определяется по значительной выборке трасс, т.е. очень устойчив. Скорости ОГТ тщательно контролируются обработчиком. В принципе, это сугубо кинематический атрибут, который в общем случае может не иметь ничего общего с реальным распределением интервальных скоростей в среде, но всегда характеризует поведение годографа отраженных волн в смысле регрессии, т.е. $V_{ОГТ}$ характеризует гиперболу, наилучшим образом «лежащую» на реальный годограф отраженной волны. Таким образом, мы получаем входные данные для стандартной кинематической томографии на отраженных волнах, где минимизируются невязки времен пробега отраженных волн $dT = T_{OBS} - T_{CALC}$, здесь времена вычисляются в точках выхода отраженных лучей с помощью лучевой трассировки для T_{CALC} и по формуле (1) для T_{OBS} . Отметим здесь несколько аспектов, важных для применения описываемого алгоритма на практике: 1) вместо простой гиперболы, задаваемой формулой (1), могут использоваться более сложные аппроксимации времен пробега отраженных волн в выборке ОГТ: аппроксимации четвертого порядка, например, предложенные в [2, 3], или подобные им, введенные другими авторами; 2) зависимость скоростей ОГТ от азимута [13] может быть учтена в предлагаемом подходе: имея азимут на поверхности от построенных сегментов отраженного луча, необходимо проводить выбор скорости ОГТ в кубе скоростей, соответствующем данному азимуту.

6. Решение обратной кинематической задачи (ОКЗ) в томографической постановке, т.е. определение поправки $\Delta\alpha$ к параметрам, характеризующим текущую глубинно-скоростную модель, по определенным на шагах 1–5 «аппроксимированным» невязкам времен пробега отраженных волн (ниже мы опишем более детально применяемый нами подход к решению ОКЗ).

После решения линейаризованной обратной кинематической задачи и получения поправки к начальной скоростной модели шаги 1–6 повторяются в скорректированную модель. Таким образом, происходит достаточно быстрое итерационное уточнение 3D глубинно-скоростной модели без привлечения дорогой процедуры PSDM. После нескольких глобальных итераций уточнение скоростной модели необходимо прекратить, т.к. гиперболическая аппроксимация самих времен пробега отраженных волн может оказаться недостаточной для достоверного восстановления скоростной модели, особенно в глубокой ее части. Полученный результат можно использовать как начальное приближение для стандартного MVA, который основан на гораздо более слабом предположении о форме остаточного годографа на SIG. Отметим, что «томографическое ядро», т.е. часть программы, отвечающая за решение обратной кинематической задачи, одинаково, что для описанного выше подхода, что для стандартной SIG-томографии. В принципе, для обращения вычисленных вышеописанным способом временных невязок может быть использовано «томографическое ядро», заимствованное из уже существующих обрабатывающих программных комплексов.

Томографическое ядро, применяемое для решения ОКЗ

Согласно стандартной схеме, принятой в кинематической томографии, составляется система линейных уравнений, связывающая наблюдаемые невязки времен пробега отраженных волн dT с искомой поправкой параметров модели $\Delta\alpha$:

$$M\Delta\alpha = dT. \quad (2)$$

Здесь M обозначает томографическую матрицу, элементы которой – производные от времен пробега по параметрам модели. В нашем случае модель параметризуется значениями скоростей на трехмерной сетке, в каждой ячейке сетки скорость предполагается постоянной. Элемент ij матрицы M при такой параметризации вычисляется как длина i -того отраженного луча в пространственной ячейке с номером j . Ячейки нумеруются в сквозном порядке, их число соответствует числу столбцов томографической матрицы. Таким образом, здесь реализуется схема стандартной «сеточной» томографии [7].

Матрица M заполняется на шаге 5, каждая поверхность соответствует блоку из строк в единой томографической матрице. Ее размерность в изотропном случае определяется как $N_{Rays} \times N_x \times N_y \times N_z$, где N_{Rays} – число успешно протрассированных отраженных лучей, $N_x \times N_y \times N_z$ – количество ячеек сетки в области реконструкции. Отметим, что в нашем случае

число строк всегда на несколько порядков превосходит число столбцов.

Далее мы следуем схеме, предложенной в работе [12]. Вместо исходной системы (2) решается преобусловленная система

$$LMSR\Delta\alpha' = LdT, \quad (3)$$

где L – диагональная матрица взвешивания строк, R – диагональная матрица взвешивания столбцов, S – сглаживатель, представляющий собой 3D-свертку по пространству с гладким ядром. В нашем случае в качестве такой функции была выбрана функция-треугольник по каждому из пространственных направлений X, Y, Z .

Система (3) решается методом IRLS (iterative reweighted least-squares) в норме $L_{1.5}$ [11]. В этом случае целевая функция представляется в виде

$$F = \|LMSR\Delta\alpha' - LdT\|_{1.5}^{1.5} + \lambda^2 \|\Delta\alpha'\|_2^2 = \|A\bar{x} - \bar{b}\|_{1.5}^{1.5} + \lambda^2 \|\bar{x}\|_2^2 \quad (4)$$

В методе IRLS итерационно решается ряд линейных задач по методу наименьших квадратов с рекурсивно обновляемой матрицей весов:

$$A^T W_{k-1} A \bar{x}_k = A^T W_{k-1} \bar{b}. \quad (5)$$

Здесь для краткости введены сокращенные обозначения $A \equiv LMSR, \bar{b} \equiv LdT$.

Диагональная матрица W_k задается как

$$W_k = \text{diag} |r_i|^{-0.5},$$

где $r_i = \sum A_{ij} x_j - b_i$ есть вектор невязок решения после k – итерации. Системы (5) решаются методом LSQR (вариация метода сопряженных градиентов для решения больших плохо обусловленных систем линейных уравнений) [9]. Применение метода LSQR весьма типично в задачах томографии. Решение томографической системы с помощью IRLS позволяет получать решения, гораздо более устойчивые к резким «скачкам» невязок (outliers), что является существенной проблемой в подобного рода задачах при решении их стандартным методом наименьших квадратов.

Отметим основные особенности систем линейных уравнений (СЛАУ), возникающих в задачах сейсмической томографии: 1) очень большая размерность ($> 10^8 \times 10^6$ элементов); 2) сильная разреженность, т.е. матрицы имеют относительно небольшое количество ненулевых элементов; 3) плохая обусловленность, т.е. при решении СЛАУ требуется применение регуляризирующих процедур. Для реальных приложений необходимы сотни гигабайт оперативной памяти, чтобы оперировать с такими матрицами (даже учитывая их разреженность). Программная реализация томографии должна изначально быть ориентирована на использование высокопроизводительных вычислительных систем с распределенной памятью (MPI-реализация). Предлагаемая реализация алгоритма томографии основана на использовании функциональностей, содержащихся в свободно распространяемой библиотеке PETSc [14]. Библиотека PETSc специально ори-

ентирована для написания MPI ориентированных программ, использующих элементы линейной алгебры. Она обладает следующими преимуществами: 1) содержит набор параллельных (MPI ориентированных) итерационных алгоритмов решения СЛАУ, таких как, например, LSQR; 2) удобна для работы с распределенными по вычислительным узлам массивами данных (матрицы, векторы).

Численные эксперименты

Описанный выше подход был применен для построения глубинно-скоростной модели для одного из участков площади, расположенной в Карском море. Для эксперимента был выбран небольшой фрагмент исследуемой области с размерами $\sim 20 \times 5$ км (инлайн/кросслайн), таким образом, площадь участка, выбранного для тестирования алгоритма, составляла примерно 100 км^2 . Глубина построения скоростной модели составляла 7 км.

В ходе «временной» обработки на кубе PSTM было снято восемь поверхностей, соответствующих наиболее значимым отражающим горизонтам в районе проведения сейсмических наблюдений. Таблицы, задающие зависимость $T_{IM}^j(X_{IM}, Y_{IM})$ для каждого горизонта, задавались с пространственным шагом $25 \times 12,5$ м, что соответствует шагу бинирования 3D сейсмической съемки.

Начальная скоростная модель, полученная стандартным способом, а именно конвертацией скоростей миграции в интервальные скорости по формуле Дикса, представлена на рис. 3. Модель дискретизована с шагами $25 \times 12,5 \times 10$ м (crossline, inline, Z). Решение обратной кинематической задачи проводилось на более грубой сетке: $200 \times 200 \times 50$ м. Ширина сглаживателей уменьшалась в ходе глобальных итераций по уточнению модели от $3000 \times 3000 \times 1000$ до $600 \times 600 \times 200$ м, что позволяет плавно переходить от уточнения наиболее плавных вариаций скорости к более детальным, избегая проявления неустойчивости. Всего было выполнено 12 глобальных итераций, по 4 итерации при фиксированной ширине сглаживателей. Скоростная модель, полученная в итоге, представлена на рис. 4.

Результаты PSDM в начальной скоростной модели представлены на рис. 5 и 7. Как можно видеть по сейсмограммам общей точки изображения (на рис. 5 представлен фрагмент, взятый вдоль направления инлайн из центра 3D-модели), начальная глубинно-скоростная модель весьма далека от удовлетворительной. В нижней части изображений когерентные события не видны вовсе, что весьма затруднило бы применение стандартной СР-томографии. На суммарном мигрированном изображении можно видеть расфокусированность и неудовлетворительную прослеживаемость ключевых отражающих горизонтов. PSDM, выполненная в уточненную модель (рис. 4), позволяет в данном случае получить весьма удовлетворительные результаты даже без последующего применения СР-томографии (рис. 6 и 8). Приведенные результаты доказывают работоспособность алгоритма. Можно ожидать, что в некоторых случаях (где «гиперболическая» аппроксимация годографов

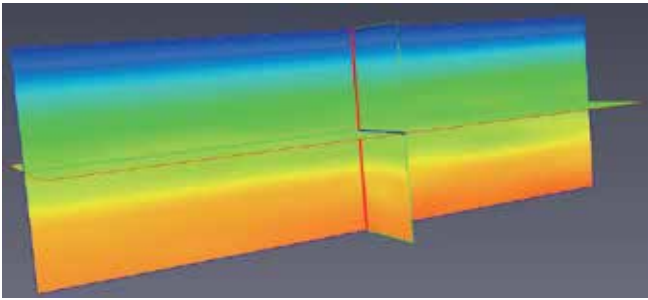


Рис. 3
Начальная глубинно-скоростная модель.
Размер модели: 20 x 5 x 7 км (X-Y-Z);
скорости изменяются
в диапазоне 1500–4400 м/сек

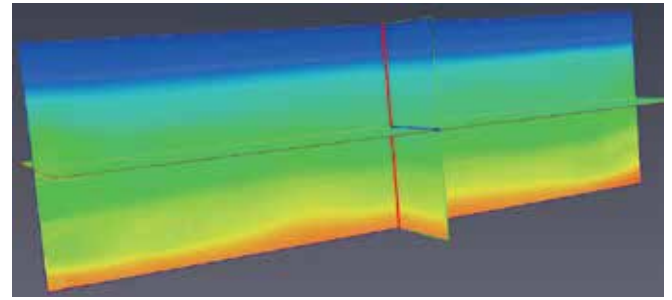


Рис. 4
Восстановленная глубинно-скоростная модель
с использованием предложенного алгоритма томографии.
Скорости изменяются в диапазоне 1500–4400 м/сек

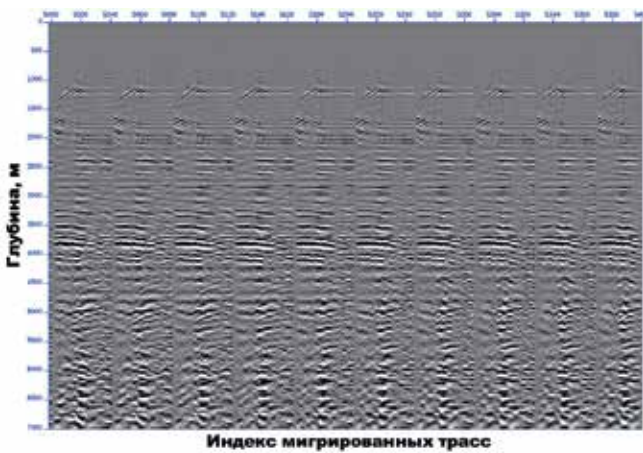


Рис. 5
Сейсмограммы общей точки изображения (фрагмент),
полученные в результате PSDM с начальной
скоростной моделью

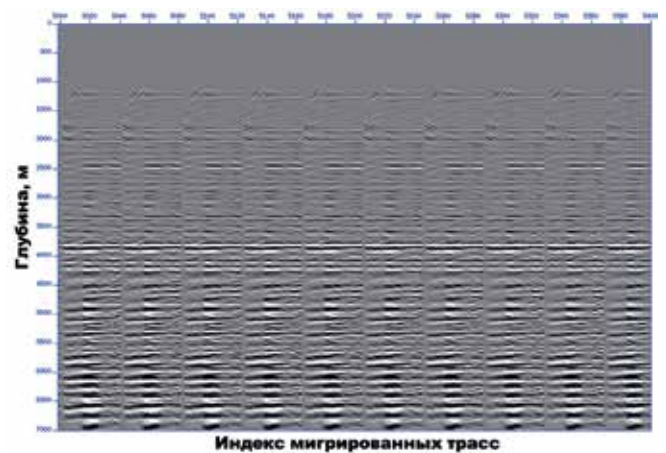


Рис. 6
Сейсмограммы общей точки изображения (фрагмент),
полученные в результате PSDM со скоростной моделью,
уточненной с помощью описанного подхода

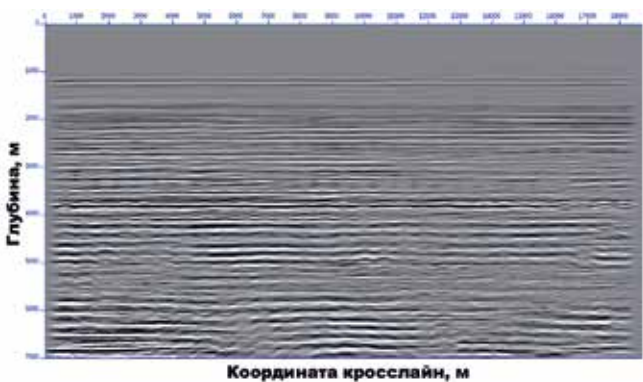


Рис. 7
Фрагмент суммарного 3D глубинного изображения,
полученного в результате PSDM с начальной
скоростной моделью: сечение вдоль направления инлайн

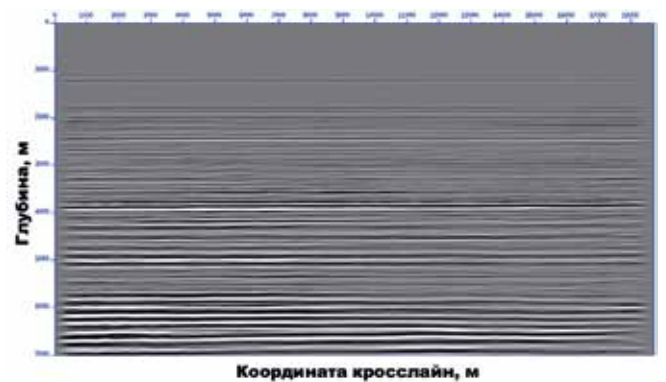


Рис. 8
Фрагмент суммарного 3D глубинного изображения,
полученного в результате PSDM со скоростной моделью,
уточненной с помощью описанного подхода: сечение
вдоль направления инлайн

позволяет описать реальные времена вступления отраженных волн в достаточном диапазоне удалений) предложенный алгоритм мог бы заменить стандартный MVA. Хотя, напомним, его основное предназначение – использоваться до применения стандартного MVA, чтобы обеспечить удовлетворительную начальную модель, которая могла бы быть быстро уточнена с минимальным количеством итераций MVA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье представлен алгоритм томографии, основанный на использовании результатов временной обработки: скорости суммирования по ОГТ и основные пропикированные горизонты. Основной задачей, для которой разрабатывался предложенный алгоритм, является получение как можно более адекватной начальной скоростной модели для стандартной СР-томографии. Использование такой модели позволило бы существенно сократить количество дорогих в вычислительном плане итераций СР-томографии. К достоинствам предложенного подхода можно отнести следующее: 1) основная идея заключается в способе расчета входных

данных для инверсии. Сама инверсия может быть заимствована из существующих обрабатывающих программных комплексов; 2) алгоритм не требует дорогостоящего динамического или двухточечного лучевого трассирования; 3) необходимые входные данные, как правило, всегда имеются в распоряжении обработчика после проведения этапа стандартной «временной» обработки. Основным недостатком – ограничение, связанное с той или иной выбранной аналитической аппроксимацией реальных времен вступления отраженных волн. Проведенные численные эксперименты на реальных данных (только один из которых представлен в данной работе) подтверждают работоспособность предложенного алгоритма.

Благодарность

Авторы выражают благодарность ООО «Ингеосервис» за предоставленные реальные данные и возможность опубликовать результаты. М.И. Протасов, К.Г. Гадильшин и Д.А. Неклюдов частично поддержаны грантом Российского научного фонда № 17-17-01128.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдин С.В., Черняк В.С., Судварг Д.И. Система КИНГ: Пакет программ кинематической интерпретации отраженных сейсмических волн. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1980. 136 с.
2. Al-Chalabi M. Series approximation in velocity and traveltimes computations // *Geophys. Prosp.*, 1973, 21, pp. 783–795.
3. Alkhalifah T. Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media // *Geophysics*, 1997, 62, pp. 1839–1854.
4. Fagin S. Model based depth imaging: монография. Талса, США: SEG, 1999. 173 с.
5. Gjoystdal H., Ursin B. Inversion of reflection times in three dimensions // *Geophysics*, 1981, v. 46, № 7, pp. 972–983.
6. Hubral P., Krey T. Interval velocities from seismic reflection time measurements: монография. Талса, США: SEG, 1980. 203 с.
7. Jones I.F. An introduction to: Velocity model Building, EAGE, 2010, Reprint 2014.
8. Lambaré G. Stereotomography. 2008. *Geophysics*, 73(5), pp. VE25–VE34.
9. Paige C.C. and Saunders M.A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1982. 8(1), pp. 43–71.
10. Robein E. Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations, 2010, EAGE. 244 p.
11. Scales J., Gersztenkorn A. and Treitel S. Fast Lp solution of large, sparse linear systems, application to seismic traveltimes tomography. *J. Compu. Phys.*, 1988, 75, 313–333.
12. Woodward V., Nichols D., Zdraveva O., Whitfield P., Johns T. A decade of tomography// *Geophysics*. 2008. № 5. Pp. VE5–VE11.
13. Yilmaz Öz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data // USA: SEG, 2001.
14. <http://www.mcs.anl.gov/petsc>.

REFERENCES

1. Gol'din SV, Chernyak VS, Sudvarg DI. Sistema KING: Paket programm kinematcheskoy interpretatsii otrazhenykh seismicheskikh voln. Novosibirsk: IGiG SO AN SSSR, 1980. 136 p. (in Russian).
2. Al-Chalabi M. Series approximation in velocity and traveltimes computations. *Geophys. Prosp.* 1973; (21): 783–795.
3. Alkhalifah T. Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media. *Geophysics*. 1997; (62): 1839–1854.
4. Fagin S. Model based depth imaging. Talsa, USA: SEG, 1999. 173 p.
5. Gjoystdal H, Ursin B. Inversion of reflection times in three dimensions. *Geophysics*. 1981; 46(7): 972–983.
6. Hubral P, Krey T. Interval velocities from seismic reflection time measurements. Talsa, USA: SEG, 1980. 203 p.
7. Jones IF. An introduction to: Velocity model Building, EAGE, 2010, Reprint 2014.
8. Lambaré G. Stereotomography. *Geophysics*. 2008; 73(5): VE25–VE34.
9. Paige CC and MA. Saunders. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1982; 8(1): 43–71.
10. Robein E. 2010, Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations, EAGE. 244 p.
11. Scales J, Gersztenkorn A and Treitel S. Fast Lp solution of large, sparse linear systems, application to seismic traveltimes tomography. *J. Compu. Phys*. 1988; (75): 313–333.
12. Woodward V, Nichols D, Zdraveva O, Whitfield P, Johns T. A decade of tomography. *Geophysics*. 2008; (5): VE5–VE11.
13. Yilmaz Öz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. USA: SEG, 2001.
14. <http://www.mcs.anl.gov/petsc>.

Положительная рецензия от 19.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ**НЕКЛЮДОВ**

Дмитрий Александрович

В 2000 г. окончил геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многоволновых сейсмических исследований Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН. Научные интересы – обратные задачи сейсмоки и алгоритмы обработки сейсмических данных. Автор более 60 научных публикаций.

**ПРОТАСОВ**

Максим Игоревич

В 2002 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многоволновых сейсмических исследований Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН. Научные интересы – исследования в области разработки алгоритмов обработки данных сейсморазведки. Автор более 100 научных публикаций.

**ГАДЫЛЬШИН**

Кирилл Геннадьевич

Окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, занимается исследованиями в области численных решений обратных задач геофизики. Автор более 20 научных публикаций.

**ИСАКОВ**

Николай Григорьевич

Окончил геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ). Заместитель генерального директора по обработке компании «Ингеосервис».

УДК 550.8

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЗИМУТАЛЬНОЙ AVA-ИНВЕРСИИ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

А.С. Гриневский¹, Д.Е. Мирошниченко¹, И.Н. Керусов¹, Н.В. Шалаева²

¹ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». 109028, Россия, г. Москва, Покровский бульвар, д. 3, стр. 1;
e-mail: antongrin@bk.ru, Dmitriy.Miroshnichenko@lukoil.com, Igor.Kerusov@lukoil.com

² Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1;
e-mail: nvshalaeva@geol.msu.ru

Аннотация. Рассматривается метод азимутальной упругой динамической AVA-инверсии сейсмических данных применительно к двумерным модельным данным и к трехмерным реальным данным. Предлагается и изучается способ регуляризации и повышения качества входных данных для инверсии на основе уравнения Рюгера. Результатами прогноза являются кубы упругих свойств и относительных параметров анизотропии, которые сопоставляются с результатами микросейсмического мониторинга ГРП.

Ключевые слова. Упругая инверсия, азимутальная инверсия, анизотропия, уравнение Рюгера, микросейсмический мониторинг.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF AZIMUTHAL AVA INVERSION: A WEST SIBERIAN CASE STUDY

A.S. Grinevskiy¹, D.E. Miroshnichenko¹, I.N. Kerusov¹, N.V. Shalaeva²

¹ LUKOIL-Engineering LLC. Pokrovskiy blvd., 3/1, Moscow, 109028, Russia;
e-mail: antongrin@bk.ru, Dmitriy.Miroshnichenko@lukoil.com, Igor.Kerusov@lukoil.com

² Faculty of Geology. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia;
e-mail: nvshalaeva@geol.msu.ru

Abstract. This paper considers azimuthal AVA inversion of seismic data: at first, 2D model and then real 3D data. A special regularization procedure based on Rüger equation is proposed and studied. As a result of the inversion, we obtain volumes of elastic properties and relative anisotropy parameters. Their interpretation is based on microseismic monitoring of hydraulic fracturing.

Key words. Elastic inversion, azimuthal inversion, anisotropy, Rüger equation, microseismic monitoring.

ВВЕДЕНИЕ. Современные задачи, которые ставятся перед сейсморазведкой, включают выявление и изучение зон трещиноватости для целей разработки нетрадиционных и карбонатных резервуаров. Решение этих задач требует использования максимального объема сейсмической информации, в том числе широкоазимутальных сейсмических данных. При наличии специально обработанных широкоазимутальных данных (с сохранением информации об азимутах источников – приемник для трасс) один из наиболее распространенных подходов состоит в изучении зависимостей амплитуд отраженных волн от азимута (азимутальный AVO-анализ). Азимутальные атрибуты могут указывать на интенсивность и направление трещиноватости при калибровке их на скважинную информацию. Необходимость расширения метода AVOAz-анализа в область количественного анализа анизотропных свойств пластов обусловила применение азимутальной AVA-инверсии. С учетом возрастающих требований к качеству сейсмических данных и особенностей конкретной методики азимутальной инверсии оказывается особенно важным этап подготовки данных. В этой статье мы делаем акцент главным образом на предлагаемом способе регуляризации и подавления помех на азимутальных сейсмограммах, который позволяет повысить стабильность результатов инверсии.

Динамический анализ в средах НТИ.

Описание метода азимутальной AVA-инверсии

Наличие в горных породах направленной трещиноватости или преобладающего направления гори-

зонтального напряжения приводит к тому, что они проявляют анизотропные свойства. Для описания сред с азимутальной анизотропией применяется широкий класс моделей, простейшей из которых является тип НТИ (ГТИ, горизонтально-трансверсально-изотропная).

Для моделирования амплитуд отраженных волн в средах НТИ в случае слабоконтрастных границ, а также при решении обратных задач используется результат приближенной линеаризации этого уравнения [Rüger, 1998]:

$$R_{PP}(\phi, \theta) = A + (B_{iso} + B_{ani} \cos^2(\phi - \phi_{sym})) \sin^2 \theta + \left(C_{iso} + \frac{1}{2} (\Delta \varepsilon^{(v)} \sin^2(\phi - \phi_{sym})) + \Delta \delta^{(v)} \cos^2(\phi - \phi_{sym}) \right) \sin^2(\phi - \phi_{sym}) \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \theta,$$

$$\text{где: } A = \frac{\Delta V_P}{2V_P} + \frac{\Delta \rho}{2\rho}, B_{iso} = \frac{\Delta V_P}{2V_P} - 4 \left(\frac{\overline{V_S}}{V_P} \right)^2 \left(\frac{\Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta \rho}{2\rho} \right),$$

$$B_{ani} = \frac{1}{2} \left(\Delta \delta^{(v)} + 8 \left(\frac{\overline{V_S}}{V_P} \right)^2 \Delta \gamma \right), C_{iso} = \frac{\Delta V_P}{2V_P}.$$

Параметрами Томсена $\delta^{(v)}$, $\varepsilon^{(v)}$, γ определяется степень анизотропии среды, а ϕ_0 – азимут оси симметрии НТИ-среды.

Для решения обратной задачи (поиска зон с повышенной трещиноватостью) широко применяется азимутальный AVO-анализ [Bakulin et al., 2000; Эпов и др., 2002]. Как и в изотропном случае, азимутальный AVO-анализ имеет ряд ограничений:

характеризует лишь изменение свойств на границе пластов, а также подвержен искажающему влиянию формы сейсмического импульса [Гриневский, Мирошниченко, 2017].

Для преодоления части этих ограничений применяется азимутальная сейсмическая инверсия [Filippova et al., 2016]. На текущий момент технология синхронной азимутальной инверсии (одновременно учитывающей амплитуды по всем азимутам падения, как, например, в работе [Chen et al., 2012]) не получила широкого распространения на практике. В этом исследовании под азимутальной инверсией понимается серия независимых синхронных упругих AVA-инверсий для сейсмических данных, зарегистрированных под разными азимутами. В качестве промежуточного результата выступают наборы азимутальных псевдоупругих параметров: акустического импеданса, сдвигового импеданса и плотности для нескольких азимут, которые впоследствии используются для оценки параметров анизотропии в пластах.

В работе [Mesdag, Quevedo, 2017] приведено описание теории метода и предложены формулы, связывающие азимутальные псевдоупругие свойства, получаемые из инверсии амплитуд отраженных Р-волн, и параметры анизотропии Томсена:

$$Z'_S(\varphi) = Z_{S0} \cdot \left(\gamma_r \sqrt{\delta_r^{(v)}} \right)^{-\cos^2(\varphi - \varphi_0)} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r^{(v)}}{\delta_r^{(v)}} \right)^{\left(\frac{1-4K}{8K} \right) \cos^4(\varphi - \varphi_0)},$$

$$\rho'(\varphi) = \rho_0 \cdot \left(\delta_r^{(v)} \right)^{-\cos^2(\varphi - \varphi_0)} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r^{(v)}}{\delta_r^{(v)}} \right)^{-\cos^4(\varphi - \varphi_0)},$$

$$\text{где } K = \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2, \delta_r^{(v)} = \frac{\delta^{(v)} + 1 - \bar{\delta}^{(v)}}{1 - \bar{\delta}^{(v)}},$$

$$\varepsilon_r^{(v)} = \frac{\varepsilon^{(v)} + 1 - \bar{\varepsilon}^{(v)}}{1 - \bar{\varepsilon}^{(v)}}, \gamma_r = \frac{\gamma + 1 - \bar{\gamma}}{1 - \bar{\gamma}},$$

φ_0 – азимут оси симметрии НТИ-среды, φ – азимут падения волны.

Эти соотношения выведены из уравнения Рюгера. Из представленных формул можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку, согласно уравнению Рюгера, на амплитуды отраженных волн влияют не параметры анизотропии, а лишь их изменения на границах, из инвертированных упругих свойств можно восстановить лишь «относительные» параметры анизотропии $\delta_r^{(v)}$, $\varepsilon_r^{(v)}$, γ_r .

2. Зависимость логарифмов упругих свойств от азимута представляет собой сумму постоянной составляющей и двух гармонически изменяющихся с периодами 90 и 180° величин [Mesdag, Quevedo, 2017]:

$$\ln Z'_S(\varphi) = b_0^{Z_S} + b_2^{Z_S} \cos 2(\varphi - \varphi_0) + b_4^{Z_S} \cos 4(\varphi - \varphi_0),$$

где:

$$b_0^{Z_S} = \ln Z_{S0} - \frac{4K + 3}{64K} \ln \delta_r^{(v)} + \frac{3 - 12K}{64K} \ln \varepsilon_r^{(v)} - \frac{1}{2} \ln \gamma_r,$$

$$b_2^{Z_S} = -\frac{1}{16K} \ln \delta_r^{(v)} + \frac{1 - 4K}{16K} \ln \varepsilon_r^{(v)} + \frac{1}{2} \ln \gamma_r,$$

$$b_4^{Z_S} = -\frac{1 - 4K}{16K} \ln \delta_r^{(v)} + \frac{1 - 4K}{16K} \ln \varepsilon_r^{(v)}.$$

$$\ln \rho(\varphi) = b_0^\rho + b_2^\rho \cos 2(\varphi - \varphi_0) + b_4^\rho \cos 4(\varphi - \varphi_0),$$

где: $b_0^\rho = \ln \rho_0 - \frac{1}{8} \ln \delta_r^{(v)} - \frac{3}{8} \ln \varepsilon_r^{(v)}$, $b_2^\rho = -\frac{1}{2} \ln \varepsilon_r^{(v)}$,

$$b_4^\rho = \frac{1}{8} \ln \delta_r^{(v)} - \frac{1}{8} \ln \varepsilon_r^{(v)}.$$

3. Для перехода от упругих свойств к анизотропным параметрам необходимо вначале оценить амплитуды и фазы гармоник: $b_0^{Z_S}$, $b_2^{Z_S}$, $\varphi_2^{Z_S}$, $b_4^{Z_S}$, $\varphi_4^{Z_S}$, b_0^ρ , b_2^ρ , φ_2^ρ , b_4^ρ , φ_4^ρ .

Затем полученные величины пересчитываются (к примеру, методом наименьших квадратов) в упругие модули и параметры анизотропии: Z_{S0} , ρ_0 , $\delta_r^{(v)}$, $\varepsilon_r^{(v)}$, γ_r .

На практике метод азимутальной AVA-инверсии имеет следующие особенности:

1. Необходимы сейсмические данные высокого качества, зарегистрированные с широкоазимутальной системой наблюдения, обработанные по специальным методикам, включающим миграцию с сохранением азимут.

2. Параметры AVA-инверсии по всем азимутам должны быть идентичны, чтобы не вносить дополнительные факторы в зависимость упругих параметров от азимута.

3. Результат инверсии (относительные параметры анизотропии) ограничен сейсмическим диапазоном частот, поскольку информация об анизотропии не содержится в низкочастотной фоновой модели, а присутствует лишь в сейсмических данных.

4. Результаты неоднозначны: наблюдаемым сейсмическим амплитудам с одинаковой точностью удовлетворяют два различных решения, у которых отличаются знаки коэффициентов анизотропии, а также на полпериода смещен азимут оси симметрии (что приводит к изменению знака косинуса на противоположный). Поэтому, чтобы корректно определять параметры анизотропии, необходимо иметь априорную информацию: либо направление оси симметрии (с точностью до 90°), либо знаки 2-й и 4-й гармоник.

Тестирование азимутальной инверсии и методов стабилизации результата на двумерной синтетической модели

Для оценки устойчивости инверсии AVOAz и тестирования способов повышения качества данных была создана двумерная модель. Она представляет собой разрез изотропной среды с анизотропным (НТИ) пластом мощностью 50 м (рис. 1, А). Свойства анизотропного пласта меняются по латерали, опираясь на четыре псевдоскважины с линейной интерполяцией в пространстве между ними. Параметры модели приведены в таблице 1. На рис. 1, Б и В приведены относительные параметры анизотропии $\delta_r^{(v)}$, $\varepsilon_r^{(v)}$, γ_r в полном частотном диапазоне и сейсмической полосе частот, соответственно.

Для описанной модели были смоделированы синтетические сейсмограммы для набора углов и азимут падения волны. Расчет проводился сверточным

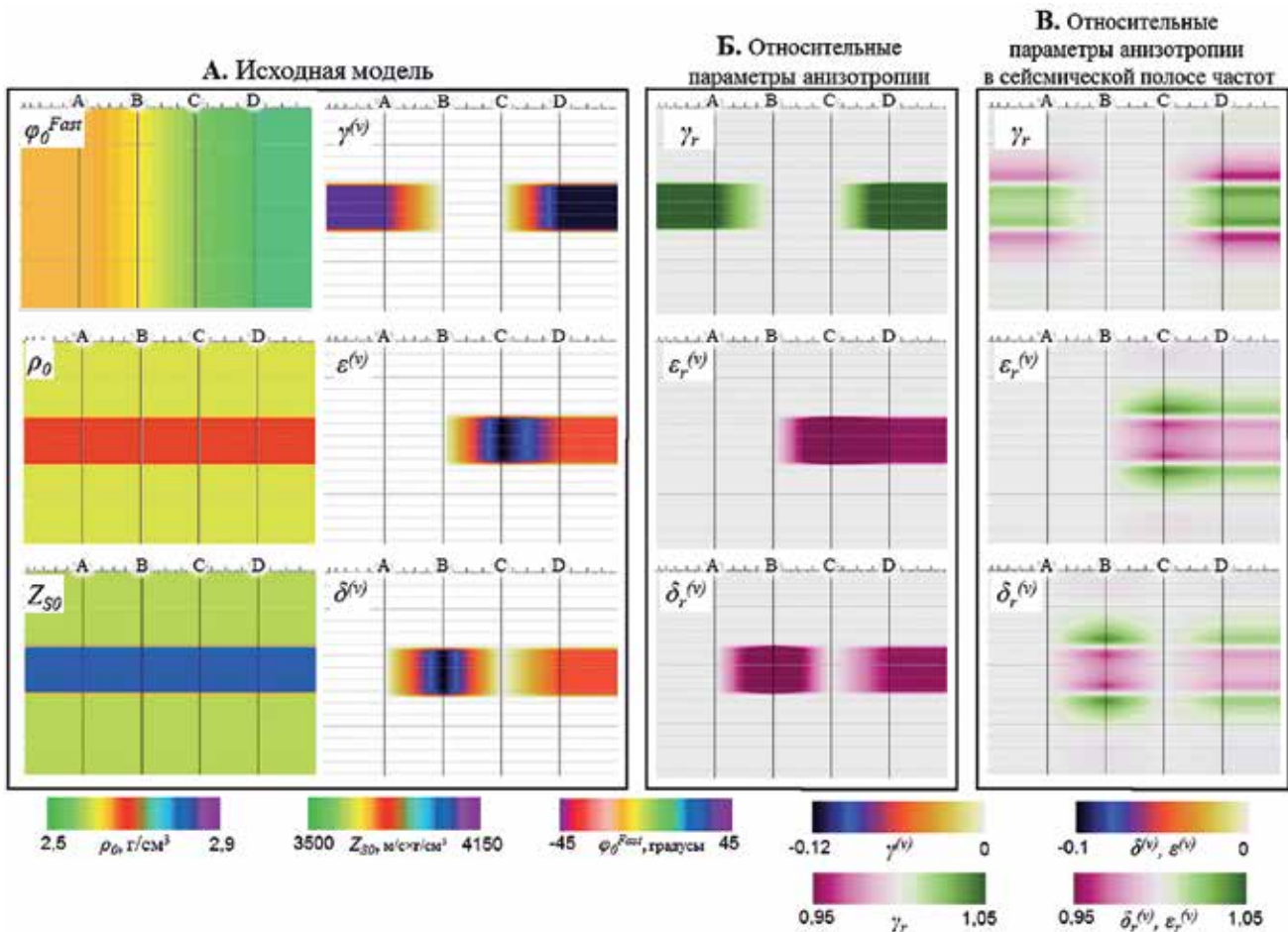


Рис. 1
Исследуемая двумерная модель – разрез параметров анизотропии

методом без учета кинематических эффектов, для чего применялось трехчленное уравнение Рюгера и импульс Рикера с центральной частотой 30 Гц. Таким образом, были получены сейсмограммы общего угла и азимута, т.е. трассы в них отсортированы по углу и азимуту падения.

Результат инверсии AVOAz для этой модели приведен на рис. 2, А. В основном результат соответствует исходной модели, но он ограничен частотным диапазоном сейсмических данных. Как для расчета синтетических сейсмограмм, так и для анализа результатов азимутальной инверсии был создан набор программ на языке Python [Python Software Foundat

Таблица 1
Упругие и анизотропные параметры исследуемой модели разреза

	Анизотропный пласт				Вмещающие породы
	А	В	С	Д	
V_p , м/с	2500	2500	2500	2500	2300
V_s , м/с	1500	1500	1500	1500	1400
Плотность, г/см ³	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6
φ_ρ , градусы	-15	-7	7	15	–
$\delta^{(v)}$	0	-0,1	0	-0,05	0
$\epsilon^{(v)}$	0	0	-0,1	-0,05	0
γ	0,100	0	0	0,149	0

ion, www.python.org] с модулями *NumPy* для вычислений [Oliphant, 2006] и *ObsPy* для работы с сейсмическими данными [Beyreuther et al., 2010].

Затем в данные был добавлен случайный гауссовский шум со стандартным отклонением амплитуд 15% от амплитуды отражения от кровли пласта, после чего инверсия была рассчитана по зашумленным данным (рис. 2, Б). В отличие от предыдущего расчета, для инверсии использовались только трассы для углов падения 10–50°, поскольку в реальности амплитуды на трассах ближних углов падения зачастую бывают искажены и в инверсии не участвуют. Из-за помех и отсутствия части данных результат зашумлен и неустойчив. Одна из основных причин этого состоит в том, что инверсия по разным азимутам рассчитывается независимо. Без данных для ближних углов падения в присутствии помех решение дестабилизируется, т.к. именно трассы нормального падения являются общими для всех азимутов и выступают в роли связующего элемента между формально независимыми инверсиями.

Для того чтобы повысить устойчивость результата AVOAz-инверсии к помехам, было проведено улучшение сейсмических данных по следующему алгоритму, проиллюстрированному на рис. 3. В верхнем ряду на рисунке приведены сейсмограммы общего угла и азимута, в нижнем – точками показаны амплитуды отражений от кровли анизотропного пласта, а линиями – аппроксимация этих

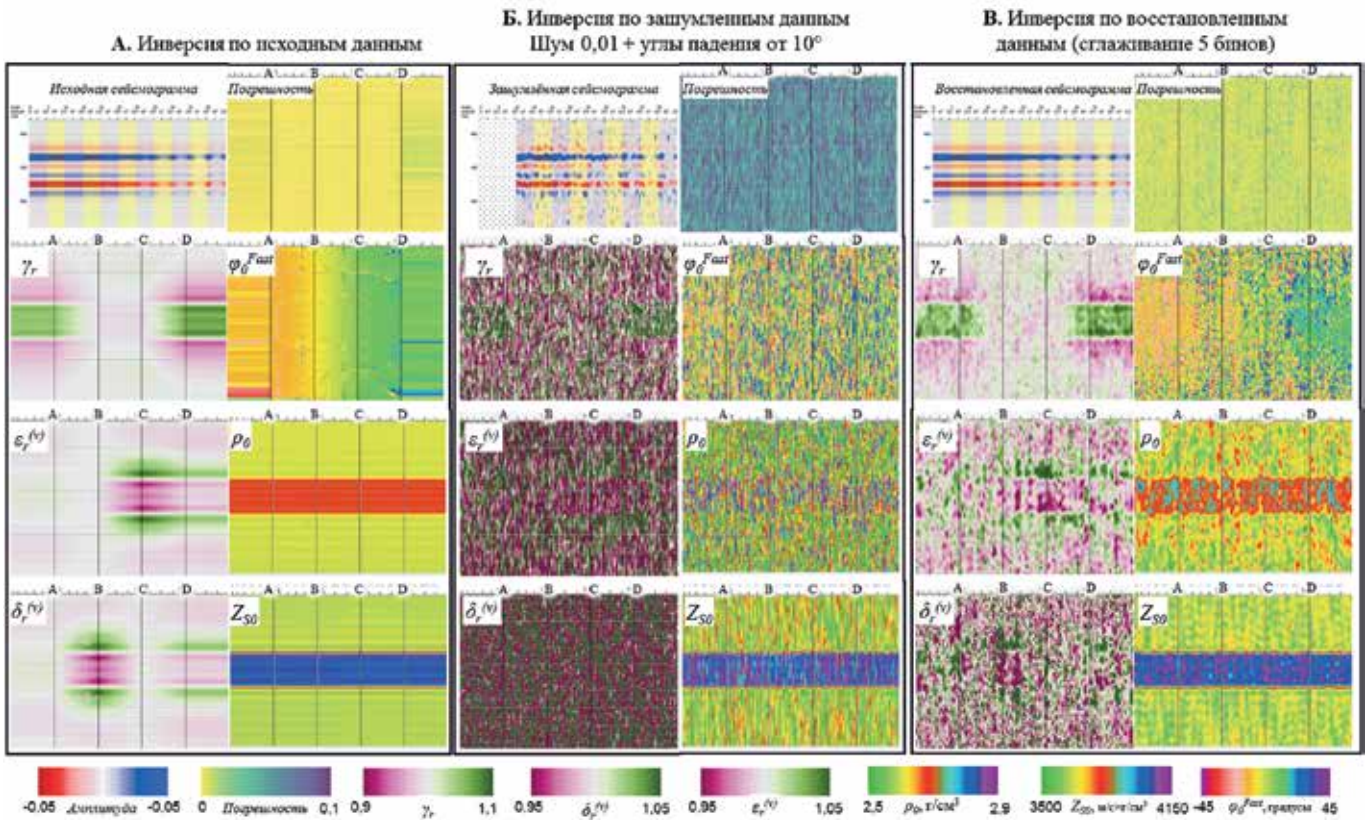


Рис. 2

Пример расчета азимутальной AVA-инверсии для изучаемой 2D-модели по исходным сейсмическим данным (А), зашумленным данным (Б), восстановленным данным (В)

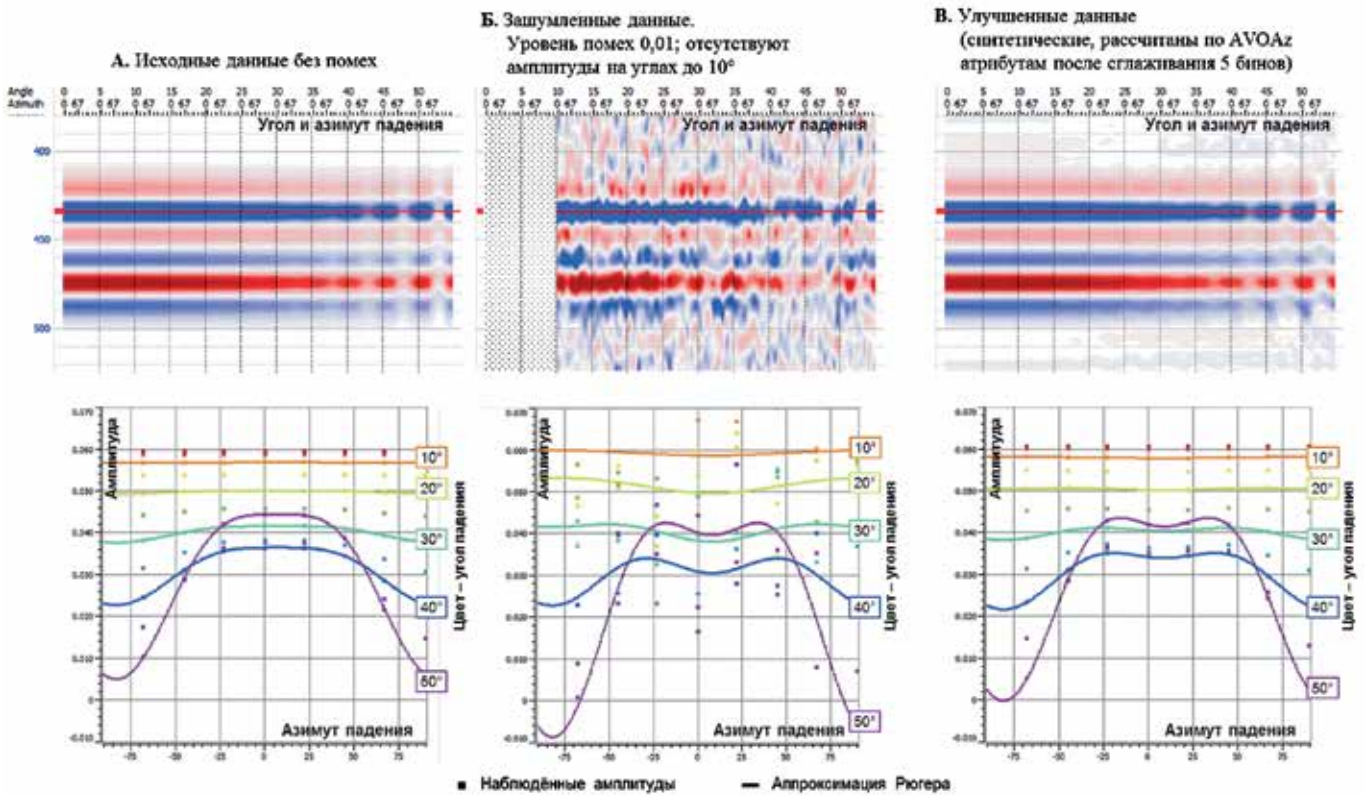


Рис. 3

Пример расчета AVOAz-атрибутов по исходным сейсмическим данным (А), зашумленным данным (Б) и улучшенным данным (В)

амплитуд трехчленным уравнением Рюгера. Слева направо показаны различные стадии подготовки данных, в частности, на рис. 3, А показаны исходные синтетические данные.

Вначале по зашумленным сейсмограммам рассчитываются AVOAz-атрибуты (рис. 3, Б). В данном примере углы падения до 10° не учитывались, а трассы были накоплены на базе 5 бинов. Полученные AVOAz-атрибуты используются для моделирования «восстановленных» синтетических данных для произвольного набора углов и азимутов падения в соответствии с уравнением Рюгера. Таким образом, AVOAz-атрибуты, рассчитанные по восстановленным данным, в точности совпадают с атрибутами, рассчитанными по исходным данным (рис. 3, В). Преимуществом восстановленных сейсмограмм является регулярность трасс по углам падения и азимутам, а также полное соответствие амплитуд на каждом отсчете трехчленному уравнению Рюгера. Аналогичный подход для изотропной AVA-инверсии применялся, например, в работе [Agévalo-López, Dvorkin, 2017].

В результате описанных процедур улучшения данных независимые инверсии по разным азимутам получаются взаимосвязанными, т.к. сейсмические амплитуды для разных азимутов объединены между собой уравнением Рюгера.

В итоге на рис. 2, В приведены результаты азимутальной инверсии для «улучшенных» данных. Отмечается, что процедуры повышения качества обеспечивают существенный прирост информации по сравнению с результатами расчетов по «сырым» данным при наличии помех и отсутствии данных для ближних углов падения. В дальнейшем этот алгоритм стабилизации решения был использован при расчете инверсии на реальных сейсмических данных.

Описание реальных сейсмических материалов. Подготовка сейсмограмм

Азимутальная инверсия по рассмотренному выше алгоритму была рассчитана по 3D сейсмическим данным на одном из месторождений Западной Сибири. Целевой интервал – пласты группы АС. Сейсмические данные имеют кратность 144, что для целей азимутальной инверсии близко к наименьшему допустимому значению. Данные были мигрированы по технологии EarthStudy360 (полноазимутальная глубинная миграция в области локальных углов и азимутов [Kogin, 2011]).

В процессе обработки данных было выполнено достаточно агрессивное подавление кратных волн. Пачка АС из-за особенностей своего строения порождает значительное количество неполнократных отражений, при подавлении которых неизбежно искажаются амплитуды однократно отраженных волн на углах падения до $25\text{--}30^\circ$. Другая особенность входных данных состояла в том, что сейсмограммы после миграции представлены в так называемой улиточной сортировке, обеспечивающей равномерное покрытие по углам и азимутам отражения (рис. 4, А). При пересчете входных данных на требуемую геометрию образуются пропущенные трассы

(рис. 4, Б), что негативно сказывается на азимутальной инверсии.

В таких условиях для расчета азимутальной инверсии необходимо было применить процедуры повышения качества данных, рассмотренные ранее. Кроме того, это обеспечило регулярность данных (заполнение пропущенных трасс). Для стабилизации было выполнено накопление 7×7 бинов, что повысило кратность и соотношение сигнал/помеха.

Для инверсии, таким образом, использовались синтетические данные, рассчитанные по AVOAz-атрибутам (рис. 4, В), которые были оценены по реальным сейсмограммам на углах падения $30\text{--}50^\circ$. Для расчета инверсии использовались углы падения $0\text{--}50^\circ$, что позволило восстановить значения упругого импеданса, сдвигового импеданса и плотности.

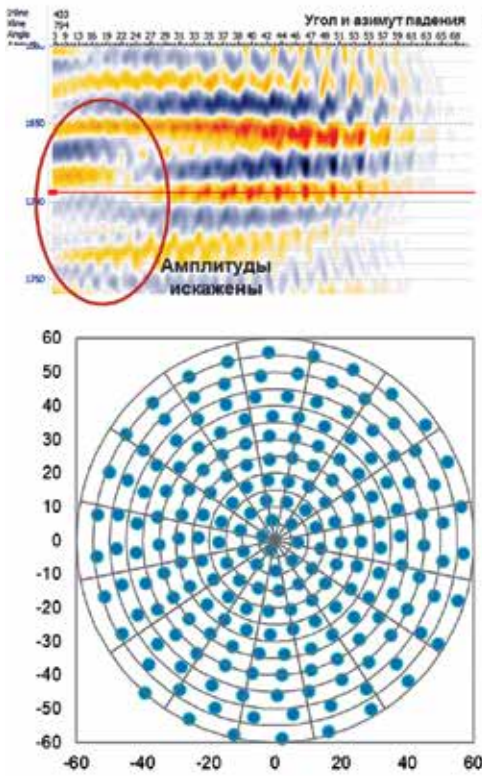
Анализ и интерпретация результатов азимутальной инверсии

Интерпретация результатов инверсий по различным секторам проводилась в соответствии с формулами и методикой, предложенными в [Mesdag, Quevedo, 2017], а также представленными ранее и опробованными на 2D-модели. Был рассчитан набор кубов упругих и анизотропных параметров. В интервале целевого пласта были рассчитаны карты максимального отклонения значений относительных параметров от единицы (рис. 5, А). *Наличие положительной связи с коэффициентом корреляции 0,82 между $\delta_r^{(v)}$ и γ_r (рис. 5, Б) вызвано, по-видимому, тем, что наибольший вес в их расчете принадлежит анизотропии сдвигового импеданса, в то время как $\epsilon_r^{(v)}$ вносит вклад в основном в анизотропию плотности и содержит независимую информацию о свойствах пород.*

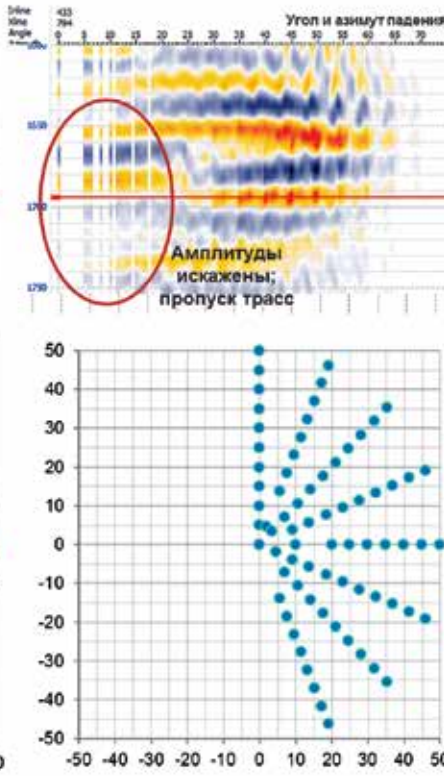
Для интерпретации параметров анизотропии в терминах свойств трещин обычно привлекают данные скважинных микроимиджеров, но в данном случае подобная информация отсутствовала. Поэтому результаты азимутальной инверсии были сопоставлены с данными микросейсмического мониторинга гидравлического разрыва пласта (МСМ ГРП). ГРП проводился в двух горизонтальных скважинах, одна скважина использовалась для размещения приемной расстановки. Общая конфигурация системы наблюдения и положение микросейсмических событий приведены на рис. 6, А, Б. Длины «облаков» микросейсмических событий лежат в диапазоне 250–450 метров.

Прямое сопоставление свойств микросейсмических событий с величинами параметров анизотропии показало полное отсутствие статистической связи между ними. Это говорит о том, что возникновение в данной точке среды микросейсмического события при ГРП – явление сложное и многофакторное. Действительно, невозможно предсказать его появление и свойства по одним лишь значениям азимутальной анизотропии в среде. Среди основных факторов – расстояние до муфты ГРП и до точки наблюдения, преобладающее направление горизонтального стресса, упругие свойства пород и т.д.

А. Исходные данные после полноазимутальной миграции (сортировка «улитка»)



Б. Исходные данные в сортировке «общий угол по азимуту»



В. Улучшенные данные (восстановлены по AVOAz-атрибутам после накопления на базе 7x7 бинов)

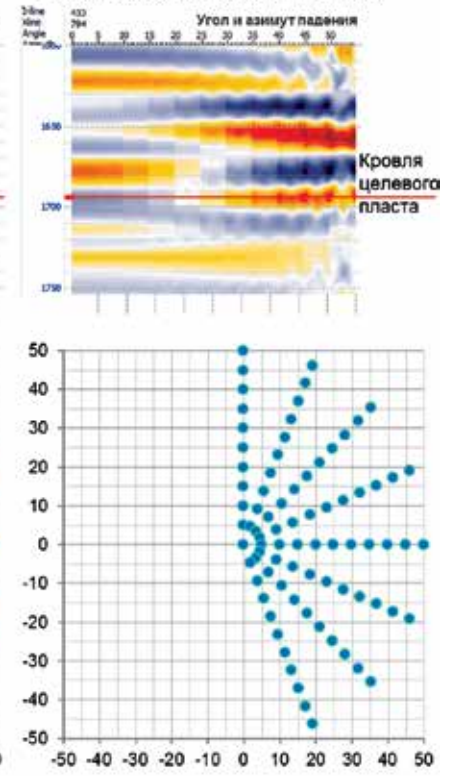
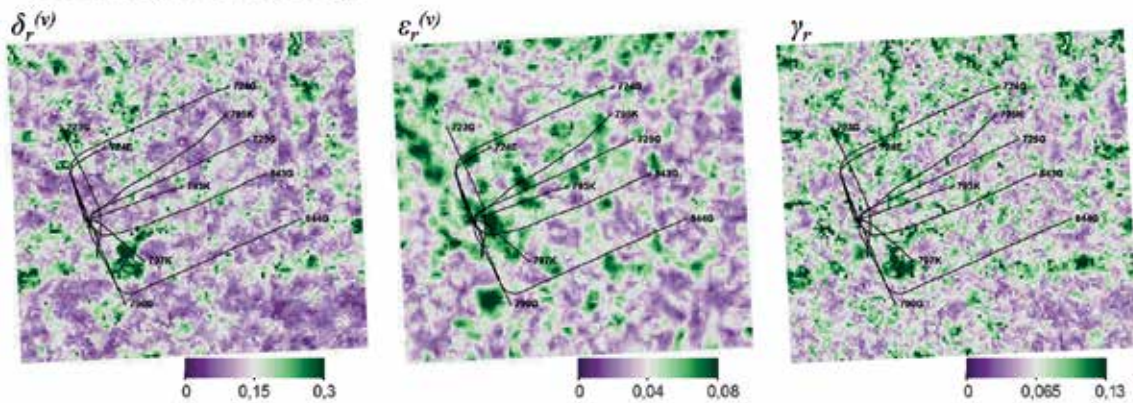


Рис. 4

Подготовка данных к азимутальной инверсии на разных стадиях (А, Б, В).

В верхнем ряду: фрагменты сейсмограмм; в нижнем ряду: распределение трасс по углам и азимутам

А. Карты наибольшего абсолютного отклонения относительных параметров анизотропии от 1 в интервале пласта AC₃



Б. Кросс-плоты между относительными параметрами анизотропии (значение на 7 мс ниже кровли пласта AC₃)

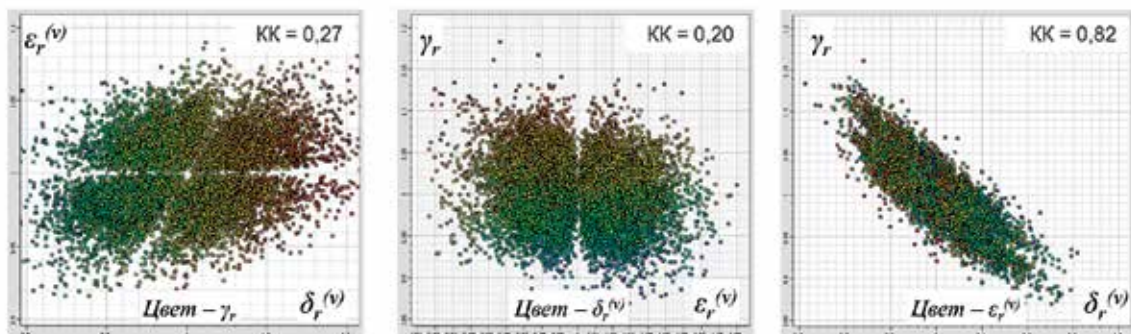


Рис. 5

Карты (А) и кросс-плоты (Б) рассчитанных параметров анизотропии в пределах пласта AC₃

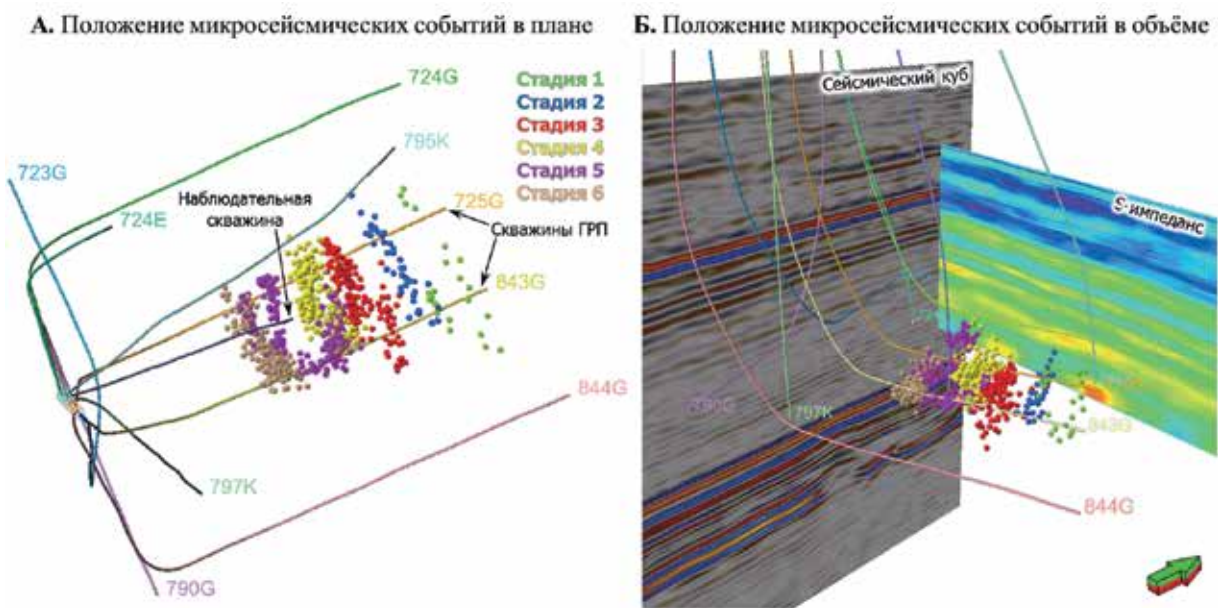


Рис. 6

Общая конфигурация системы наблюдения и положение микросейсмических событий в плане (А) и в объеме (Б)

С учетом погрешностей из-за качества сейсмических данных (сравнительно невысокая кратность и низкая достоверность амплитуд на ближних углах падения) допустимо ограничиться качественным анализом результатов. Отмечено, что микросейсмические события в основном тяготеют к средним значениям параметров анизотропии. Возможное объяснение этого явления состоит в том, что породы с высокими значениями анизотропии характеризуются более высокой естественной трещиноватостью и закачка в них жидкости при ГРП приводит к меньшей микросейсмической активности. В породах, не подверженных трещиноватости вообще (низкие значения анизотропии), меньше вероятность возникновения новой трещины. Таким образом, можно говорить о том, что на качественном уровне анизотропные параметры могут указывать зоны, более или менее благоприятные для развития сети трещин при ГРП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Рассмотренный метод азимутальной AVA-инверсии позволяет получать сведения об анизотропии горных пород на основе анализа динамических характеристик отраженных волн. Для выполнения этой задачи повышаются и требования к сейсмическим данным. С некоторыми их недостатками удастся успешно справиться с помощью пред-

ложенного в статье способа стабилизации решения на основе уравнения Рюгера. Рекомендуется использовать рассчитанные по исходным зашумленным и нерегулярным данным AVOAz-атрибуты для синтеза восстановленных сейсмограмм перед инверсией. Это обеспечивает необходимое распределение трасс по углам и азимутам, а также соответствие амплитуд теоретическим значениям, что позволяет получать более устойчивый результат. В рассмотренном примере предложенный способ позволил рассчитать азимутальную инверсию, несмотря на высокий уровень помех и низкое качество данных на ближних углах падения. Сопоставление анизотропных параметров с данными мониторинга ГРП показало, что для прогноза таких многофакторных процессов, как развитие трещин при гидроразрыве пласта, по-видимому, анизотропные свойства пород не имеют определяющего значения. Для данных сейсмогеологических условий и существующих сейсмических данных объяснение геометрии распределения микросейсмических событий на основе значений анизотропии возможно лишь на качественном уровне.

Благодарность

Авторы выражают благодарность компании «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» за предоставленные данные и возможность публикации этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гривневский А.С., Мирошниченко Д.Е. Особенности применения азимутальной AVA-инверсии для анализа сейсмической анизотропии // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии – 2017». ООО «Издательство Полипресс», 2017. С. 209–212.
 2. Этов К.А., Соенко В.Л., Керусов И.Н. Азимутальный AVO-анализ – выявление зон трещиноватости карбонатных коллекторов при 3D-сейсморазведке // Геофизика. 2002. Специальный выпуск. С. 91–95.

3. Arévalo-López H.S., Dvorkin J.P. Simultaneous impedance inversion and interpretation for an offshore turbiditic reservoir // Interpretation. 2017. V. 5. № 3. P. SL9–SL23.
 4. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data–Part I: HTI model due to a single fracture set // Geophysics. 2000. V. 65. №. 6. P. 1788–1802.
 5. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y. and Wassermann J. ObsPy: A Python Toolbox for Seismology // Seismological Research Letters, 81 (3). 2010. P. 530–533.

6. *Chen H., Zhang G., Yin X.* AVAZ inversion for elastic parameter and fracture fluid factor // SEG Tech. Progr. Expand. Abstr. 2012. № 2. P. 1–5.

7. *Filippova K. et al.* Stress identification with an azimuthal inversion technique – a case study for a clastic oil field // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016. Society of Exploration Geophysicists, 2016. P. 2801–2805.

8. *Koren Z., Ravve I.* Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging. Part I: Directional and reflection image gathers // Geophysics. 2011. V. 76. № 1. P. S1–S13.

9. *Mesdag P.R., Quevedo L.* Quantitative inversion of azimuthal anisotropy parameters from isotropic techniques // Lead. Edge. 2017. V. 36. № 11. P. 916–923.

10. *Oliphant T.* A guide to NumPy. USA: Trelgol Publishing, 2006.

11. *Rüger A.* P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry // Geophysics. 1997. V. 62. № 3. P. 713–722.

12. *Rüger A.* Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media // Geophysics. 1998. V. 63. № 3. P. 935–947.

REFERENCES

1. *Grinevskiy AS, Miroshnichenko DE.* Using azimuthal AVA inversion for seismic anisotropy analysis. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii Seismicheskie tekhnologii – 2017 [Proc. Conf. Seismic Technologies – 2017]. Tver: Polypress, 2017. Pp. 209–212 (in Russian).

2. *Epov KA, Soenko VL, Kerusov IN.* Azimuthal AVO analysis – revealing fractured zones in carbonate reservoirs with 3D seismic data. *Geophysics*. 2002; (S): 91–95 (in Russian).

3. *Arévalo-López HS, Dvorkin JP.* Simultaneous impedance inversion and interpretation for an offshore turbiditic reservoir. *Interpretation*. 2017; 5(3): SL9–SL23. doi: 10.1190/INT-2016-0192.1.

4. *Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I.* Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*. 2000; 65(6): 1788–1802. doi: 10.1190/1.1444863.

5. *Beyreuther M, Barsch R, Krischer L, Megies T, Behr Y, Wassermann J.* ObsPy: A Python Toolbox for Seismology. *Seismol. Res. Lett.* 2010; 81(3): 530–533. doi: 10.1785/gssrl.81.3.530.

6. *Chen H, Zhang G, Yin X.* 2012. AVAZ inversion for elastic parameter and fracture fluid factor, in: SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2012, pp. 1–5. doi: 10.1190/segam2012-0067.1.

7. *Filippova K, Yakovleva I, Mesdag P, Pavlovskiy Y.* Stress identification with an azimuthal inversion technique – a case study for a clastic oil field, in: SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016, pp. 2801–2805. doi: 10.1190/segam2016-13868489.1.

8. *Koren Z, Ravve I.* Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging. Part I: Directional and reflection image gathers. *Geophysics*. 2011; 76(1): S1–S13. doi: 10.1190/1.3511352.

9. *Mesdag P, Quevedo L.* Quantitative inversion of azimuthal anisotropy parameters from isotropic techniques. *Lead. Edge*. 2017; 36(11): 916–923. doi: 10.1190/tle36110916.1.

10. *Oliphant T.* A guide to NumPy. USA: Trelgol Publishing, 2006.

11. *Rüger A.* P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry. *Geophysics*. 1997; 62(3): 713–722. doi: 10.1190/1.1444181.

12. *Rüger A.* Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. *Geophysics*. 1998; 63(3): 935–947. doi: 10.1190/1.1444405.

Положительная рецензия от 22.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



ГРИНЕВСКИЙ
Антон Сергеевич

Геофизик отдела сейсмических исследований по приоритетным проектам ЦСИ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ. Основные научные интересы: количественная интерпретация сейсмических данных, анализ сейсмической анизотропии.



МИРОШНИЧЕНКО
Дмитрий Евгеньевич

Начальник отдела сейсмических исследований по приоритетным проектам ЦСИ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», кандидат физико-математических наук. Окончил геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 2003 г. Основные научные интересы: динамическая интерпретация сейсмических данных, многоволновая сейсморазведка.



КЕРУСОВ
Игорь Николаевич

Начальник центра сейсмических исследований ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», кандидат геолого-минералогических наук. Окончил Ивано-Франковский институт нефти и газа в 1978 г. Автор и соавтор более 40 научных работ. Основные научные интересы: интерпретация сейсмических данных, многопараметрическое сейсмогеологическое моделирование.



ШАЛАЕВА
Наталья Владимировна

Старший научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ, кандидат геолого-минералогических наук. Окончила геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1973 г. Автор и соавтор более 40 научных работ. Основные научные интересы: математическое моделирование сейсмических волновых полей, методы динамического анализа сейсмических данных, интерпретация сейсмических данных.

УДК 550.834.05

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА, ОСНОВАННАЯ НА МОДЕЛИ

А.С. Гаркин¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1; e-mail: agarkin@list.ru

Аннотация. В статье рассмотрен способ компенсации неидентичности импульса по сейсмическим суммированным данным. Выполнены 1D-моделирование и коррекция результатов разными методами оптимизации.

Ключевые слова. Сейсморазведка, импульс, инверсия, атрибутивный анализ.

MODEL-BASED AMPLITUDE PHASE CORRECTION

A.S. Garkin¹

¹ Dept. of Exploration Geophysics in Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Leninsky prospekt, 65, bld. 1, Moscow, Russia, 119991; e-mail: agarkin@list.ru

Abstract. In the article, way of wavelet form compensation for poststack seismic data is shown. 1D modeling was carried out and correction with different optimization methods was done.

Key words. Seismic survey, wavelet, inversion, attribute analysis.

ВВЕДЕНИЕ. Решение обратной динамической задачи тесно связано с определением формы импульса. Некорректное восстановление упругих параметров приводит к ложным выводам и нерезультативному бурению. Влияние формы сигнала на результат инверсии отмечено в ряде работ [2, 5].

Для решения данного вопроса наиболее часто применяются технологии интерполяции извлеченных сигналов [6]. Такой подход наиболее устойчив в случаях со слабыми изменениями формы сигнала, однако при более резких изменениях подобный метод способен внести существенные искажения [6]. В данной статье предлагается вариант компенсации неидентичности импульса на основе алгоритма амплитудно-фазовой коррекции.

В качестве тестируемого материала рассматриваются синтетические данные, полученные в результате свертки переменного импульса с трассами коэффициентов отражений.

Теория

Сейсмическую трассу в частотной области можно представить в виде сверточной модели:

$$S(w) = R(w) * W(w) + N(w),$$

где S – сейсмическая трасса, R – трасса коэффициентов отражений, W – импульс, N – шум.

Чтобы компенсировать влияние формы импульса в сейсмической трассе, требуется выполнить оценку самого импульса для расчета обратного фильтра.

Алгоритм амплитудно-фазовой коррекции сводится к построению синтетического волнового поля, на основе которого оценивается оператор фильтра. Синтетика рассчитывается исходя из модели среды, получаемой интерполяцией кривых импеданса по ГИС в межскважинном пространстве. В общем виде задача сводится к поиску минимума функционала:

$$F(W) = (S - W * R_{mod})^2 + \lambda * (W - W_{apr})^2, \\ W = \operatorname{argmin}\{F(W)\},$$

где S – сейсмическая трасса, W – оцениваемый сигнал, R_{mod} – модельная трасса коэффициентов отражений, получаемая из интерполированных кривых ГИС, W_{apr} – априорный сигнал, λ – коэффициент регуляризации.

Сам функционал, кроме самого импульса, зависит от двух основных параметров – длины импульса и коэффициента регуляризации. Для каждой длины сигнала можно построить свою кривую L [3], формируя таким образом поверхность. Оптимальные значения параметров получаются как минимум функции:

$$[L, \lambda] = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^n (S_i - W_i(L, \lambda) * (R_{mod})_i)^2 \right\},$$

где n – количество скважин, участвующих в анализе.

Теперь рассмотрим предпосылки к успешному решению задачи. Представим истинную трассу коэффициентов отражений в виде:

$$R = R_{mod} + \Delta R,$$

где ΔR – разница между модельными и истинными значениями.

Представление целевой функции сводится к следующему:

$$F(W) = (W_{real} * (R_{mod} + \Delta R) - W * R_{mod} + N)^2 + \lambda * (W - W_{apr})^2.$$

Пусть функции $\Delta R(t)$, $\Delta R(-t)$, $N(t)$, $N(-t)$ представлены векторами случайных чисел со средним значением в нуле. Будем считать, что R_{mod} , ΔR и N не связаны между собой. Тогда можно воспользоваться тем, что подобные функции будут ортогональны друг другу во временной области [4]. Из этого следует, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta R(\tau - t) * R_{mod}(t) * dt \approx 0, \forall \tau \\ \int_{-\infty}^{\infty} \Delta R(\tau - t) * N(t) * dt \approx 0, \forall \tau$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau - t) * R_{mod}(t) * dt \approx 0, \forall \tau.$$

Значение таких интегралов во временной области соответствует произведению в частотной области, поэтому выражение целевой функции упрощается:

$$F(W) = R_{mod}^2 * (W_{real} - W)^2 + W_{real}^2 * \Delta R^2 + N^2 + \lambda * (W - W_{appr})^2.$$

Если добавить условие, что значения ΔR , N и λ достаточно малы, то минимум целевой функции будет соответствовать истинному импульсу.

В итоге можно отметить, что успех коррекции зависит от двух основных факторов:

1. Разница между истинной и модельной трассами коэффициентов отражений, а также шум в сейсмической трассе должны носить случайный характер.

2. Значения вышеотмеченных функций должны быть гораздо меньше значений синтетической трассы в исследуемой полосе частот.

Моделирование

Основная часть работы была проведена в программном комплексе Hampson Russel версии 2.2.1. При моделировании были задействованы пять скважин с кривыми плотности и скорости продольных волн. Отличие в кривых по скважинам носит случайный характер. Эта модель и все ее производные будут обозначаться как истинные. Далее выполнена интерполяция кривых в межскважинном пространстве и получен синтетический временной разрез с нуль-фазовым сигналом в полосе частот 10–60 Гц длиной 200 мс (рис. 1). Искажения в импульс вносились путем свертки с оператором, состоящим из двух коэффициентов, где второй коэффициент менялся по разрезу (рис. 2). Получаемые таким образом импульсы показаны на рис. 3. В качестве модели импедансов для алгоритма амплитудно-фазовой коррекции использовались проинтерполированные значения кривой импеданса по скважине номер 3 с помощью четырех горизонтов (рис. 4, 5). Выполнение коррекции выполнялось четырьмя различными способами:

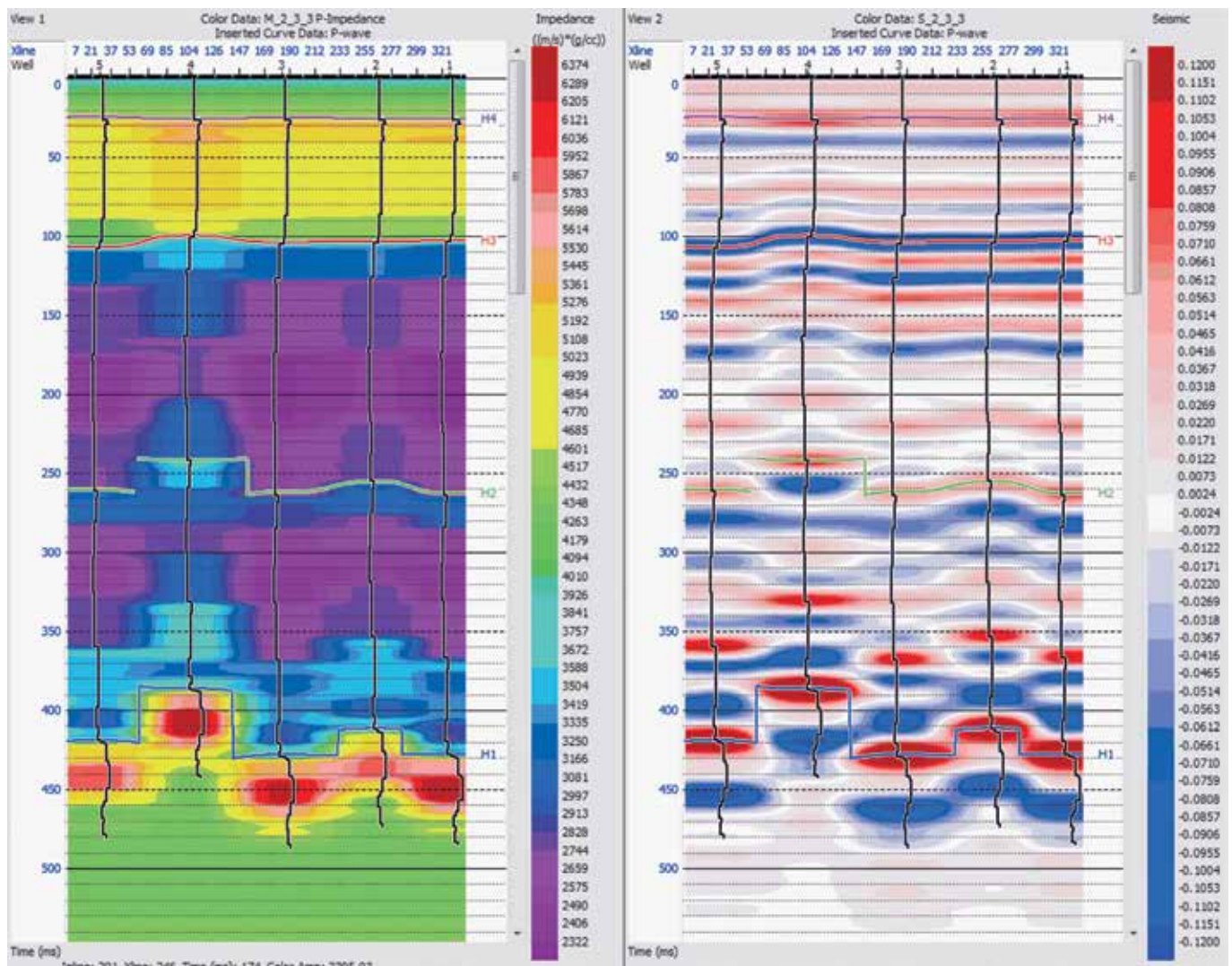


Рис. 1

Истинная модель импедансов (слева) и синтетическое волновое поле с нуль-фазовым сигналом (справа). Черным цветом показаны кривые импеданса

1. Формирующая фильтрация.
2. Формирующая фильтрация с кластеризацией полученных импульсов.
3. Формирующая фильтрация с кластеризацией и сглаживанием полученных импульсов.
4. Нелинейная оптимизация с регуляризацией.

Первый способ представляет собой обычный метод наименьших квадратов (МНК) без регуляризации. Во втором варианте после получения импульсов по МНК была проведена кластеризация [1] полученных импульсов (четыре кластера). Сделано это было с целью сгруппировать импульсы и тем самым уменьшить неопределенность, вносимую неточной моделью. В третьем способе к фильтрам после кластеризации было применено сглаживание по латерали, и последний способ является нелинейной оптимизацией с подобранным параметром регуляризации и априорным сигналом. В роли априорного сигнала выступал статистический нуль-фазовый сигнал.

Перед выполнением коррекции была оценена оптимальная длина фильтра и параметр регуляризации по алгоритму, описанному выше. Длина фильтра составила 60 мс для первых трех способов и 50 мс – для нелинейной оптимизации, параметр регуляризации – 0,4 ед.

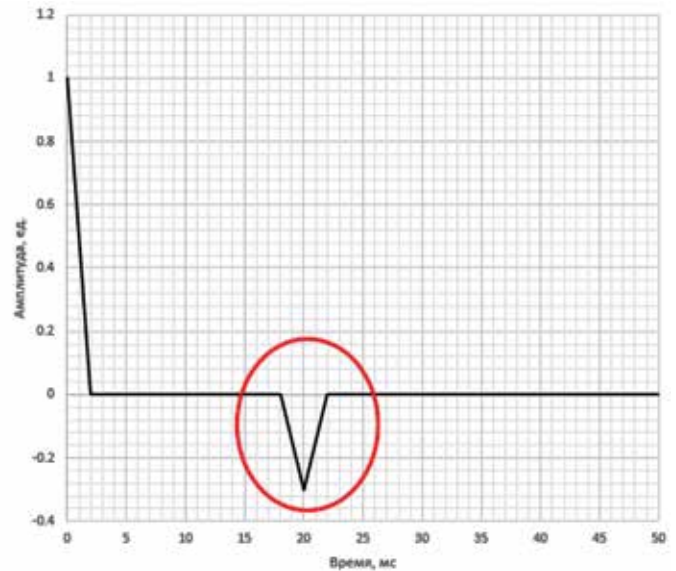


Рис. 2
Оператор свертки для внесения искажений в сигнал.
Красным обведен коэффициент, который меняется по разрезу

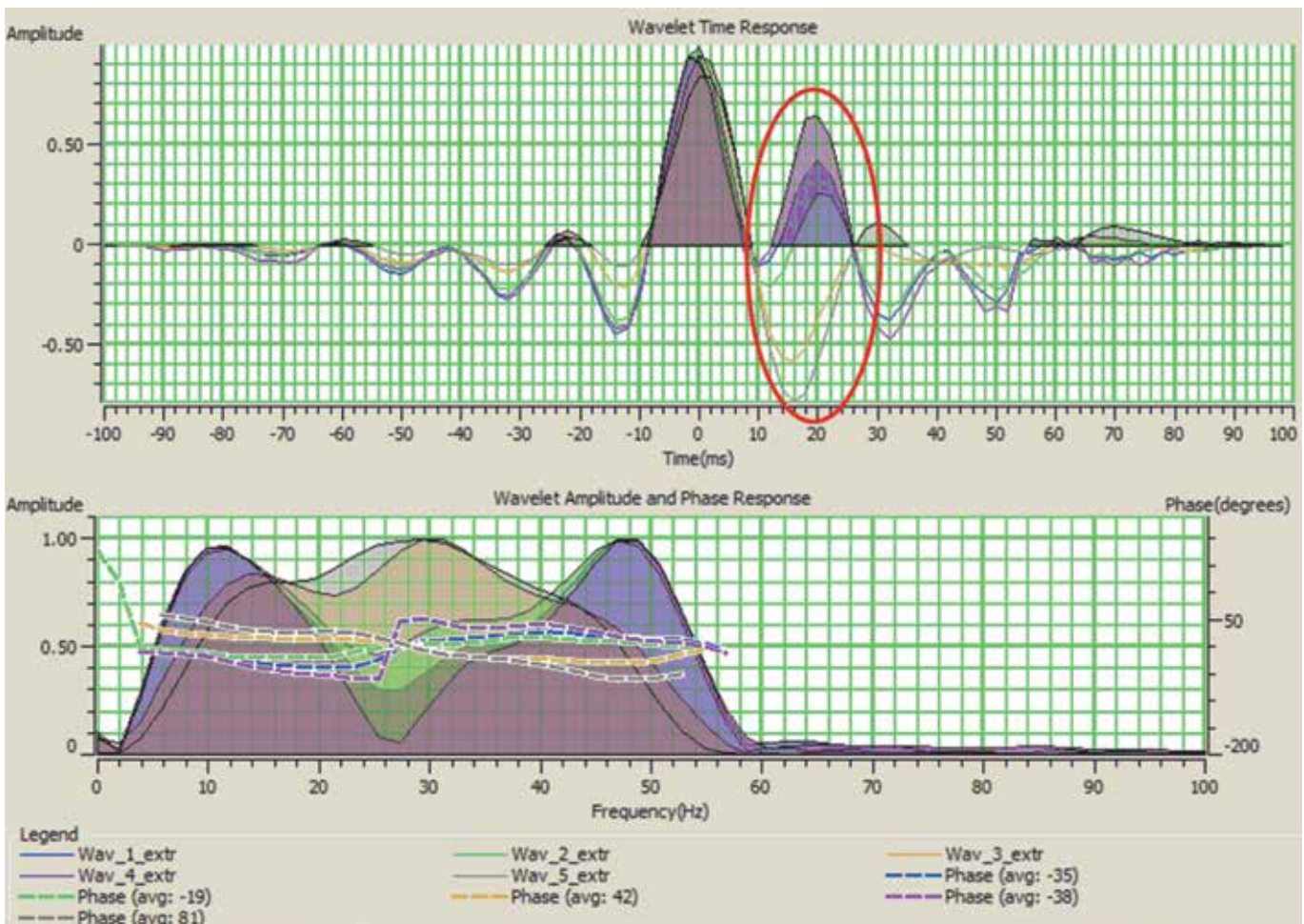


Рис. 3
Извлеченные импульсы в скважинах № 1-5 по разрезу с переменным сигналом.
Красным цветом выделена часть импульса, меняющаяся по разрезу

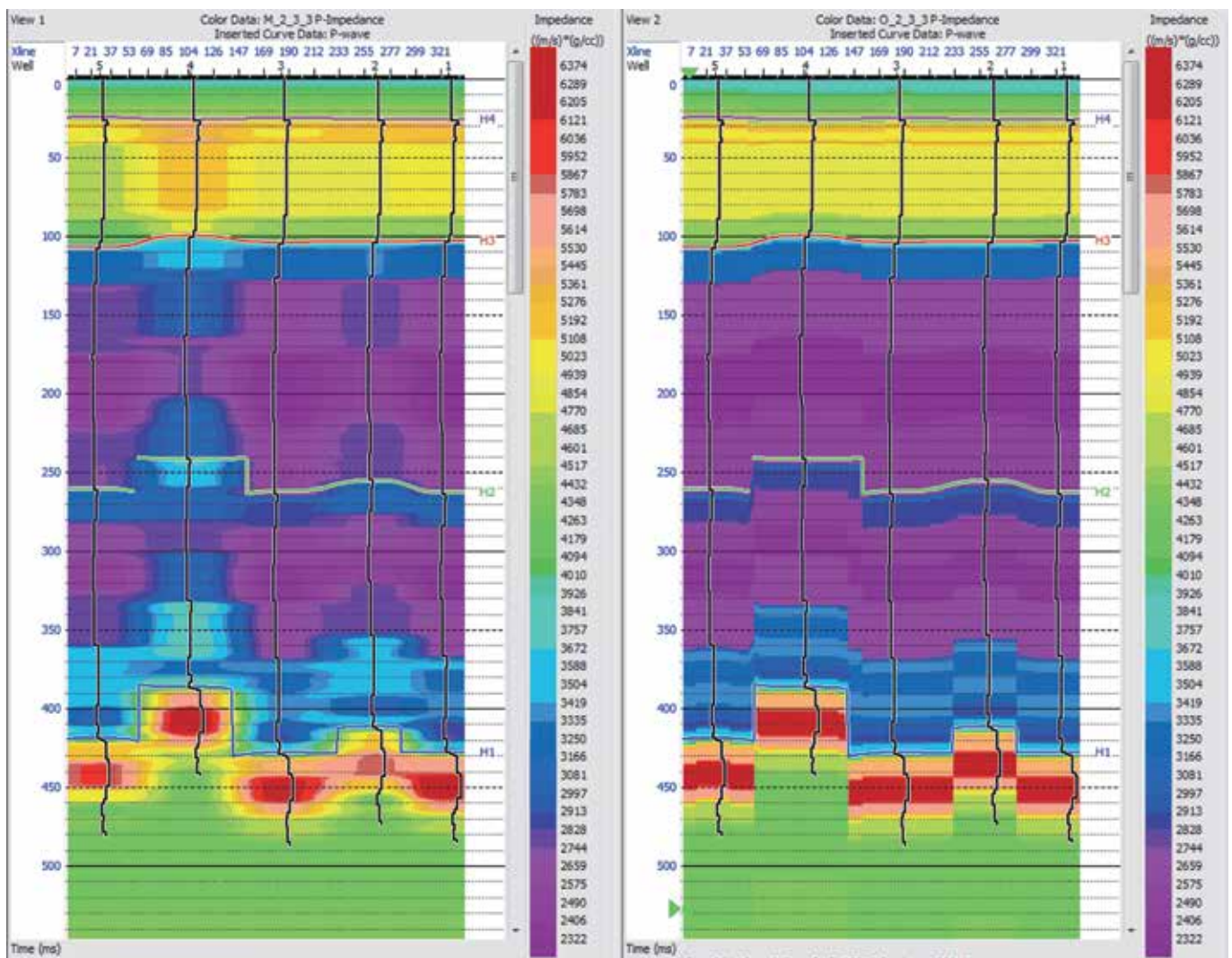


Рис. 4

Истинная модель импедансов (слева), модель импедансов, используемая для компенсации (справа).
Черным цветом показаны кривые импеданса

Результаты

Для сравнительного анализа результатов было использовано шесть разрезов, среди которых четыре получены с помощью коррекции разными методами, один – исходный разрез с переменным сигналом и еще один – разрез с переменным сигналом после нормализации в окне 0–500 мс.

Разрезы для удобства обозначены номерами:

1. Разрез с переменным сигналом.
2. Разрез с переменным сигналом после нормализации.
3. Разрез после компенсации формы сигнала по МНК.
4. Разрез после компенсации формы сигнала с кластеризацией рассчитанных импульсов.
5. Разрез после компенсации формы с кластеризацией и сглаживанием рассчитанных импульсов.
6. Разрез после компенсации формы сигнала по нелинейной оптимизации с регуляризацией.

На рис. 6 представлены наиболее отличительные разрезы после коррекции. Следует заметить,

что использование формирующей фильтрации без стабилизирующего функционала приводит к значительным искажениям из-за ошибок в интерполяции кривых ГИС. Кластеризация и сглаживание фильтров минимизируют подобный негативный эффект. Однако методы, примененные для разрезов № 4, 5, остаются уязвимыми к небольшим по площади зонам, где возможно изменение формы сигнала. Использование нелинейной оптимизации работает устойчиво, но не до конца корректирует трассы, где форма импульса сильно отличается от априорного (нуль-фазового) сигнала.

Одна из главных целей компенсации формы сигнала – улучшение регрессионных связей, используемых при интерпретации. Поэтому далее была оценена пространственная корреляция, т.е. корреляция между атрибутами по разрезу с нуль-фазовым импульсом и теми же атрибутами по скорректированному разрезу. В качестве атрибутов использовались амплитуды вдоль четырех горизонтов (H1, H2, H3, H4).

На рис. 7 отчетливо видно, что амплитуды по разрезу с переменным сигналом, кроме амплитуд

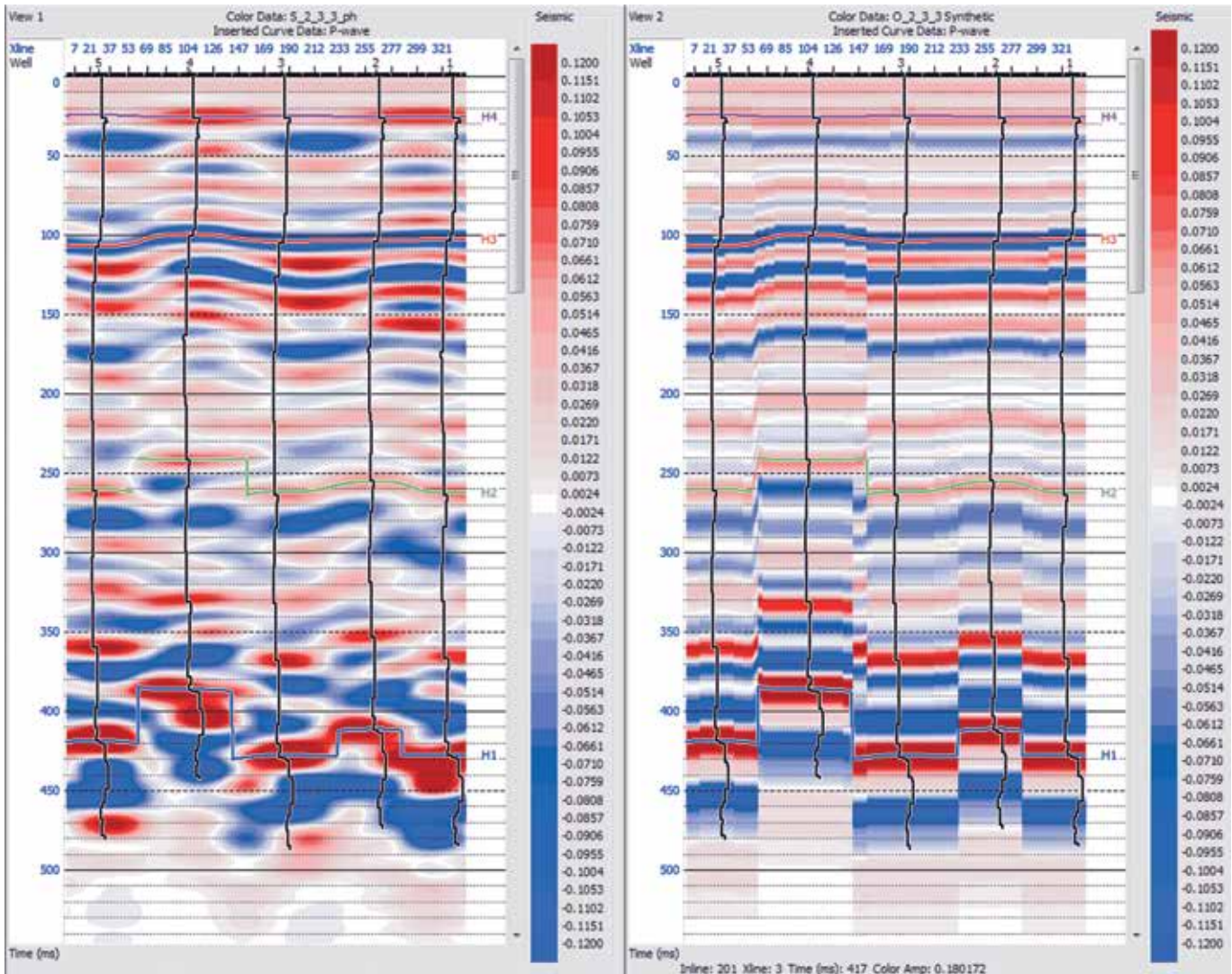


Рис. 5
 Волновое поле с переменным сигналом (слева), волновое поле, используемое для коррекции (справа).
 Черным цветом показаны кривые импеданса

по нижнему горизонту, хорошо коррелируются с истинным разрезом. Нормализация (№ 2) и формирующая фильтрация (№ 3) ухудшают коэффициент корреляции до среднего значения в 0,5–0,6 ед. Это можно объяснить тем, что нормализация учитывает только амплитудную составляющую, игнорируя фазовую, а формирующая фильтрация дает неустойчивое решение.

Результаты по разрезам № 4–6 наиболее оптимистичные. В случае применения кластеризации корреляция по некоторым горизонтам ухудшается до значений в 0,8 ед., но по нижнему горизонту увеличивается с 0,5 до 0,8 ед. При использовании нелинейной оптимизации коэффициент корреляции в среднем увеличился по сравнению с исходным разрезом.

Далее было оценено влияние процедур на скважинную привязку. Коэффициент корреляции при

привязке с нуль-фазовым сигналом на разрезах № 3, 5 становится выше на всех скважинах. В случае с разрезами № 4, 6 коэффициент корреляции уменьшается, но при этом остается достаточно высоким (0,85–0,9 ед.). Нормализация (№ 2) не влияет на привязку по скважинам.

В конце был проведен анализ восстановления импеданса по инверсии с истинной низкочастотной моделью (рис. 8). Разрезы № 3–6 на всех скважинах показывают уменьшение ошибки по сравнению с исходным разрезом.

Выводы

1. Рассмотрены возможные методы коррекции переменного по латерали сигнала. По результатам теста самые высокие показатели демонстрируют способы коррекции через кластеризацию извлеченных сигналов и нелинейную оптимизацию.

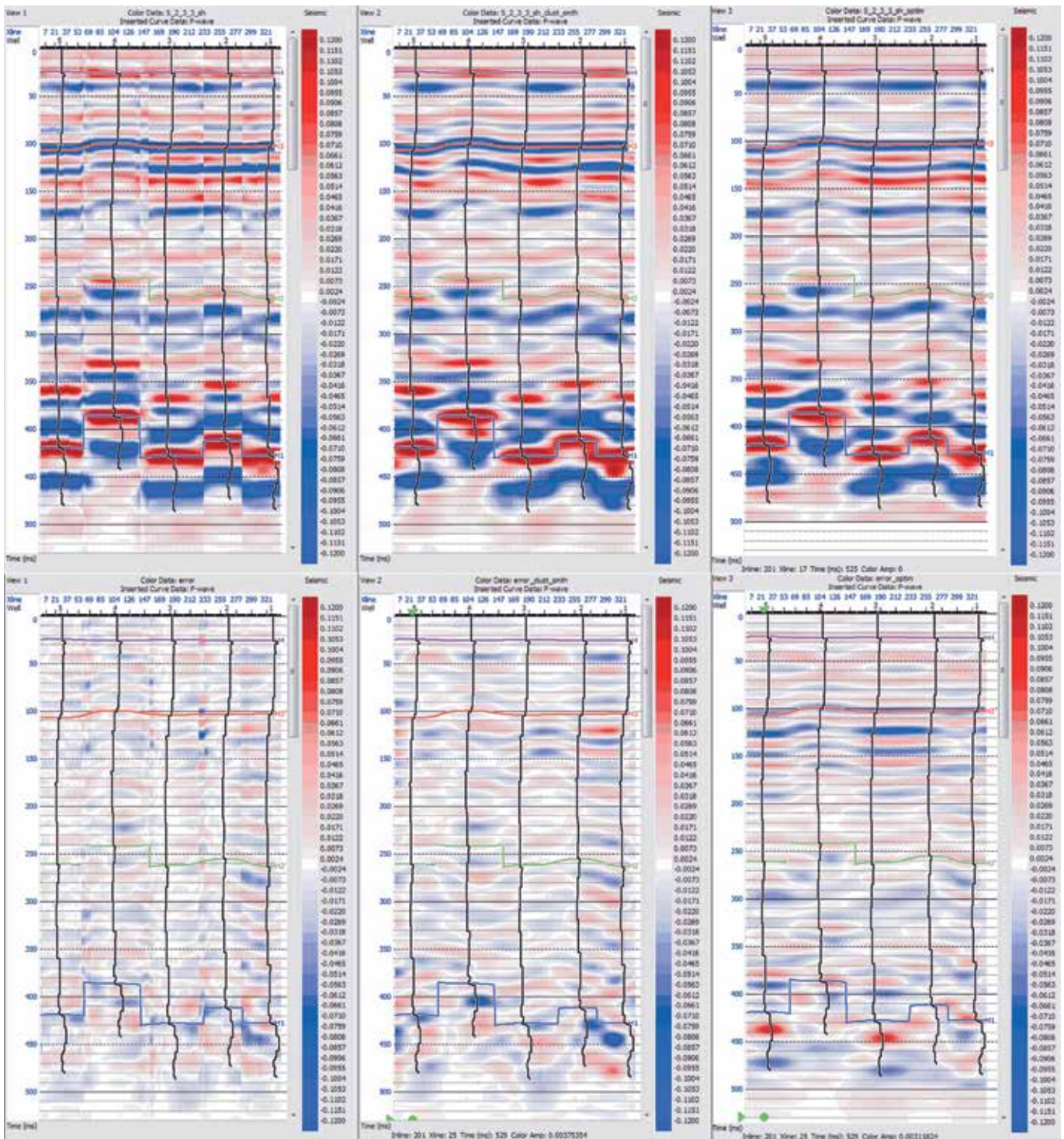


Рис. 6
Результаты амплитудно-фазовой коррекции.

Верхний ряд, слева направо: разрезы № 3, 5, 6; нижний ряд – разница с истинным разрезом

2. Амплитудно-фазовая коррекция способна позитивно влиять на пространственную корреляцию (регрессионные связи), результат инверсии.

3. Использование обычной формирующей фильтрации может привести к негативным последствиям в виде ухудшения регрессионных связей. Для не-

допущения подобного рекомендуется использовать другие методы оптимизации.

4. Для успешного результата амплитудно-фазовой коррекции исследуемый разрез должен быть предсказуем с точки зрения упругих свойств.

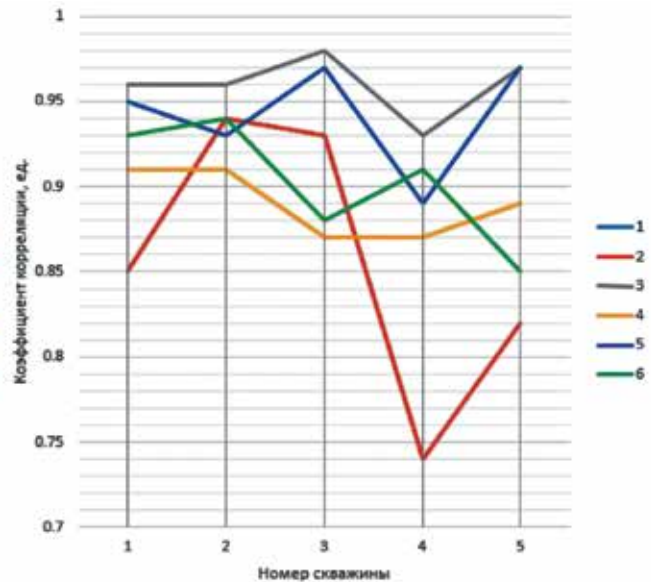
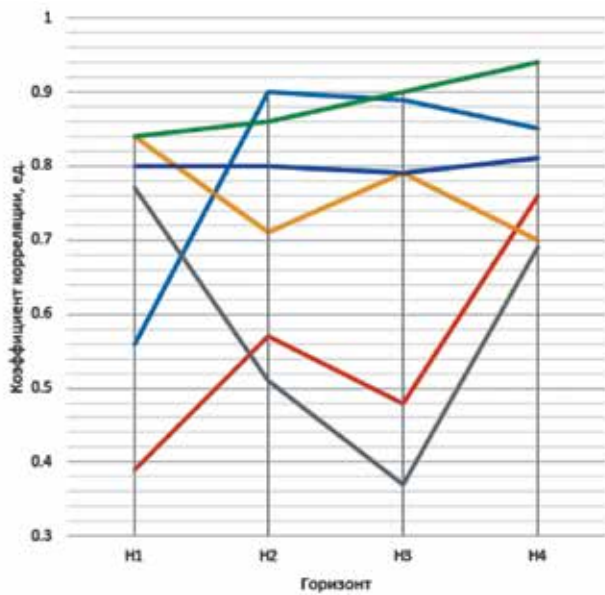


Рис. 7

Корреляция между амплитудами вдоль горизонтов по истинному и скорректированному разрезу для разных методов (слева) и корреляция при привязке (справа)

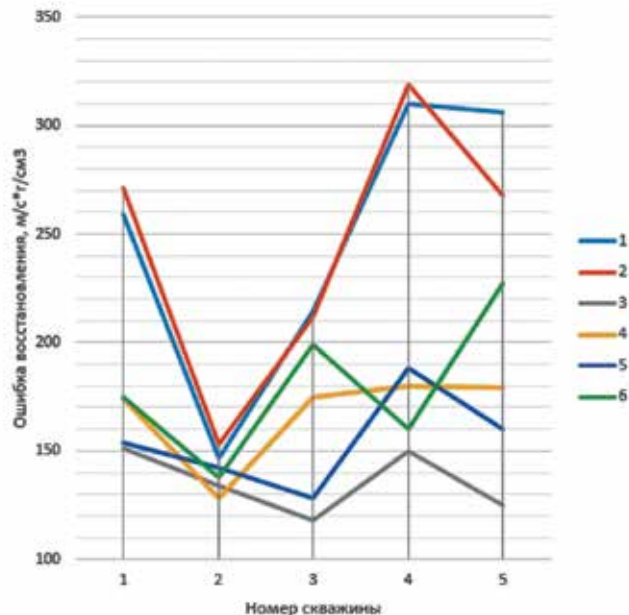


Рис. 8

Ошибка восстановления импеданса по инверсии

ОБ АВТОРЕ



ГАРКИН
Алексей Сергеевич

Аспирант кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Окончил РГУ нефти и газа в 2013 г. Область научных интересов – интерпретация данных сейсморазведки. Не имеет научных публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. М.: Высшая Школа, 1986. 157 с.
2. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007.
3. Bezdec J.C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press. New York. 1981. P. 43–59.
4. Dwaipayan Chakraborty. Influences of Variation in Phase of Input Wavelet with Respect to Actual in Data on Seismic Inversion and Geological Interpretation. 9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. 2012.
5. Yuan San-Yi, Wang Shang-Xu. Influence of inaccurate wavelet phase estimation on seismic inversion // Applied Geophysics. Vol. 8. № 1. 2011. P. 48–59.
6. Yuval Weiss, Dominique Mouliere-Reiser. Interpolating Wavelets, SEG International Exposition and 86th Annual Meeting. 2016. P. 3641–3645.

REFERENCES

1. Voronov AA. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. C. 2. Teoriya nelineinikh i specialnih system avtomaticheskogo upravleniya [Automatic management theory. P. 2. Theory of nonlinear and special automatic management systems]. Moscow: Visshaya Shkola, 1986. 157 p. (in Russian).
2. Jdanov MS. Teoriya obratnih zadach i regulyariizacii v geofizike [Theory of inverse problems and regularization in geophysics]. Moscow: Nauchni mir, 2007 (in Russian).
3. Bezdec JC. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press. New York. 1981. P. 43–59.
4. Dwaipayan Chakraborty. Influences of Variation in Phase of Input Wavelet with Respect to Actual in Data on Seismic Inversion and Geological Interpretation. 9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. 2012
5. Yuan San-Yi, Wang Shang-Xu. Influence of inaccurate wavelet phase estimation on seismic inversion. *Applied Geophysics*. 2011; 8(1): 48–59.
6. Yuval Weiss, Dominique Mouliere-Reiser. Interpolating Wavelets, SEG International Exposition and 86th Annual Meeting. 2016. P. 3641–3645.

Положительная рецензия от 23.08.2019
Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

УДК 550.832.5

ИМПУЛЬСНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ КАРОТАЖ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД НОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

В.В. Попов¹, Н.Е. Фоменко², А.С. Коваленко³¹ ЮРГПУ (НПИ). 346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; e-mail: ggf.npi-tu.ru² Институт наук о Земле ЮФУ. 344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 40; e-mail: fnegeophyskohle@yandex.ru³ АО «ВНИГРИуголь». 344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 200/1, корп. 3; e-mail: a_kovalenko_77@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается использование импульсного нейтронного каротажа (ИНК) в составе комплекса геофизических исследований скважин на угольных месторождениях. Это приведет к повышению точности и надежности решения задач определения вещественного состава углей, оценки их показателей качества, а для вмещающих пород – оценки физико-механических и фильтрационно-емкостных свойств на молекулярно-атомном уровне. ИНК позволит также решать задачи газоносности, прогнозировать горно-геологические условия и экологические последствия.

Ключевые слова. Каротаж угольных скважин, нейтронные свойства углей, импульсные нейтронные методы, решение углеразведочных задач.

PULSED-NEUTRON LOGGING – PERSPECTIVE METHOD OF THE NEW COMPLEXES OF THE GEOPHYSICAL WELL RESEARCHES ON COAL DEPOSITS

V.V. Popov¹, N.E. Fomenko², A.S. Kovalenko³¹ YuRGPU (NPI). 346428, Russia, Rostov region, Novocherkassk, 132, Prosveschenia st.; e-mail: ggf.npi-tu.ru² Institution of Sciences about Earth YuFU. 344090, Russia, Rostov-on-Don, 40, Sorge st.; e-mail: fnegeophyskohle@yandex.ru.³ AO VNIIGRIugol. 344090, Russia, Rostov-on-Don, 200/1, housing 3, ave. Stachki; e-mail: a_kovalenko_77@mail.ru

Abstract. In the article is considered of pulsed neutron logging usage (INK) into the composition of the geophysical well logging complex on coal deposits. This will be lead to increasing of the precision and reliability of the task solution definition of coal composition, estimation of their quality indicator, and for enclosing rocks – estimation of physical mechanical and filtration capacitive properties on molecular atomic level. INK allows also to solve the tasks of gas-bearing, forecast the mining and geological conditions and ecological consequences.

Key words. Coal wells logging, neutron properties of coals, pulsed neutron methods, resolving of coal-exploration tasks.

Актуальность проблемы

Россия располагает большими ресурсами (14254,3 млрд т) и подтвержденными запасами (1530,2 млрд т) углей [7]. Однако промышленное освоение этих запасов, в том числе в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах, в дальнейшем потребует выполнения геолого-разведочных работ на принципиально новом уровне. Новые подходы к использованию геофизических методов определяются, с одной стороны, коммерческой целесообразностью, а с другой – появившимися на рынке научно-технической продукции высокоразрешающими геофизическими технологиями, а также постановкой ранее не стоявших задач [11].

Утверждаемые ранее в СССР и в настоящее время в РФ запасы углей основываются на обязательном учете результатов каротажа углеразведочных скважин комплексом ГИС, разработанным в 70-е годы минувшего столетия [3, 9]. Тогда же на угольных месторождениях были проведены первые испытания импульсных нейтронных методов каротажа, показавшие их перспективность. Однако ни одна из модификаций ИНК в стандартный комплекс исследования скважин на угольных месторождениях не была включена [10]. На то были объективные причины. В частности, применение нейтронных

методов сдерживалось использованием аналоговых каротажных станций, техническим несовершенством аппаратуры и трудоемкими приемами интерпретации.

На сегодняшний день повышение точности и надежности решения традиционных задач (литологическое расчленение разреза, выделение угольных пластов в разрезе, определение их мощности и строения), а также оценка показателей качества углей (зольности, марочного состава, спекаемости, теплоты сгорания и др.) и физико-механических свойств вмещающих пород вполне возможно. Появляются и новые задачи, которые необходимо решать в процессе разведки угольных месторождений [4, 9]. Весьма перспективным является изучение метана как полезного ископаемого, что требует выявления пород-коллекторов с определением фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород [9, 12–14]. Здесь следует использовать опыт работы геофизиков на газовых месторождениях, активно применяющих нейтронные методы исследований скважин. Наиболее перспективными для включения в комплекс ГИС на угольных месторождениях следует считать такие импульсные нейтронные методы, как ИННК, ИНГК, СИНГК, 2-зондовый ИНГК, С/О-каротаж, Si/Al-каротаж, активационный ИНК и др.

**Предпосылки ИНК
на угольных месторождениях**

Все угольные бассейны и месторождения представлены терригенными толщами пород, состоящими из аргиллитов, алевролитов и песчаников с включением угольных пластов. В разрезах некоторых месторождений встречаются карбонатные породы в виде известняков и мергелей (Донецкий и Подмосковский бассейны), кремнистые включения (Канско-Ачинский и Кузнецкий бассейны), а также изверженные породы (Тунгусский бассейн). Все угли в ряду их метаморфизма (бурые, каменные, антрациты) отличаются от вмещающих пород вещественным составом и физическими свойствами [3, 7].

Авторами изучены физико-геологические предпосылки применения одной из наиболее применяемых на нефтегазовых месторождениях модификаций ИНК – импульсного нейтрон-нейтрон-каротажа (ИННК). Для этой модификации основными показателями являются время жизни тепловых нейтронов (τ) и коэффициент диффузии (D). Рассчитаны кривые вероятностного распределения ($P, \%$) в породах угленосной толщи на месторождениях разной степени эпигенеза и метаморфизма (рис. 1).

Примечательно, что все литологические разновидности разделяются как по коэффициенту диффузии нейтронов (D), так и по времени жизни (τ). Угли же однозначно выделяются в разрезе по показателю D . Это создает предпосылки для успешного применения ИННК на угольных месторождениях [8].

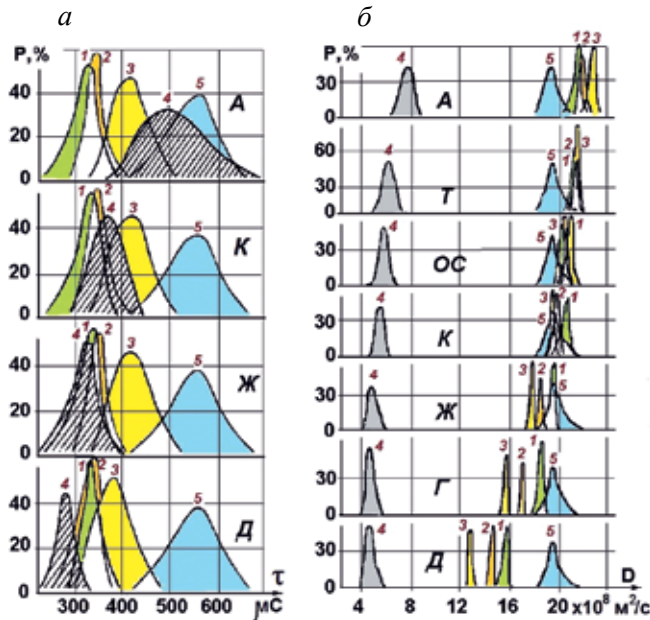


Рис. 1

Распределения нейтронных свойств углей разных марок и вмещающих пород:

- a* – время жизни нейтронов;
- б* – коэффициент диффузии нейтронов.
- 1 – аргиллиты и глинистые сланцы (для антрацитов);
- 2 – алевролиты и песчаные сланцы;
- 3 – песчаники;
- 4 – угли, в том числе антрациты;
- 5 – известняки

Органическое вещество угля может быть представлено как смесь углерода, водорода, кислорода, серы и азота и включений, представленных минералами алюмосиликатного ряда. В зависимости от степени эпигенеза и марочного состава происходит повышение содержания углерода и снижается содержание водорода, кислорода, азота. Соответственно, повышается значение времени жизни нейтронов от 220–340 (мода 280) мкс для углей марки Д и до 400–700 (мода 500) мкс для антрацитов. Увеличивается также коэффициент диффузии нейтронов с 4–6 (мода 5) $\times 10^8$ до 6–9 (мода 7,5) $\times 10^8$ м²/с.

Вещественный состав минеральной части угля представлен преимущественно глинистыми минералами, а также минералами, входящими в состав вмещающих пород: алюмосиликаты, карбонаты, пирит и другие. Минеральные включения могут содержать ценные элементы, представляющие промышленный интерес: U, Ge, Au, Ag, редкоземельные элементы и другие, но также могут содержать и токсичные элементы: Be, F, Cl, V, Cr, Mn, Co, Ni, As, Se, Cd, Hg, Pb, Te, W. Минеральная часть углей при сгорании образует золу. Некоторые минералы сгорают, дают окислы, и их масса увеличивается. Другие минералы возгоняются, влага испаряется, поглощая энергию и снижая общую теплоту сгорания. Это приводит к снижению массы золы. Поэтому между минеральными включениями и зольностью углей существует лишь корреляционная связь. Таким образом, в условиях скважины возможно определять только наличие минеральных включений и через корреляционные связи оценивать зольность углей.

Время жизни нейтронов τ определяется отношением сечения захвата (σ_{31}) к массовому числу элемента (A_i). Параметр σ_{31}/A_i максимальный для водорода, для азота в 2 раза меньше, для серы – в 20 раз, для углерода – в 1000 раз и для кислорода – в 26000 раз. Время жизни тепловых нейтронов для органической части угля ($\tau_{орг}$) определяется в основном содержанием трех элементов: водорода, азота, серы, и почти не зависит от содержания углерода и кислорода. По значениям $\tau_{угл}$, полученным с каротажной диаграммы, с помощью графика зависимости времени жизни тепловых нейтронов от содержания водорода можно оценить процентное содержание последнего в углях (рис. 2). Максимальная ошибка, которая может быть при определении $\tau_{орг}$ составляет 100 мкс. Это приводит к ошибке оценки водородосодержания 0,2%.

Содержание водорода в органической части угля является важной составляющей элементного состава углей, и по нему можно определить марку угля, поскольку содержание водорода характеризует степень метаморфизма углей, а также оценивать их газоносность. Для вмещающих пород содержание водорода определяет влажность пород – важный показатель их коллекторских и физико-механических свойств.

Между углями и углисто-глинистыми породами не существует природной границы. Разница только в количественном содержании органической состав-

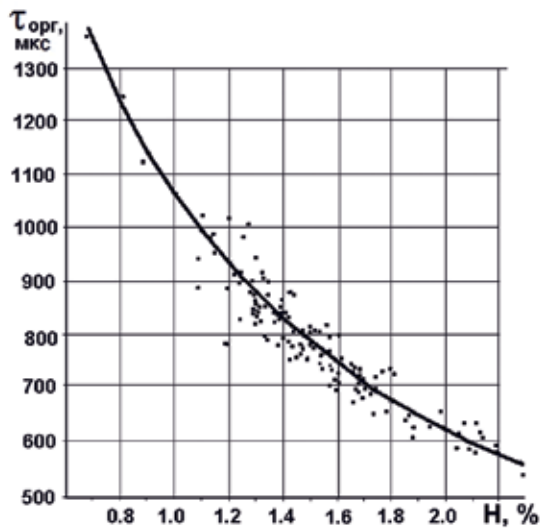


Рис. 2
Время жизни тепловых нейтронов в породах
в зависимости от содержания в них водорода

ляющей и минеральных включений: низкозольные угли – угли – высокозольные угли – углистые аргиллиты – аргиллиты. Границы между ними устанавливаются искусственно, исходя из экономической целесообразности. Так, границу между высокозольными углями и углистыми аргиллитами устанавливают между 30 и 40%. Рис. 3 иллюстрирует зависимость нейтронных свойств антрацитов от содержания минеральных включений, а значит, и зольности. Аналогичные связи существуют и для других типов и марок углей.

Из приведенных на рис. 3 зависимостей следует, что при малых содержаниях минеральных включений в углях высокая чувствительность наблюдается по времени жизни нейтронов (τ) и в меньшей степени по коэффициенту диффузии (D). При высоких содержаниях минеральных включений, наоборот, коэффициент диффузии более дифференцирован. Следовательно, оценка зольности по данным нейтронного каротажа возможна по корреляционным уравнениям с учетом разрешающей способности методов по глубине и возможности определения нейтронных свойств тонких слоев, каждый из которых характеризуется своими показателями зольности и плотности.

Применение ИННК в комплексе ГИС на угольных месторождениях

Особенностью поисков и разведки угольных месторождений является бурение колонковых и бескерновых скважин диаметром 76 мм и менее. Это упрощает интерпретацию геофизических измерений, поскольку на их результаты меньше влияют скважинные условия и физические свойства бурового раствора. Однако при этом усложняется процесс измерений в скважинах, что требует применения специальной малогабаритной скважинной аппаратуры. Такой высокотехнологичный программно-управляемый малогабаритный каротажный комплекс и интерпретационное обеспечение разра-

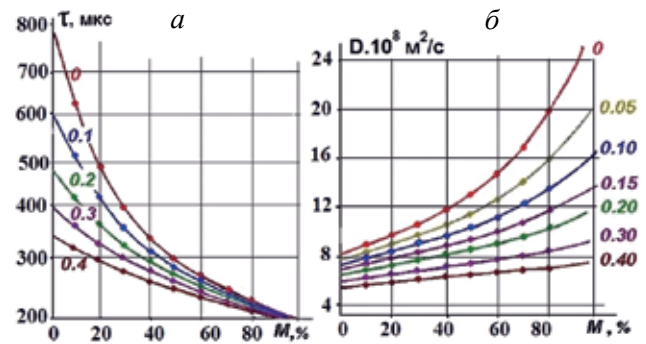


Рис. 3
Нейтронные свойства углей марки А1 и А2 (антрациты)
при увеличении содержания минеральных примесей в углях:
а – среднее время жизни нейтронов;
б – коэффициент диффузии.
Шифр кривых – пористость (трещиноватость) угля

ботаны во ВНИИГИС [1]. Одновременно созданы и малогабаритные модули для измерения импульсных нейтронных методов [5, 6].

Диаграммы ИННК, зарегистрированные в опытном порядке совместно с методами стандартного каротажа (БК, КС-ПЗ, ГК, ГГК, АК и кавернометрии) в интервале углеразведочной скважины с тонкими угольными пластами, приведены на рис. 4. Разрешающая способность, полученная экспериментально, оценивается величиной порядка $0,04 \pm 0,06$ м, при длине каротажного зонда $L = 0,4$ м, скорости записи 120 м/час, частоте генератора нейтронов 20 Гц. В номинале разрешающая способность ИННК зависит от размеров детектора и небольшой области, непосредственно прилегающей к нему, и мало зависит от длины зонда. Существует оптимальный зонд, для которого плотность тепловых нейтронов выходит на асимптоту при минимальной задержке [8]. Для угольных пластов, в частности антрацита, оптимальный зонд равен 32 см. Шаг квантования при цифровой регистрации должен быть в пределах 0,02–0,05 м. Опираясь на экспериментальные данные, можно заключить, что оптимальная величина V не должна превышать 250 м/час, а при детализации угольных пластов уменьшаться до 100 м/час.

Анализ кривых стандартного комплекса ГИС совместно с диаграммами ИННК (см. рис. 4) показывает, что задачи литологического расчленения геологического разреза скважины, выявления в нем угольных пластов и маркирующих горизонтов, установления их синонимии, мощности, строения и глубины залегания решаются достаточно надежно. При этом выполняется требование, согласно которому угольный пласт должен четко устанавливаться по данным не менее двух каротажных кривых различных методов. Показатели качества углей, в частности зольность, определяются по парным и многомерным корреляционным связям. Также должны быть определены физико-механические свойства вмещающих пород и выполнены прогнозы горно-геологических условий разработки месторождения: устойчивость пород, газоопасности, выбросоопасности, водообильности и другие.

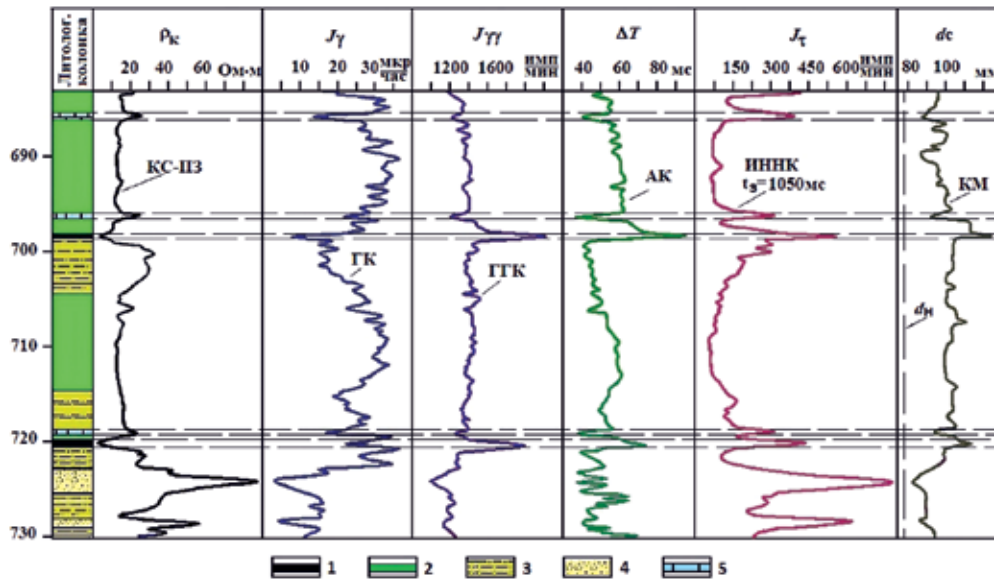


Рис. 4
Комплекс ГИС в углераз-
ведочной скважине
с включением диаграммы
ИННК (Восточный Донбасс)
 1 – уголь (антрацит),
 2 – аргиллит,
 3 – алеврит,
 4 – песчаник,
 5 – известняк

Решение обозначенных задач сводится к статистическим алгоритмам распознавания и уравнениям регрессии. Включение импульсных нейтронных методов в комплекс геофизических исследований скважин не противоречит этому и позволит повысить точность определений и прогнозов, вывести связи на молекулярно-атомный уровень. Особенно перспективно применение ИННК при оценке газоносности углей и вмещающих пород, а через них и прогноз выбросоопасности в горных выработках. Не имеют к настоящему времени альтернативы такие модификации ИНК, как импульсный спектрометрический и активационный, поскольку появляется возможность определения содержания ценных элементов (U, Ge, Au, Ag), редкоземельных, а также токсичных элементов (Be, F, Cl, V, Cr, Mn, Co, Ni, As, Se, Cd, Hg, Pb, Te, W).

Следует подчеркнуть, что регистрация каротажных кривых посредством компьютеризированных многоканальных каротажных станций позволяет одновременно записывать ИННК на разных временных задержках в комплексе с другими геофизическими методами. При цифровой регистрации отпадает необходимость повторных измерений одних и тех же интервалов в разных масштабах. Преимуществом импульсных нейтронных методов также следует считать возможность проводить измерения в обсаженных скважинах, а также обеспечение радиационной безопасности с потоками нейтронов по сравнению с работой со стационарными источниками.

Выводы и рекомендации

Включение импульсного нейтронного каротажа в комплекс геофизических исследований углеразведочных скважин повышает общую информативность комплекса и открывает новые возможности при исследовании вещественного состава и газоносности углей и вмещающих пород на молекулярном и атомном уровне. При этом должны учитываться следующие требования:

1. Измерения в скважинах необходимо проводить при помощи специально разработанного многоканального аппаратурно-методического комплекса «АКИПС-Уголь» или его аналога.
2. Скважинный прибор не должен иметь внешний диаметр больше 40 мм, а при бурении скважин диаметром более 76 мм диаметр может быть соответственно увеличен.
3. Оптимальными задержками времени ИННК при изучении угленосных толщ следует считать интервал от 700 до 2000 мкс.
4. Аппаратура ИННК должна быть настроена на максимальную разрешающую способность (минимальные размеры детекторов, скорость подъема скважинного прибора, постоянная времени регистрирующей аппаратуры, шаг квантования измерений 0,02–0,03 м).
5. Данные импульсного нейтронного каротажа целесообразно включить в исходные информационные матрицы для автоматизированной комплексной интерпретации и определения показателей качества углей, определения ФЕС и ФМС пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратурно-методические комплексы для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин / В.Т. Перельгин [и др.] // Каротажник. 2015. № 255. С. 99–127.
2. ВНИИГИС – 50 лет по пути развития геофизических методов исследования скважин / В.Н. Даниленко [и др.] // Каротажник. 2006. № 7–8 (148–149). С. 10–40.
3. Геофизические методы изучения геологии угольных месторождений / В.В. Гречухин [и др.] М.: Недра, 1995. 477 с.
4. Кожевников Д.А., Коваленко К.В. Адаптивная интерпретация импульсных нейтронных методов // Каротажник. 2008. № 4 (169). С. 50–67.
5. Малогабаритная аппаратура импульсного нейтронного каротажа АИНК30-1Ц для исследования действующих скважин в процессе их эксплуатации / Д.И. Киргизов [и др.] // Каротажник. 2013. № 10 (232). С. 267–278.
6. Опыт использования аппаратурно-методического комплекса АМК-НН-5 малого диаметра для исследования горизонтальных и наклонно направленных скважин (ГС и ННС) / Н.М. Знаменских [и др.] // Каротажник. 2006. № 7–8 (148–149). С. 63–72.

7. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России: Угольная база России / под ред. В.Ф. Череповского. М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. Т. VI. 779 с.

8. Поляченко А.Л., Попов В.В., Клименко Н.В. Применение импульсного нейтронного каротажа на угольных месторождениях // Разведочная геофизика. 1984. № 98. С. 117–126.

9. Попов В.В. Комплексы геофизических исследований в углеразведочных скважинах (в порядке обсуждения) // Каротажник. 2003. № 105. С. 80–89.

10. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. М.: Недра, 1985. 216 с.

11. Фоменко Н.Е., Коваленко А.С. Современное состояние методов наземной геофизики при проведении геолого-разведочных работ на твердые горючие ископаемые // Разведка и охрана недр. 2015. № 1. С. 33–39.

12. Factors affecting coalbed methane (CBM) well productivity in the Shizhuangnan block of southern Qinshui basin, North China: Investigation by geophysical log, experiment and production data / ChengPeng [et al.] // Fuel. 2017. Vol. 191. № 1. Pp. 427–441.

13. HoYang II, Suk Lee H. Desorbed gas volume estimation using conventional well-log data for the Montney Formation, Deep Basin, Canada // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 162. № 3. Pp. 633–651.

14. Zhang F., Liu J., Yuan C. Monte Carlo simulation for determining gas saturation using three-detector pulsed neutron logging technology in tight gas reservoir and its application // Applied Radiation and Isotopes. 2013. Vol. 78. № 8. Pp. 51–56.

REFERENCES

1. Instrumental and methodical complexes for research of ore, coal and hydrological wells. V.T. Perelygin [and other]. *Karotazhnik*. 2015; (255): 99–127 (in Russian).

2. VNIIGIS – 50 years by the way of geophysical methods well research development. B.N. Danilinko [and other]. *Karotazhnik*. 2006; 7–8 (148–149): 10–40 (in Russian).

3. Geophysical methods of coal deposit geology research. V.V. Grechuhin [and other]. Moscow: Publishing house Nedra, 1995. 477 p. (in Russian).

4. Kozhevnikov DA, Kovalenko KV. Adaptive interpretation pulsed neutron methods. *Karotazhnik*. 2008; 4(169): 50–67 (in Russian).

5. Compact equipment of pulsed neutron logging AINK30-1C for the study of existing wells during their operation. D.I. Kirgisov [and other]. *Karotazhnik*. 2013; 10(232): 267–278 (in Russian).

6. Experience of using the instrumental and methodical complex AMK-NN-5 of small diameter for the study of horizontal and directional wells (GS and NNS). N.M. Znamenskikh [and other]. *Karotazhnik*. 2006; 7–8(148–149): 63–72 (in Russian).

7. The main regularity of coal formation and coal location in Russia territory: Coal base of Russia / under edit of Cherepovskoy V.F. Moscow: ООО Геоинформмарк. 2004. Vol. VI. 779 p. (in Russian).

8. Polyachenko AL, Popov VV, Klimenko NV. Applying of pulsed-neutron logging at coal deposits. *Exploration geophysics*. 1984; (98): 117–126 (in Russian).

9. Popov VV. Geophysical research complexes in coal exploration wells (by way of discussion). *Karotazhnik*. 2003; (105): 80–89 (in Russian).

10. Technical instruction by conducting of geophysical research in wells. Moscow: Publishing house Nedra, 1985. 216 p. (in Russian).

11. Fomenko NE, Kovalenko AS. Modern condition of surface geophysical methods at conducting geological exploration works on the solid fuel fossil. *Exploration and subsoil protection*. 2015; (1): 33–39 (in Russian).

12. Factors affecting coalbed methane (CBM) well productivity in the Shizhuangnan block of southern Qinshui basin, North China: Investigation by geophysical log, experiment and production data / ChengPeng [and other]. *Fuel*. 2017; 191(1): 427–441.

13. HoYang II, Suk Lee H. Desorbed gas volume estimation using conventional well-log data for the Montney Formation, Deep Basin, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018; 162(3): 633–651.

14. Zhang F, Liu J, Yuan C. Monte Carlo simulation for determining gas saturation using three-detector pulsed neutron logging technology in tight gas reservoir and its application. *Applied Radiation and Isotopes*. 2013; 78(8): 51–56.

Положительная рецензия от 1.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



ПОПОВ

Виктор Владимирович

Доктор технических наук, профессор, почетный разведчик недр, профессор ЮРГПУ (НПИ). Окончил в 1956 г. Днепрпетровский горный институт, получил специальность «горный инженер-геофизик». Автор более 210 работ, из них 2 монографии, 5 учебных пособий. Основные научные интересы – картаж угольных и газозольных скважин, комплексная интерпретация ГИС углеразведочных скважин, современные информационные технологии в углеразведке.



ФОМЕНКО

Николай Евгеньевич

Горный инженер-геофизик, профессор Института наук о Земле ЮФУ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, отличник разведки недр, изобретатель СССР. Окончил в 1969 г. геофизический факультет МГРИ. Автор более 150 научных и учебно-методических работ. Основные научные интересы – разработка и применение скважинных и полевых методов на угольных месторождениях и при решении геологических задач в инженерной и экологической геофизике.



КОВАЛЕНКО

Андрей Сергеевич

Окончил ЮРГПУ (НПИ) в 1999 г., защитил кандидатскую диссертацию в 2004 г. Старший научный сотрудник лаборатории геологии и разведки угольных месторождений АО «ВНИГРИУголь» (АО «Росгеология»). Основные научные интересы – угольная, инженерная и экологическая геофизика. Автор свыше 30 публикаций и 4 патентов.

УДК 550.34:551.24+553.9 (571+518+93/96)

РИФТОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ В РЕОЛОГИЧЕСКИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А.М. Петрищевский¹

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем (ИКАРП ДВО РАН). 697016, Россия, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, д. 4; e-mail: petris2010@mail.ru

Аннотация. Иллюстрируется устойчивая связь минимумов плотностной контрастности нижнего слоя земной коры и подкоревой мантии с максимумами теплового потока в Западной Сибири, Северо-Восточном Китае и Австралии. Это доказывает повышенную проницаемость земной коры для мантийных притоков тепла и флюидов в верхние горизонты коры, которые обеспечивают преобразование органического вещества, содержащегося в палеозойских и мезозойских осадочных и слабометаморфизованных толщах (сланцах), в углеводородные залежи. Месторождения нефти и газа приурочены к зонам сокращения мощности и разрывам жесткого гранитно-метаморфического слоя. Мощность земной коры под нефтегазоносными районами сокращена на 3–4 км, а литосферы – на 30–50 км. Земная кора изученных нефтегазоносных районов характеризуется типичными признаками рифтогенных структур.

Ключевые слова. Гравитационные модели, земная кора, реология, нефтяные и газовые месторождения, Западная Сибирь, Северо-Восточный Китай, Австралия.

RIFT STRUCTURES AND OIL-GAS BEARING IN THE GRAVITY RHEOLOGICAL MODELS OF THE CRUST

A.M. Petrishchevsky¹

¹ Institute of Complex Analysis of Regional Problems. 697016, Russia, Birobidzhan, Sholom Aleikhema str. 4; e-mail: petris2010@mail.ru

Abstract. The stable connection between drops of density contrast in the lower crust and subcrustal mantle with the high heat flow anomalies is established in the West Siberia, North East China and Australia. It supposes a heightened penetrability of the crust for mantle heat- and fluid inflows toward the upper crust layers, that provides conditions for transformation of organic material into the Paleozoic and Mesozoic sedimentary and weakly metamorphic layers in the hydrocarbon deposits. The oil and gas deposits are arranged to zones of gap and thinning in the granite-metamorphic layer. The crust thickness beneath oil-gas regions is decreased on 3–4 km, and the lithosphere thickness – on 30–50 km. Studied regions are characterized by typical features of the rift structures.

Key words. Gravity models, the crust structure, rheology, oil and gas deposits, West Siberia, North East China, Australia.

ВВЕДЕНИЕ. Образование месторождений нефти и газа определяется несколькими геологическими условиями: 1) наличием мощных (мощностью от 3–6 до 14 км) осадочных толщ, заполняющих бассейны палеозойской, мезозойской и кайнозойской седиментации; 2) присутствием в разрезе нефтематеринских пород с высокими коллекторскими свойствами и содержанием органического вещества мощностью от десятков до сотен метров; 3) наличием глубинных источников тепла, обеспечивающих преобразование органического вещества в углеводородные залежи; 4) благоприятными структурными условиями для локализации и накопления углеводородов. Первые два условия определяют стратегию поисков нефти и газа на начальной стадии. Они проверяются глубокими скважинами. Третье условие проверяется измерением теплового потока и расчетами температур в нужных интервалах геологического разреза. Исследование структурных условий формирования углеводородных залежей проводится с помощью сейсморазведки – основного метода поисков.

На стадии районирования и оценки углеводородного потенциала нефтегазоносных территорий важным является изучение проницаемости земной коры для глубинных теплофлюидов и выявление источников тепла, способствующих образованию углеводородных залежей в приповерхностной осадочной толще. Эта задача может быть решена

с помощью исследования реологических состояний геологических сред. Традиционными индикаторами реологических свойств земной коры и подкоревой мантии являются аномалии скорости сейсмических волн, электрических сопротивлений и теплового потока [9, 13]. Первые два индикатора оцениваются с помощью дорогостоящих сейсмических и геоэлектрических методов и в нефтеносных районах реализуются преимущественно в профильном варианте. Третий (тепловой) индикатор реализуется только в скважинах, сеть которых на первых стадиях изучения нефтегазоносных районов редка и не позволяет получать объемные распределения температур в земной коре, которые могли бы способствовать оконтуриванию нефтегазоносных площадей.

Но существует еще один индикатор реологических состояний геологических сред – плотностная контрастность, оцениваемая с помощью статистического обобщения аналитической интерпретации локальных гравитационных возмущений и выметания плотностных неоднородностей на поверхности эквивалентных сфер [9]. Построение 3D-моделей распределений плотностной контрастности является простым и дешевым средством получения объемной информации о реологических свойствах земной коры и верхней мантии. Опыт проведенных исследований [9–13] показал, что минимумы плотностной контрастности связаны с распределением

температуры обратной корреляционной зависимостью. Такая же обратная корреляция в разрезах земной коры характерна для связи теплового потока и температуры с электрическим сопротивлением [14] и со скоростью сейсмических волн [18, 37].

Целью этой статьи является исследование распределений плотностной контрастности в земной коре и подкорковой мантии нефтегазоносных районов в Западной Сибири, Северо-Восточном Китае и Австралии и сопоставление аномалий этого параметра с другими геофизическими аномалиями, геологическим строением и нефтегазоносностью.

Методика эксперимента

Носителем информации о плотностной контрастности геологических сред между центрами локальных квазиизометричных плотностных неоднородностей (Z_0) и поверхностями слоев (H_c), на которые вымечаются, по Пуанкаре [19], их массы, является μ_z -параметр:

$$\mu_z = \frac{Vzm Z_0}{4\pi K(Z_0 - H_c)^2}, \quad (1)$$

где Vzm – амплитуда соответствующей гравитационной аномалии, K – гравитационная постоянная.

Вычисления μ_z -параметра ведутся на параллельных профилях, оптимально (вкrest преобладающего простирания гравитационных аномалий) пересекающих район исследования, и на каждом профиле вычисляются кажущиеся глубины залегания центров масс плотностных неоднородностей. Графики аномального поля последовательно сглаживаются, чтобы охватить вычислениями аномалии всех видимых пространственных классов. Такая процедура близка к процедурам локализации сингулярных (особых) точек плотностных неоднородностей методами отношения производных [1, 17] и деконволюции Эйлера [44], однако преимуществом нашего метода [9] является измерение амплитуд гравитационных возмущений, что позволяет исследовать вещественные свойства плотностных неоднородностей в широком пространственном диапазоне.

В результате вычислений формируется цифровой массив $Z_0, Vzm(x, y, H_c)$, который в дальнейшем разбивается на слои, и источники каждого слоя вымечаются на ближайшие поверхности H_c , касательные к поверхностям слоев, и по алгоритму (1) вычисляются значения μ_z -параметра для источников, заключенных в данном слое. Выполняется условие: $Z_0 > H_c$. Конечным результатом вычислений является цифровой массив $\mu_z(x, y, H_c)$, который служит основой для построения распределений плотностной контрастности в горизонтальных срезах и разрезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели.

С более подробным описанием методики и результатами ее тестирования можно ознакомиться в работах [9–13].

3D-модели плотностной контрастности земной коры и подкорковой мантии в нефтегазоносных районах

В этой статье рассматриваются три нефтегазоносных региона, расположенные в Западной Сиби-

ри, Северо-Восточном Китае и Северо-Восточной Австралии, где в разное время автором были построены модели плотностной контрастности земной коры и подкорковой мантии [10, 12, 13].

Томская область

Томская область является одним из районов, производящих добычу нефти и газа в Западной Сибири. На ее территории располагаются 103 месторождения углеводородов с запасами 4 млрд т нефти, 630 млрд куб. м свободного газа и 116 млрд куб. м растворенного в нефти газового конденсата. Основные ресурсы углеводородов расположены в западной половине Томской области (рис. 1), где плотность углеводородных ресурсов составляет более 15 т/км² [12]. С нефтегазоносными районами на западе области совпадают минимумы плотностной контрастности на глубинах 15 (рис. 1, а), 20 (рис. 1, б) и 30 км (рис. 2, а). Поскольку мощность осадочной толщи в этих районах в среднем составляет 5–6 км, а на локальных участках не превышает 10–12 км [3, 4], можно говорить о том, что метаморфические комплексы фундамента здесь подвержены тектонической и термальной проработке, приводящей к понижению их реологических свойств (потере жесткости) и повышению проницаемости для глубинных потоков тепла и флюидов, способствующих преобразованию органического вещества в углеводородные залежи.

В среднем слое земной коры, в срезе на глубине 15 км (рис. 1, б), три локальных максимума плотностной контрастности на севере, в центре и на юго-востоке области соответствуют выступам допалеозойского фундамента, северный и юго-восточный из которых картируются по сейсмическим данным [4]. В следующем срезе, на глубине 20 км (рис. 1, б), эта закономерность проявлена еще более отчетливо. Здесь зона резкого градиента μ_z -параметра делит территорию области на два блока: жесткий на северо-западе и вязкий на юго-востоке. Граница блоков совпадает с региональным разломом, по которому мощность земной коры сокращается от 40 км в жестком блоке до 32 км в блоке пониженной вязкости [12].

Интерпретация аномалий теплового потока [12] показывает, что температура в основании земной коры центральных и юго-западных районов Томской области (718–827 °С) в два раза превышает среднюю температуру поверхности мантии под континентами (400 °С) [16] и на прилегающих с востока территориях Сибирского кратона [15]. Результаты палеотемпературного моделирования [31] показывают, что по всему разрезу осадочной толщи в течение последних 70 млн лет происходило увеличение температуры, что свидетельствует о существовании мощного и постоянного источника тепла в глубоких слоях земной коры и в подкорковой мантии. При сопоставлении аномалий плотностной контрастности и температуры в разрезах земной коры двух нефтегазоносных районов Томской области [12] установлена обратная корреляционная зависимость между этими параметрами, и это дает основание утверж-

дать, что аномалии пониженной плотностной контрастности в земной коре являются индикаторами зон и областей, хорошо проницаемых для потоков тепла из подкорового вязкого слоя, и они генетически связаны с нефтеносностью осадочного чехла, так же как повышенные значения плотности теплового потока в основании плитных отложений [8].

Реологическую характеристику земной коры Томской области дополняют разрезы $\mu_z(x, y, Hc)$ -модели (рис. 2, б). В этих разрезах хорошо видно, что нефтегазоносные районы располагаются в зонах утонения или разрыва жесткого среднecорового гранитно-метаморфического слоя, а в разрезе 3–3 в распределениях плотностной контрастности проявлено надвигание этого слоя на зону пониженной вязкости, что согласуется с комплексом других геофизических данных [6]. Жесткая пластина экранирует источники тепла и флюидов из нижнекорового вязкого слоя, и это может быть причиной низкой

продуктивности осадочной толщи в центральных и восточных районах Томской области. Наблюдаемые разрывы и утонения земной коры приблизительно совпадают с расположением раннетриасовых рифтогенных структур в палеозойском фундаменте Западно-Сибирской плиты [7]. Наиболее протяженная из них представляет собой сквозькоровую зону коллизионных (тектонически нарушенных и измененных) пород [6]. Продолжение этой зоны на север (севернее широты 60° S) интерпретируется [6] как глубинная граница Сибирского кратона с Западно-Сибирской плитой. Таким образом, в Томской области Западной Сибири определяющим региональным критерием поисков месторождений нефти и газа является связь нефтегазоносных площадей с раннетриасовыми рифтогенными структурами в фундаменте осадочных толщ, которые сопровождаются минимумами плотностной контрастности в среднем (рис. 1) и нижнем (рис. 2) слоях земной коры. При этом нефтяные месторождения концентрируются преимущественно на западном фланге рифта, а газовые – ближе к оси зоны растяжения (рис. 1, 2). Последние сопровождаются локальными гравитационными минимумами [12]. Смещение нефтяных месторождений относительно глубинной зоны растяжения может быть обусловлено двумя причинами: 1) миграцией нефти; 2) западным перемещением осадочной толщи относительно структур

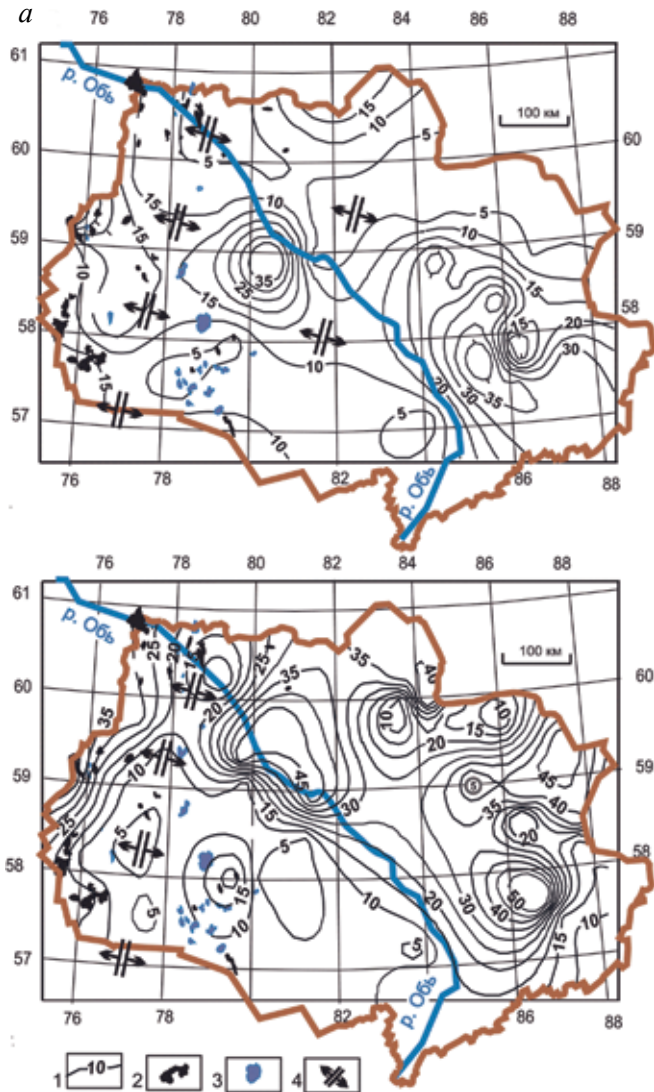


Рис. 1

Плотностная контрастность земной коры Томской области в срезах на глубине 15 (а) и 20 (б) км

1 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км); 2–3 – месторождения нефти (2) и газоконденсатные (3) по данным Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»; 4 – оси рифтогенных структур

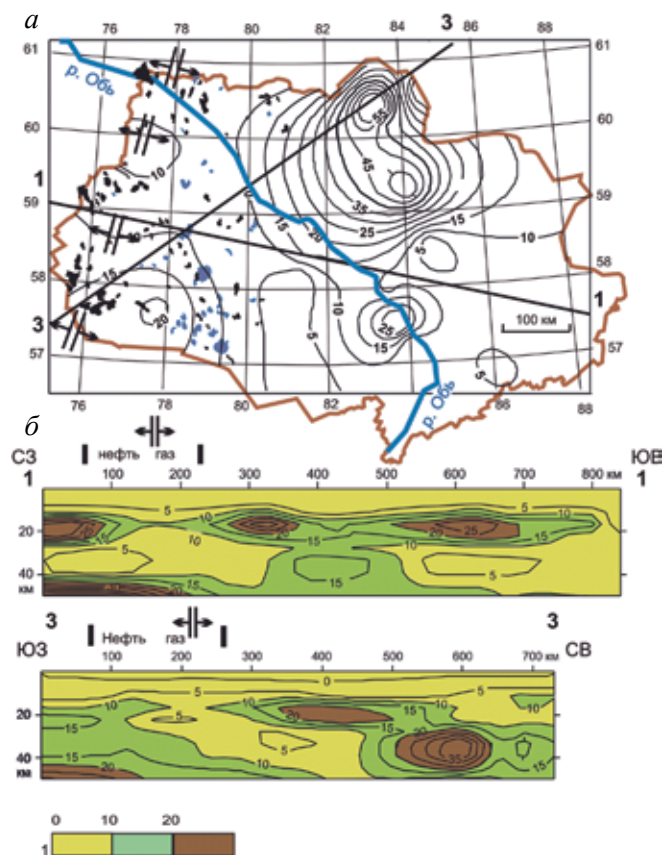
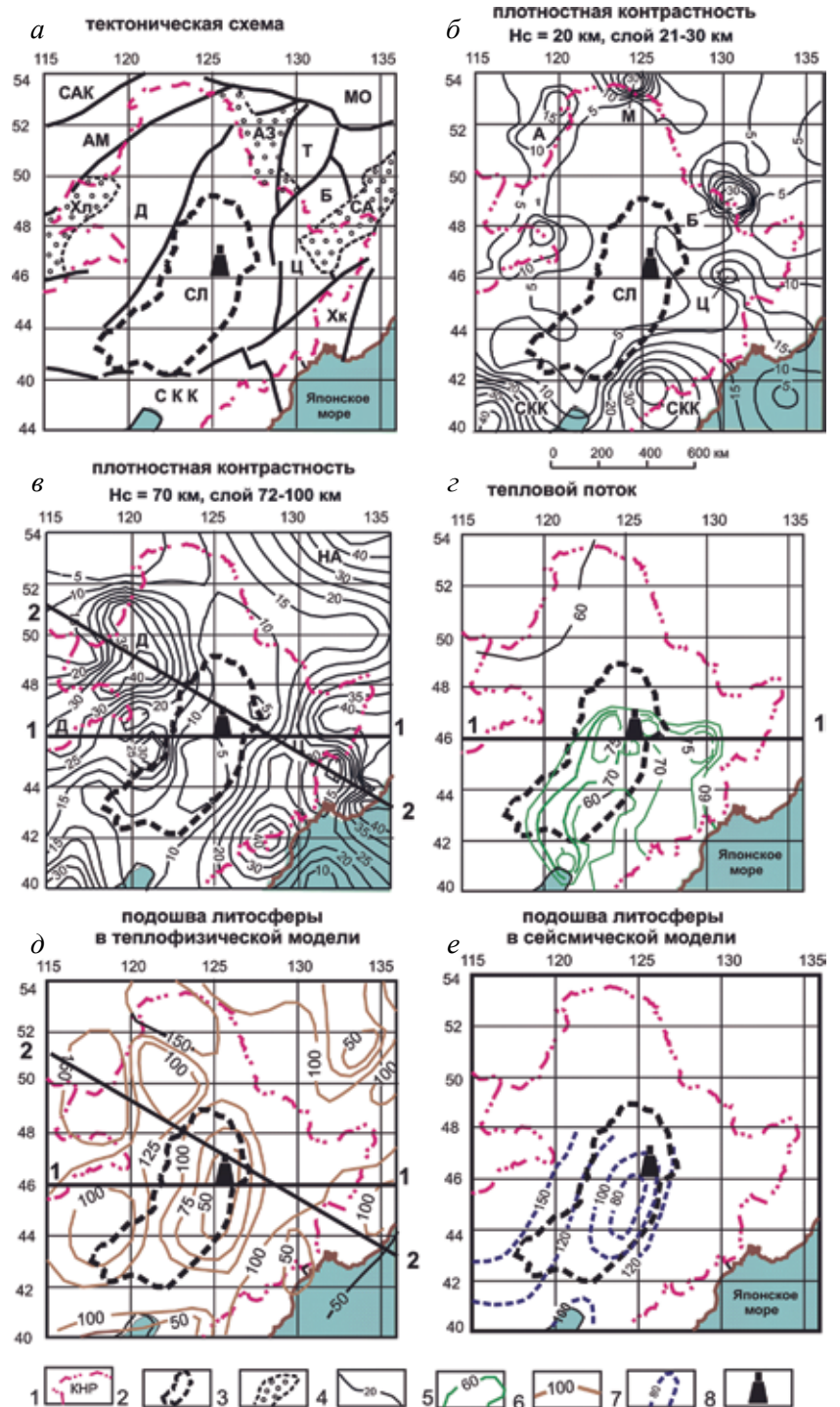


Рис. 2

Плотностная контрастность земной коры в срезе на глубине 30 км (а) с разрезами μ_z -модели (б)

1 – шкала раскраски разрезов, 1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км. Другие обозначения на рис. 1

Рис. 3
 Тектоническая схема (а) [2]; плотностная контрастность нижней коры (б) и верхней мантии (в); тепловой поток (з) [38]; подошва литосферы в теплофизической (д) [2] и сейсмической (е) [26] моделях в Северо-Восточном Китае
 1 – государственная граница КНР;
 2 – впадина Сунляо;
 3 – осадочные бассейны второго порядка;
 4–5 – изолинии: плотностной контрастности (4) (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км) и теплового потока (5), мВт/м²;
 6–7 – глубина залегания кровли астеносферы в теплофизической (5) и сейсмической (6) моделях, км;
 8 – месторождение нефти Дацин.
 Обозначения выступов архейско-протерозойского фундамента:
 СКК – Северо-Китайский,
 АМ – Аргуно-Мамынский,
 Д – Дягдагачинский,
 А – Аргунский,
 М – Мамынский,
 Т – Туранский,
 Б – Буреинский,
 Ц – Цзямусинский,
 НА – Нижне-Амурский блок с фундаментом кратонного типа.
 Осадочные бассейны:
 СЛ – Сунляо,
 Хл – Хайларский,
 АЗ – Амуро-Зейский,
 СА – Средне-Амурский



фундамента вследствие регионального надвига со стороны Енисейского кряжа [6]; 3) превышением температуры, благоприятной для образования нефти на оси рифта.

Северо-Восточный Китай

Территория Северо-Восточного Китая занимает восточный фланг Амурской плиты [2] и характеризуется сложным геологическим строением [25, 26, 40]. Здесь широко развиты структуры растяжения – сдвига, образовавшиеся в позднем мезозое и кайнозое [20, 32, 39]. Результатами процессов растяжения являются впадины Хайларская, Сунляо, Амуро-Зейская и Средне-Амурская (рис. 3, а).

Центральное место в Северо-Восточном Китае занимает меловой осадочный бассейн Сунляо (рис. 3). Большинство исследователей связывает его происхождение с позднемезозойскими рифтогенными процессами [20, 32]. Мощность осадочной толщи в бассейне Сунляо составляет около 6 км, а нефтематеринских свит – 500 м. Так же как в Западной Сибири, нефтегазоносность бассейна связана с отложениями мелового и юрского периодов. В этом бассейне расположено самое крупное в Китае нефтегазовое месторождение Дацин с первичными запасами нефти 5,7 млрд тонн, а природного газа – 1 трлн м³, что составляет более 25% углеводородных ресурсов КНР [5]. Начиная с 1960 г. добыча

нефти из него поддерживается на уровне 1 млн баррелей в сутки, или 45–50 млн тонн в год, что делает его одним из крупнейших месторождений в мире.

В распределениях плотностной контрастности впадина Сунляо выражена широким минимумом в большинстве срезов μ_z -модели до глубины 70 км (рис. 3), которые свидетельствуют о том, что нижний слой земной коры и подкорковая мантия находятся здесь в вязком состоянии. На профиле Манчжурия – Суйфыньхэ под впадиной Сунляо регистрируются низкие удельные электрические сопротивления в верхнем (40 Ом·м) и нижнекоровом (3 Ом·м) слоях [2]. Под впадиной уменьшена мощность земной коры до 32 км [22, 23, 42] и литосферы до 75–100 км [2, 20, 39, 45].

В разрезах μ_z -модели (рис. 4) впадина Сунляо выражена прогибом подошвы верхнекорового слоя пониженной вязкости, а в верхней мантии под ней располагается поднятие вязкого ($\mu_z < 10 \cdot 10^{-2}$ кг/м²/км) астеносферного слоя до глубины 80 км (рис. 4). Аномалия теплового потока здесь коррелируется с астеносферной линзой ($\mu_z < 5$ ед.), которая полого наклонена в восточном направлении. В подкоровом слое верхней мантии тоже присутствуют аномально вязкие участки ($\mu_z < 5$ ед.). С одним из них совпадает максимум теплового потока и месторождение Дацин в разрезе 2–2 (рис. 5). Асимметричность теплового аномалии объясняется влиянием подкорового источника тепла под Цзямусинским (Чанбайшаньским) террейном, с которым связана кайнозойская вулканическая деятельность на восточном флан-

ге впадины Сунляо [24] и который сопровождается резким сокращением земной коры до 28 км [28]. В зоне мантийного поднятия наблюдается уменьшение скорости поперечных сейсмических волн на 3–4% в вертикальном диапазоне от 20 до 140 км [24], что свидетельствует о пониженной вязкости нижнего слоя земной коры и подкоровой мантии.

В разрезе 1–1 (рис. 4) впадина Сунляо характеризуется асимметричным профилем корового прогиба относительно ее приповерхностных границ, что согласуется с рельефом подошвы нефтеносных отложений: прогиб смещен к западной границе впадины [43]. Такая же особенность имеет место в Томской области (рис. 1, 2).

Совокупность рассмотренных данных приводит к выводу, что нефтегазоносные районы Северо-Восточного Китая приурочены к рифтогенному разрыву земной коры, простирающемуся от Бохайского залива на юге до Амура-Зейской впадины на севере. На южном отрезке рифта расположен нефтеносный бассейн Бохайвань, севернее рифт разделяет Северо-Китайский кратон на два блока (рис. 3, б), еще севернее располагается бассейн Сунляо, а на крайнем северо-востоке рифта – Амура-Зейская впадина. Прогностическими геофизическими признаками нефтеносности в Северо-Восточном Китае являются аномалии теплового потока, электрической проводимости и плотностной контрастности (μ_z). При этом непосредственно в гравитационных аномалиях бассейн Сунляо практически не выражен [2, 22], что объясняется многослойным строением тектоносферы (рис. 4)

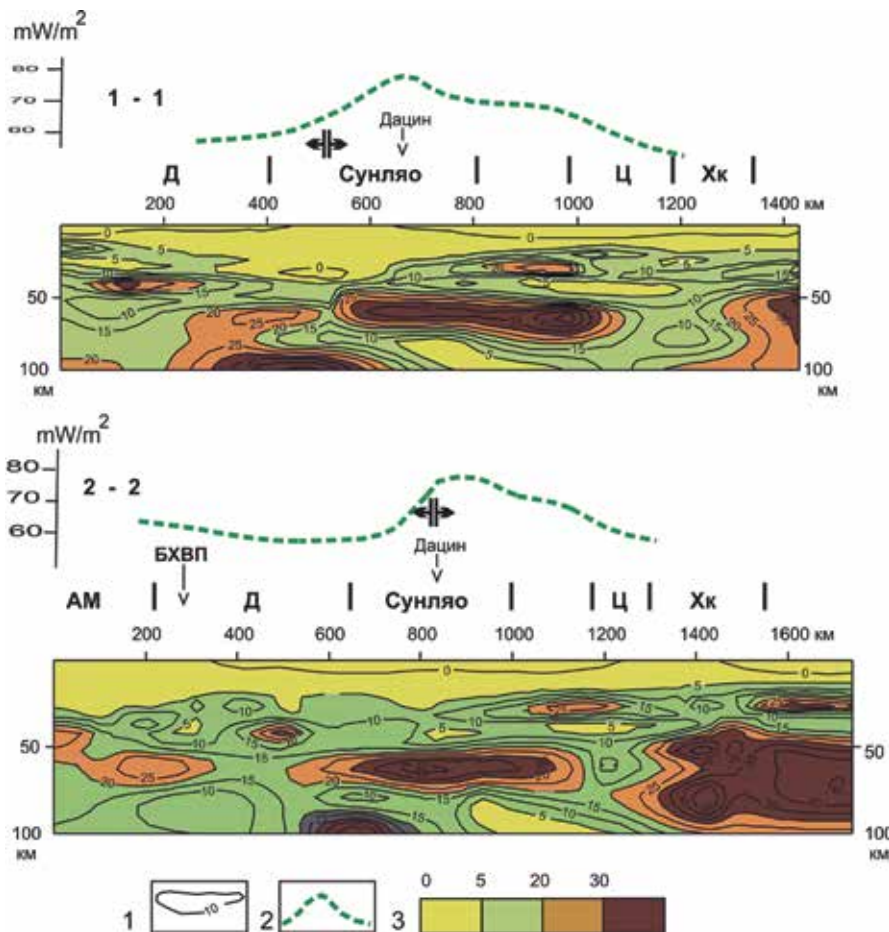


Рис. 4
 Разрезы μ_z -модели земной коры и верхней мантии Северо-Восточного Китая
 1 – изолинии плотностной контрастности;
 2 – аномалия теплового потока;
 3 – шкала раскраски разрезов.
 Другие обозначения на рис. 1

и совмещением гравитационных эффектов поднятия астеносферы (гравитационный максимум) и верхнекорового прогиба (гравитационный минимум). Западная граница бассейна совпадает с мощной гравитационной ступенью (скачок значений от -80 до -20 мгл) и соответствующим сокращением мощности земной коры (от 36 до 32 км) [22].

Таблица

Геолого-геофизическая характеристика осадочных бассейнов Северо-Восточного Китая и Приамурья

впадины	мощность осадков, км [2, 27]	плотностная контрастность нижнего слоя земной коры, 10^{-2} кг/м ³ /км	тепловой поток, мВт/м ² [38]
Хайлар	1–1,5	< 5	55–65
Амуру-Зейская	1–1,5	5–8	40–43
Средне-Амурская	1,5–2	< 5	45–50
Сунляо	6	< 5	75–80
Бохайвань	3	10–15	55–65

В свете рассмотренных данных интересно оценить сравнительные перспективы осадочных бассейнов российского Приамурья и Северо-Восточного Китая (таблица). Из таблицы следует, что наиболее благоприятными условиями для образования углеводородных залежей являются: мощность осадков более трех километров, высокий тепловой поток (> 50 мВт/м²) и низкие значения плотностной

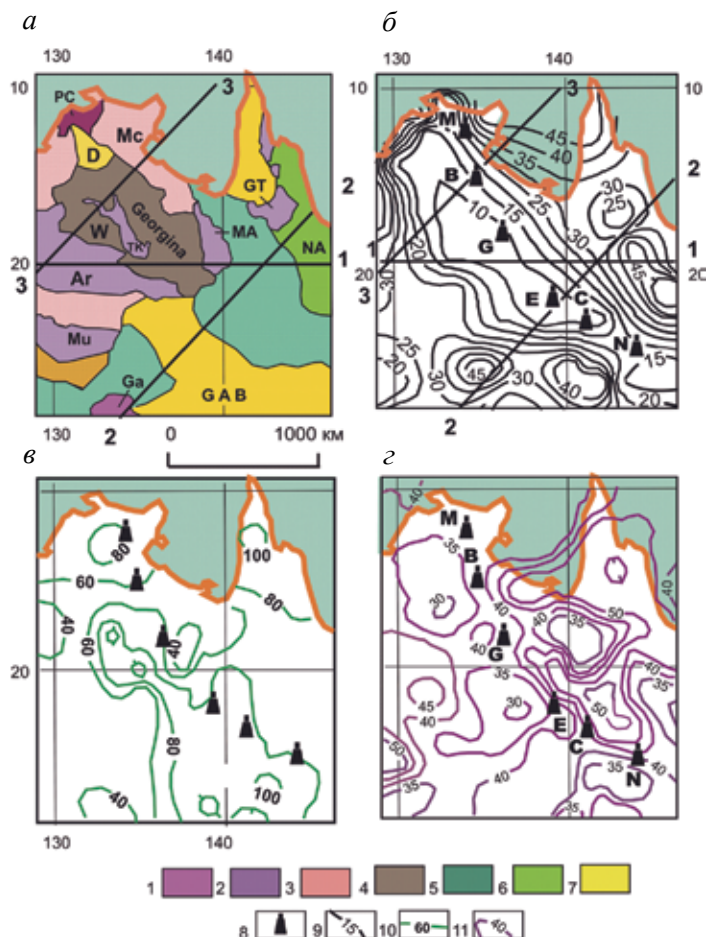
контрастности (< 5) нижнего слоя земной коры. Эти условия в максимальной степени совмещены в бассейне Сунляо. Вторым по перспективности является бассейн Бохайвань, где известны небольшие притоки нефти. В Амуру-Зейской и Средне-Амурской впадинах не следует ожидать высоких перспектив обнаружения месторождений нефти или газа.

Северо-Восточная Австралия

Северо-Восточная территория Австралии является одним из основных районов добычи нефти и газа на этом континенте. Углеводородные залежи залегают здесь в палеозойских (О-С) сланцевых толщах. Разведанные запасы нефти в одном только рифтогенном бассейне Джорджина (рис. 5, а) составляют 1 млрд 116 млн баррелей, а прогнозные ресурсы – более 7 млрд баррелей [29]. Геологические признаки рифтогенной природы бассейна Джорджина установлены в его южной части [21] и в юго-восточной части впадины второго порядка Уайсо (в трог Ландер) [30], однако в геофизических аномалиях рифт Джорджина прослеживается далеко на юго-восток под мезозойскими отложениями Большого Артезианского бассейна (рис. 5, б, в, г). Хорошо проявлены три типичных признака рифтовых систем: линейное сокращение мощности земной коры (рис. 5, г), максимум теплового потока (рис. 5, в) и минимум плотностной контрастности (рис. 5, б). В восточном борту бассейна Джорджина группируются районы добычи нефти и газа [29]. Смеще-

Рис. 5
Тектоническая схема (а) [21, 33], плотностная контрастность подкорового слоя (б), тепловой поток (в) [36] и схема мощности земной коры (г) [34] Северо-Восточной Австралии

1–2 – метаморфический фундамент Северо-Австралийского кратона: архейский (1) и протерозойский (2);
3–4 – осадочные бассейны: позднепротерозойские (3) и палеозойские (4);
5 – мезозойские бассейны;
6 – складчатые комплексы Новой Англии;
7 – кайнозойские бассейны;
8 – нефтегазоносные районы [Munson, 2014];
9 – изолинии плотностной контрастности (схема «б»);
10 – изолинии теплового потока, мВт/м²;
11 – изопакеты мощности земной коры (схема «г»), км.
Обозначения тектонических структур:
архейские: PC – Пайн-Крик, Ga – Гаулер;
протерозойские: Ar – Арунта, TK – Теннант-Крик, Mu – Масгрейв, GT – Джорджтаут, Mc – Макалтур, MA – Маунт-Айса;
палеозойские: W – впадина Уайсо;
NA – складчатая система Новая Англия;
кайнозойские: D – впадина Дэли, GAB – Большой Артезианский бассейн.
Обозначения нефтегазоносных районов:
M – Макалтур, B – Биталу, G – Джорджина, E – Эроманга, C – Купер, N – Нэрроуз



ние нефтегазоносных районов к восточному борту рифта Джорджина может быть связано с миграцией нефти, на что указывают работы российских исследователей [35]. По их оценкам, объем нефтяных залежей, перемещенных от места их первичной генерации, в южных районах бассейна Джорджина может составить 4 млрд тонн. Заметим, что в Томской области нефтяные месторождения тоже смещены к флангу зоны растяжения в кристаллическом слое земной коры (рис. 2, б).

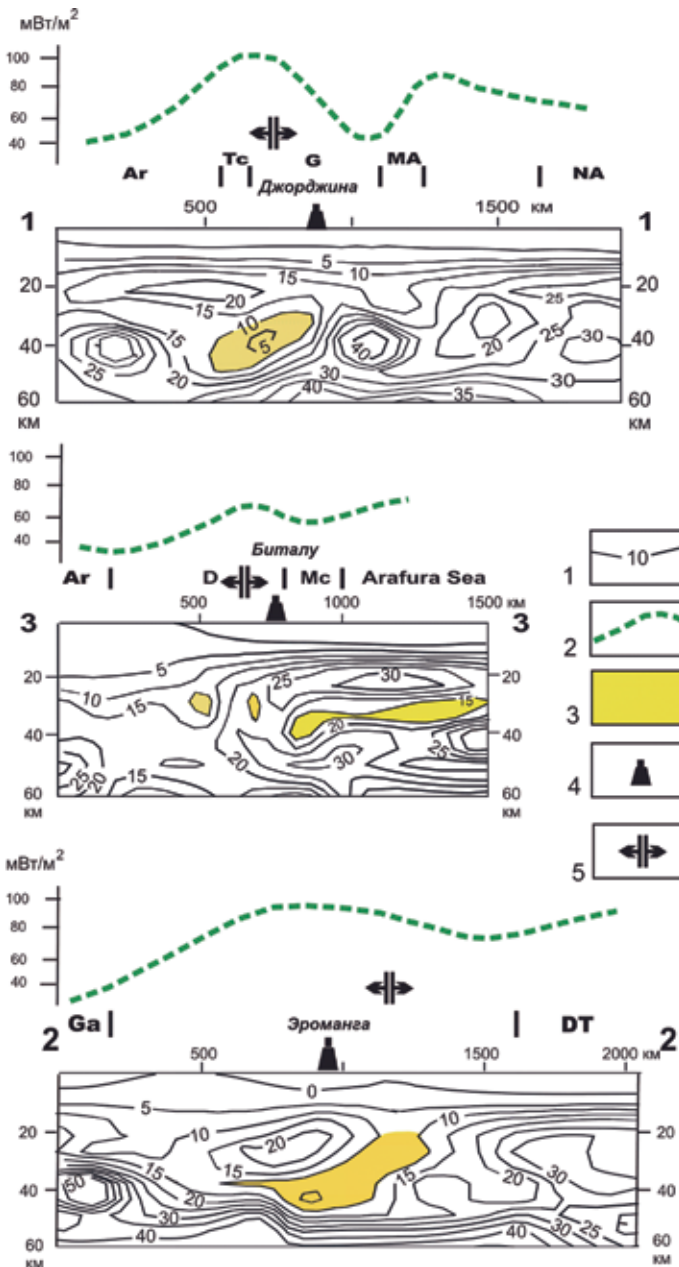


Рис. 6

Разрезы μ_z -модели земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Австралии

- 1 – изолинии плотностной контрастности;
 - 2 – аномалия теплового потока;
 - 3 – зоны пониженной вязкости в нижнем слое земной коры и верхах мантии;
 - 4 – нефтегазоносные районы [29];
 - 5 – ось рифта Джорджина.
- Другие обозначения на рисунке 5

В разрезах μ_z -модели (рис. 6) ясно проявлена связь аномалий теплового потока с реологическими разуплотнениями в нижнем слое земной коры и подкорковом слое верхней мантии. В разрезе 1–1 максимум теплового потока приурочен к минимуму плотностной контрастности в интервале глубин 35–55 км. На восточных флангах плотностной и тепловой аномалий расположен нефтеносный район Джорджина. В разрезе 3–3 повышение теплового потока в северо-восточном направлении связано с наклонным слоем пониженной вязкости под бассейном Макартур и продолжением этого слоя в заливе Карпентария Арафурского моря (рис. 6). Нефтяной район Беталу располагается в краевой части теплового максимума. В разрезе 4–4 широкий максимум теплового потока связан с реологическим разуплотнением нижнекорового слоя под южным продолжением протерозойского блока Маунт-Айса. Нефтяной район Эроманга приурочен к максимуму теплового потока и наименьшему значению плотностной контрастности (менее 5×10^{-2} кг/м³/км).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Анализ 3D-моделей плотностной контрастности земной коры и подкорковой мантии, описываемых μ_z -параметром в трех удаленных друг от друга нефтегазоносных регионах, обнаружил устойчивую связь минимумов плотностной контрастности с максимумами теплового потока (> 50 мВт/м²) и геологическими признаками структур растяжения земной коры. Такая связь предполагает повышенную проницаемость среднего и нижнего слоев земной коры для мантийных притоков тепла и флюидов в верхние горизонты коры, что обеспечивает преобразование органического вещества, содержащегося в палеозойских и мезозойских осадочных и слабометаморфизованных толщах (сланцах), в углеводородные залежи. Наряду с этими признаками нефтегазоносные районы характеризуются сокращением мощности земной коры до 30–32 км.

3D-модели плотностной контрастности могут найти применение при поисковых исследованиях на нефть и газ, выборе мест заложения глубоких скважин и направления дорогостоящих сейсмических работ. Оценки пространственных параметров глубинных источников тепла под нефтегазоносными районами могут быть выполнены при сопоставлении объемных распределений температуры, вычисляемой по измерениям теплового потока, и плотностной контрастности [11, 12]. Дополнительным параметром, способствующим локализации проницаемых зон пониженной вязкости, является удельное электрическое сопротивление [2, 13, 41].

Распределения плотностной контрастности (μ_z) в земной коре Западной Сибири, Северо-Восточном Китае и Северо-Восточной Австралии имеют много общего. Во всех этих регионах нефтяные и газоконденсатные залежи приурочены к зонам разрыва земной коры рифтогенного типа, сопровождающимся минимумами плотностной контрастности, максимумами теплового потока и сокращением мощности земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох Ю.И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие. М.: изд-во Московского геол.-разв. ун-та, 1998. 87 с.
2. Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф. и др. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
3. Исаев В.И., Коржов Ю.В., Лобова Г.А., Попов С.А. Нефтегазоносность Дальнего Востока и Западной Сибири по данным гравиметрии, геотермии и геохимии. Томск: изд-во ТПУ, 2011. 383 с.
4. Кузнецов В.Д., Сальников А.С., Титаренко В.В. Палеозойский нефтегазоносный комплекс Западной Сибири по данным глубинных сейсмических зондирований // Геофизика. 2011. № 4. С. 18–24.
5. Ли Гоюй. Геология нефти и газа Китая / ред. Вышемирский В.С. Новосибирск: изд. ОИГГМ СО РАН, 1992. 37 с.
6. Мелихов В.Р., Лыгин И.В., Пийп В.Б. Строение земной коры в зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты по комплексу геофизических данных // Геофизика. 2011. № 2. С. 70–79.
7. Мецзяков К.А., Карасева Т.В. Особенности формирования триасовых прогибов севера Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 3. С. 1–11.
8. Осипова Е.Н. Нефтегазоносность (палеотемпературное моделирование) нижнемеловых отложений Нюрольской мегападины // Геофизика. 2014. № 2. С. 70–74.
9. Петрицевский А.М. Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 2013. 192 с.
10. Петрицевский А.М. Общие черты глубинного строения тектоносферы западно-тихоокеанских окраин (Северо-Восточная Азия и Австралия) // Геотектоника. 2016. № 6. С. 87–104.
11. Петрицевский А.М. Реологическая и геотермическая характеристики Охотоморского плюма // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 2. С. 65–76.
12. Петрицевский А.М., Исаев В.И. Глубинные источники теплогенерации и региональный прогноз нефтегазоносности Томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 97–113.
13. Петрицевский А.М., Васильева М.А. Нетрадиционные способы оценки реологических состояний тектонических сред в земной коре и верхней мантии западно-тихоокеанских континентальных окраин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 39–55.
14. Поспеев А.В. Геологические аспекты геоэлектрики верхней литосферы Земли // Геофизика. 2004. № 4. С. 35–38.
15. Прокофьев А.А., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Распределения температуры и плотности в литосферной мантии Сибирского кратона по данным региональных сейсмических моделей // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2009. № 1 (27). С. 1–4.
16. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М.: изд-во МГУ, 2002. 506 с.
17. Трошков Г.А. Метод локализации сингулярных источников геопотенциальных полей в пространстве трех вещественных переменных // Физика Земли. 1994. № 9. С. 73–77.
18. Cull J.P. and Denham D. Regional variations in Australian heat flow. BMR Journal of Australian Geology & Geophysics. 1979. № 4. Pp. 1–13.
19. Evans G.C. Application of Poincare's sweeping-out process. Mathematic. 1933. V. 19. Pp. 457–461.
20. Ge R.F., Zhang Q.L., Wang L.S., Chen J., Xie G.A., Wang X.Y. Late Mesozoic rift evolution and crustal extension in the central Songliao Basin, northeastern China: constraints from cross-section restoration and implications for lithospheric thinning. International Geology Review. 2012. Vol. 54. Pp. 183–207. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2010.511900>.
21. Greene D.C. Neoproterozoic rifting in the southern Georgina Basin, central Australia. Implications for reconstructing Australia in Rodinia. Tectonics. 2010. Vol. 29. TC5010, doi: 10.1029/2009TC002543.
22. Hao T., Liu Y., Duan Ch. Characteristics of geophysical field in east China and adjacent region. Geoscience Journal. 1998. Vol. 2, № 3. Pp. 108–116.
23. He C., Dong S., Chen X., Santosh M., Niu S. Seismic evidence for plume-induced rifting in the Songliao Basin of Northeast China. Tectonophysics. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.015>.
24. Kang D., Ning W.J., Ritzwolle M.H., Kan D., Shen W. Seismic evidence for lithospheric modification associated with intra-continental volcanism in Northeastern China. Geophysical Journal International. 2016. Vol. 204. Pp. 215–235. doi: 10.1093/gji/ggv441.
25. Krasnyi L.I. and Peng Y.B. Geological Map of Amur Region and Adjacent Areas. Harbin: Sankt-Petersburg, Blagoveshchensk, 1999.
26. Kusky T.M., Windley B.F., Zhai M.G. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen. NEICON (National Electronic Information Consortium of Russia). 2017. Vol. 1. <http://sp.lyellcollection.org>.
27. Laske G. and Masters G. A global digital map of sediment thickness. EOS. Trans. Am. Geophys. Union. 1997. Vol. 78. F483.
28. Liu H., and Niu F. Receiver function study of the crustal structure of Northeast China: Seismic evidence for a mantle upwelling beneath the eastern flank of the Songliao Basin and the Changbaishan region. Earth. Sci. 2011. Vol. 24 P. 27–33.
29. Munson T.J. Petroleum geology and potential of the onshore Northern Territory, Northern Territory Geological Survey, Report 22. 2014. 242 p.
30. Northern territory geological survey petroleum basin study. Wiso Basin. Questa Australia Pty. Ltd. Adelaide. 1989. 52 p.
31. Osipova E., Ivanov V., Smirnov V. and Abramova R. Terrestrial heat flow and its role in petroleum geology. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2015. Vol. 24. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012015/pdf>.
32. Ren J., Tamaki S.Li, Zhan J. Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. Tectonophysics. 2002. Vol. 344. Pp. 175–205.
33. Salmon M., Kennett B.L.N. & Say E. Australian Seismological Reference Model (AuSREM): crustal component. Geophys. J. Int. 2013. 192. Pp. 190–206.
34. Saygin E., Kennett B. L. N. Crustal structure of Australia from ambient seismic noise. Tomography. Journal of Geophys. Res. 2012. Vol. 117 (B1). B01304. Pp. 1–15. doi: 10.1029/2011JB008403.
35. SIBGEO. Provision of engineering type work for the determination of the quality and maturity of source rocks in the Georgina Basin. Report on contract 589/1423602/90023 by the Siberian Branch, USSR Academy of Sciences for Pacific Oil and Gas Pty Ltd. Northern territory Geological Survey. 1992. Open File Petroleum Report PR1993-002.
36. Surface Heat Flow of the Australia. Map Produced by Heat Dry Rocks Pty Ltd. 2011. (www.hotdryrocks.com).
37. Tang Y., Chen Y.J., Zhou S., Ning J. and Ding Z. Lithosphere structure and thickness beneath the North China Craton from joint inversion of ambient noise and surface wave tomography. J. Geophys. Res. Solid Earth, 2013/118, 2333–2346. doi: 10.1002/jgrb.50191.

38. Tao W., Shen Z. Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas. *Natural Science*. 2008. Vol. 18. Pp. 843–849.

39. Teng C., Hao F., Zou H., Zhou X., and Xu Ch. Tan-Lu fault system and its significance in oil accumulation in the central Liaodong Bay subbasin, Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*. 2016. Vol. 100. № 2. Pp. 289–314.

40. Wan T.F., Zhao Q.L. The genesis of tectono-magmatism in eastern China. *Science China. Earth Sci.* 2012. Vol. 55. Pp. 347–354, doi: 10.1007/s11430-011-4361-4.

41. Wang L., Hitchman A.P., Ogawa Ya., Siripunvaraporn W., Ichiki M., and Fujita K. A 3-D conductivity model of the Australian continent using observatory and magnetometer array data. *Geophys. J. Int.* 2014. Vol. 198. № 2. Pp. 1171–1186.

42. Wang Z.J., Xu W.L., Pei F.P., Wang Zh.W., Yu Li, Cao H.Y. Geochronology and geochemistry of middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central–eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos*. 2015. Vol. 238. Pp. 13–25.

43. Wei H.H., Liu J.L., and Meng Q.R. Structural and sedimentary evolution of the southern Songliao Basin, northeast China, and implications for hydrocarbon prospectivity. *AAPG Bulletin*. 2010. Vol. 94. No. 4. Pp. 533–564.

44. Zhang C., Mushayandebvu F.M., Reid A.B., Fairhead J.D. & Odegard M.E. Euler deconvolution of gravity tensor data. *Geophysics*. 2000. Vol. 65. № 2. Pp. 512–520.

45. Zhang R.Q., Sun W.L., He J., Gao Z. Crustal and lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. Vol. 401. № 1. Pp. 196–205.

REFERENCES

1. Blokh YuI. Kolichestvennaya interpretatsiya gravitatsionnikh i magnitnikh anomalii Uchebnoe posobie [Quantitative interpreting of gravity and magnetic anomalies. Manual]. Moscow: Moscow's geological-prospecting university, 1998. 87 p. (in Russian).

2. Didenko AN, Kaplun VB, Malishev YuF et al. Glubinnoe stroenie i metallogeniya Vostochnoy Azii [Deep structure and metallogeny of the Eastern Asia]. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 332 p. (in Russian).

3. Isaev VI, Korzhov YuV, Lobova GA, Popov SA. Neftegazonosnost Dal'nego Vostoka i Zapadnoy Sibiri po dannim gravimetrii, geotermii i geokhimii [Oil-gas bearing of the Russian Far East by gravity, geothermy, and geochemistry data]. Tomsk: Tomsk polytechnic university, 2011. 383 p. (in Russian).

4. Kuznetsov VD, Sal'nikov AS., Titarenko VV. Paleozoiskii neftegazonosnii kompleks Zapadnoy Sibiri po dannim glubinnykh seismicheskikh zondirovaniy [Paleozoic oil-gas complex of the Western Siberian on the data of deep seismic sounding]. *Geophysika*. 2011; (4): 18–24 (in Russian).

5. Li Goyui. Geologiya nefti i gaza Kitaya [Oil-Gas-Geology of the China]. Novosibirsk: Siberian Branch of the RAS, 1992. 37 p. (in Russian).

6. Melikhov VP, Ligin IV, Pyip VB. Stroenie zemnoy kori v zone sochleneniya Sibirskoy platformy i Zapadno-Sibirskoy pliti po kompleksu geofizicheskikh dannikh [The crust structure in the joint zone of the Siberian platform with Western Siberian plate]. *Geophysika*. 2011; (2): 70–79 (in Russian).

7. Meshcheryakov KA, Karaseva TV. Osobennosti formirovaniya triasovikh progibov severa Zapadnoy Sibiri v svyazi s neftegazonosnost'yu [Features of a forming of Triassic basins in the North of Western Siberia]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2010; 5(3): 1–11 (in Russian).

8. Osipova EN. Neftegazonosnost (paleotemperaturnoe modelirovanie) nizhnemelovikh otlozhenii Nyurol'skoy megavpadii [Oil-gas bearing (paleo-temperature modeling) of the Lower Cretaceous strata in the Nyurol Basin. *Geophysika*. 2014; (2): 70–74 (in Russian).

9. Petrishchevsky AM. Gravitatsionnii metod otsenki reologicheskikh svoystv zemnoy kori i verkhney mantii (v kovergentnikh i plumovikh strukturakh Severo-Vostochnoy Azii) [Gravity method for evaluation of rheological properties of the crust and uppermost mantle (in the convergent and plume structures of the North-East Asia)]. Moscow: Nauka, 2013. 192 p. (in Russian).

10. Petrishchevsky AM. Common Features of the Tectonosphere Deep Structure in the Western Pacific Margins (Northeast Asia Region and Australia). *Geotectonics*. 2016; 50(6): 608–623 (in Russian).

11. Petrishchevsky AM. Reologicheskaya i geotermicheskaya kharakteristiki Okhotomorskogo plyuma [Rheological and geothermal characteristics of the Okhotsk Sea Plume]. *Isvestiya of the Tomsk polytechnic university. Engineering of recourses*. 2016; 327(2): 65–76 (in Russian).

12. Petrishchevsky AM and Isaev VI. Glubinnie istochniki teplogeneratsii i regional'nii prognoz neftefgzonosnosti Tomskoy oblasti [Deep sources of a heat-generation and the regional forecast of the oil-gas bearing in the Tomsk district]. *Isvestiya of the Tomsk polytechnic university. Engineering of recourses*. 2017; 328(5): 97–113 (in Russian).

13. Petrishchevsky AM and Vasil'eva MA. Netraditsionnye metody otstenki reologicheskikh sostoyanii tektonicheskikh sred v zemnoy kore i verkhney mantii zapadno-tikhoookeanskikh okrain [Non-conventional methods of the rheological state evaluation of tectonic media into the crust and upper mantle of the Western Pacific Margins]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2017; 4(36): 39–55 (in Russian).

14. Pospeev AV. Geologicheskie aspekty geoelektriki verkhney litosferi Zemli [Geo-electric aspects of the upper lithosphere of the Earth]. *Geophysika*. 2004; (4): 35–38 (in Russian).

15. Prokof'ev AA, Kronrod VF, Kuskov OL. Raspredeleniya temperaturi i plotnosti v litosfernoy mantii Sibirskogo kratona po dannim regional'nykh seismicheskikh modeley [Distributions of a temperature and density into the lithospheric mantle of the Siberian Craton from the regional seismic models]. *Vestnik of the Earth Sciences of the RAS*. 2009; 27(1): 1–4 (in Russian).

16. Sorokhtin OG and Ushakov SA. Razvitiye Zemli [Evolution of the Earth]. Moscow: Moscow's university, 2002. 506 p. (in Russian).

17. Troshkov GA. Metod lokalizatsii singularnykh istochnikov geopotsial'nykh poley v prostranstve trekh vtshchestvennykh peremennykh [Method of a localization of the geopotential singular sources in 3D-space of third material variables]. *Physika Zemli*. 1994; (9): 73–77 (in Russian).

18. Cull JP and Denham D. Regional variations in Australian heat flow. *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*. 1979; (4): 1–13.

19. Evans GC. Application of Poincare's sweeping-out process. *Mathematic*. 1933; (19): 457–461.

20. Ge RF, Zhang QL, Wang LS et al. Late Mesozoic rift evolution and crustal extension in the central Songliao Basin, northeastern China: constraints from cross-section restoration and implications for lithospheric thinning. *International Geology Review*. 2012; (54): 183–207.

21. Greene DC. Neoproterozoic rifting in the southern Georgina Basin, central Australia. Implications for reconstructing Australia in Rodinia. *Tectonics*. 2010; (29): TC5010. doi: 10.1029/2009TC002543.

22. Hao T, Liu Y, Duan Ch. Characteristics of geophysical field in east China and adjacent region. *Geoscience Journal*. 1998; 2(3): 108–116.

23. He C, Dong S, Chen X, Santosh M, Niu S. Seismic evidence for plume-induced rifting in the Songliao Basin of Northeast China. *Tectonophysics*. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.015>.

24. Kang D, Ning WJ, Ritzwolle MH, Kan D, Shen W. Seismic evidence for lithospheric modification associated with intracontinental volcanism in Northeastern China. *Geophysical Journal International*. 2016; (204): 215–235. doi: 10.1093/gji/ggv441.

25. Krasnyi LI and Peng YB. Geological Map of Amur Region and Adjacent Areas. Harbin: Sankt-Petersburg, Blagoveshchensk, 1999.
26. Kusky TM, Windley BF, Zhai MG. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen. NEICON (National Electronic Information Consortium of Russia). 2017. Vol. 1. <http://sp.lyellcollection.org>.
27. Laske G and Masters G. A global digital map of sediment thickness. *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*. 1997; (78): F483.
28. Liu H and Niu F. Receiver function study of the crustal structure of Northeast China: Seismic evidence for a mantle upwelling beneath the eastern flank of the Songliao Basin and the Changbaishan region. *Earth. Sci.* 2011; (24): 27–33.
29. Munson TJ. Petroleum geology and potential of the onshore Northern Territory, Northern Territory Geological Survey, Report 22. 2014. 242 p.
30. Northern territory geological survey petroleum basin study. Wiso Basin. Questa Australia Pty. Ltd. Adelaide. 1989. 52 p.
31. Osipova E, Ivanov V, Smirnov V and Abramova R. Terrestrial heat flow and its role in petroleum geology. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2015. Vol. 24. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012015/pdf>
32. Ren J, Tamaki SLi, Zhan J. Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*. 2002; (344): 175–205.
33. Salmon M, Kennett BLN & Say E. Australian Seismological Reference Model (AuSREM): crustal component. *Geophys. J. Int.* 2013; (192): 190–206.
34. Saygin E, Kennett BLN. Crustal structure of Australia from ambient seismic noise Tomography. *Journal of Geophys. Res.* 2012; 117 (B1): B01304 1–15. doi: 10.1029/2011JB008403.
35. SIBGEO. Provision of engineering type work for the determination of the quality and maturity of source rocks in the Georgina Basin. Report on contract 589/1423602/90023 by the Siberian Branch, USSR Academy of Sciences for Pacific Oil and Gas Pty Ltd. Northern territory Geological Survey. 1992. Open File Petroleum Report PR1993–002.
36. Surface Heat Flow of the Australia. Map Produced by Heat Dry Rocks Pty Ltd. 2011. (www.hotdryrocks.com).
37. Tang Y, YJ Chen, S Zhou, J Ning and Z Ding. Lithosphere structure and thickness beneath the North China Craton from joint inversion of ambient noise and surface wave tomography, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2013.118, 2333–2346. doi: 10.1002/jgrb.50191.
38. Tao W, Shen Z. Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas. *Natural Science*. 2008; (18): 843–849.
39. Teng C, Hao F, Zou H, Zhou X and Xu Ch. Tan-Lu fault system and its significance in oil accumulation in the central Liaodong Bay subbasin, Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*. 2016; 100(2): 289–314.
40. Wan TF, Zhao QL. The genesis of tectono-magmatism in eastern China. *Science China. Earth Sci.* 2012; 55: 347–354. doi: 10.1007/s11430-011-4361-4.
41. Wang L, Hitchman AP, Ogawa Ya, Siripunvaraporn W, Ichiki M and Fujita KA. 3D conductivity model of the Australian continent using observatory and magnetometer array data. *Geophys. J. Int.* 2014; 198(2): 1171–1186.
42. Wang ZJ, Xu WL, Pei FP, Wang ZhW, Yu Li, Cao HY. Geochronology and geochemistry of middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central–eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos*. 2015; (238): 13–25.
43. Wei HH, Liu JL and Meng QR. Structural and sedimentary evolution of the southern Songliao Basin, northeast China, and implications for hydrocarbon prospectivity. *AAPG Bulletin*. 2010; 94(4): 533–564.
44. Zhang C, Mushayandebvu FM, Reid AB, Fairhead JD & Odegard ME. Euler deconvolution of gravity tensor data. *Geophysics*. 2000; 65(2): 512–520.
45. Zhang RQ, Sun WL, He J, Gao Z. Crustal and lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*. 2014; 401(1): 196–205.

Положительная рецензия от 5.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРЕ



ПЕТРИЦЕВСКИЙ

Александр Митрофанович

Окончил Томский политехнический институт в 1967 г. Главный научный сотрудник Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН. Специалист в области интерпретации гравитационных аномалий. Область научных интересов – тектоника, геодинамика и металлогения Восточной Азии. Автор 190 научных публикаций, в том числе 7 монографий.

УДК 550.837.6

ВОЗМОЖНОСТИ АЭРОГЕОФИЗИКИ ПРИ ПОИСКАХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

В.М. Керцман¹, Е.В. Мойланен², Ю.Г. Подмогов³

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: natagm@bk.ru

² ИПУ РАН. 117342, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65; e-mail: moilanen@mail.ru

³ ООО «Геотехнологии». 141540, Россия, Московская обл., пгт Поварово, ул. Юбилейная, д. 21; e-mail: podmogov1@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается проблема повышения эффективности комплекса геолого-разведочных работ при поисках золоторудного оруденения. Приводится обоснование рациональности использования современного аэрогеофизического комплекса на всех стадиях геолого-поисковых работ на золото. Рассматриваются результаты использования аэрокомплекса в районе Центрально-Африканского разлома на примере поисково-картировочных работ масштаба 1:50 000 и детализационных работ масштаба 1:10 000 на выявленных перспективных участках.

Ключевые слова. Аэрогеофизика, комплекс «Экватор», электроразведка, магниторазведка, гамма-спектрометрия, золото.

POSSIBILITIES OF AIRBORNE GEOPHYSICS FOR GOLD-ORE DEPOSITS OF DIFFERENT TYPE

V.M. Kertsman¹, E.V. Moilanen², Yu.G. Podmogov³

¹ Lomonosov MSU. 119991, Russia, 1, Sparrow Hills, Moscow; e-mail: natagm@bk.ru

² ICS RAS. 117342, Russia, 65, Profsouznaya st., Moscow; e-mail: moilanen@mail.ru

³ LLC Geotechnologies. 141540, Russia, 21, Yubileinaya st., Povarovo, Moscow region; e-mail: podmogov1@yandex.ru

Abstract. We consider efficiency increasing of a complex exploration works by search of gold ore. We prove rationality of use of the modern airborne geophysical complex at all stages of geological and exploration works on gold. We consider results of airborne geophysics at the Central African Ridge area. We discuss mapping results for 500 m between lines data and infill survey results for 100 m between lines data.

Key words. Airborne geophysics, Equator, time domain, frequency domain, magnetic survey, gamma-ray spectrometry, gold.

ВВЕДЕНИЕ. Проблема повышения эффективности поисков золоторудного оруденения как в пределах известных золоторудных районов, так и на новых перспективных площадях весьма актуальна.

Важную роль при этом играют аэрогеофизические методы, отличительной особенностью которых являются высокая мобильность и производительность, возможность опосредованного поиска закрытых площа-



Рис. 1

Комплекс «Экватор» на съемке месторождения Сухой Лог в Иркутской области (2019 г.)

дей, равномерность изучения больших территорий [Becker et al., 1987; Kaufman et al., 2014].

Для каждого региона характерны свои физико-геологические особенности проявления и локализации золоторудного оруденения. В результате многолетних геофизических работ на золоторудных месторождениях был разработан оптимальный для Северо-Востока России комплекс наземных геофизических исследований на поисковой, поисково-оценочной и разведочной стадиях изучения золоторудных месторождений [Ерофеев и Орехов, 2014].

Результативное использование этих наземных методов при поисках и разведке месторождений золота хорошо известно специалистам [Долгаль и Христенко, 2008; Кулаков и др., 1983; Никитин и Хмелевской, 2004; Приходько, 2006].

Мы, безусловно, признаем эффективность наземной геофизики и не призываем исключить ее при поисках и разведке золоторудных месторождений. Мы покажем, как использование современных аэрогеофизических технологий вместе с традиционными наземными исследованиями позволяет резко повысить эффективность поисков золоторудного оруденения.

Аэрогеофизический комплекс.

Аэрокомплекс (рис. 1) включает геофизические методы, такие как электроразведка методом переходных процессов (МПП) и частотного зондирования (ЧЗ), магниторазведка и гамма-спектрометрия. Данный комплекс является достаточно универсальным и применим к различным геолого-геофизическим типам золоторудных месторождений.

Основные технические особенности системы «Экватор» прежде всего относятся к конструкции электромагнитной системы комплекса:

- разнесенная установка передатчик – приемник со специальной системой их взаимного позиционирования [Smith, 2001; Pavlov и др., 2010];
- смешанная форма первичного сигнала и непрерывная регистрация данных позволяют одновременно выполнять зондирования во временной и частотной областях, а также регистрировать реальную форму импульса [Volkovitsky и Karshakov, 2013] (рис. 2);
- короткие времена начала регистрации процесса МПП [Маснае и Baron-Нау, 2010];
- точка подвеса платформы передатчика находится в ее центре тяжести. Это определяет горизонтальность платформы во всем диапазоне возможных скоростей полета (0–200 км/ч).

Возможность выполнять кондиционные измерения на высоких скоростях повышает производительность съемки, а измерения на малых скоростях дают возможность выполнять измерения с огибанием рельефа в горной местности.

Электроразведка позволяет решить задачи выделения кварцевых жил и прожилково-жильных зон, зон дробления, разрывных нарушений различных рангов, уточнения границ тел участков, затронутых процессами дезинтеграционных изменений, выявления и прослеживания зон повышенной сульфидизации, минерализованных зон дробления, литологического расчленения горных пород. Метод позволяет уточнить элементы залегания рудомещающих зон, картировать коры выветривания и россыпи, фиксировать дайки различного состава в пределах интрузивных образований, выполнять литологическое расчленение разреза [Collett, 1986]. Шаг зондирования вдоль линии полета составляет 6 м, при средней скорости полета 150 км/ч. Средняя высота передатчика составляет 40–50 м. Вычисления кажущихся сопротивлений выполняются с учетом реальной высоты рамки генератора, геометрии системы приемник – передатчик, а также реальной (измеренной) формы генераторного импульса. Это дает возможность изучать детальное распределение удельных сопротивлений среды в диапазоне глубин 0–400 м в большом динамическом диапазоне значений (1–10 000 Ом·м) и с высоким пространственным разрешением.

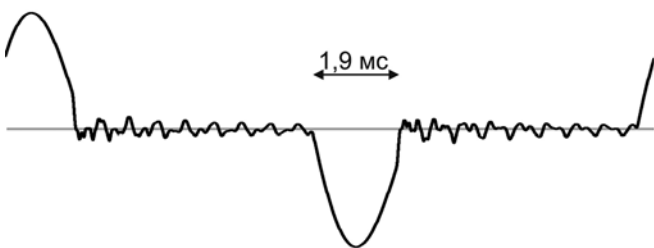


Рис. 2
Форма первичного поля системы «Экватор»
(ток в петле передатчика)

Магниторазведка применяется для уточнения планового положения гранитоидных массивов и их апикальных частей, выделения зональности в строении контактово-измененных пород, установления даек гранодиоритового (среднего) и базитового (основного) состава, разноранговых разрывных нарушений и определения областей распространения гидротермально-метасоматических измененных пород. Система использует цезиевый квантовый датчик с чувствительностью 0,2 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и магнитометр с темпом измерений 1000 Гц. Данный темп измерений позволяет исключить влияние мощного генераторного импульса и помех от вертолета-носителя. В результате шаг измерений вдоль линии полета составляет 1–2 м. Такая детальность измерений при средней высоте датчика 70 м гарантирует обнаружение намагниченных объектов с горизонтальной мощностью менее метра. А высота датчика позволяет ослабить влияние приповерхностных помех и стабилизировать условия измерений. Стабильность и точность измерений делает метрически значимыми магнитные аномалии интенсивностью в десятки доли нТл.

Гамма-спектрометрия используется для обнаружения зон с повышенным содержанием калия, свидетельствующих о процессе калишпатизации, сопровождающем рудный метасоматоз. В отличие от наземных спектрометров с малым объемом детектора, аэроспектрометры имеют объем сцинтиллятора 32 (вертолет Eurocopter) или 48 л (Ми-8), что достаточно для надежного определения радиогеохимической специализации территорий. Во время измерений ведется покристалльная регистрация односекундных спектров, которые суммируются только после обработки, компенсирующей нелинейность энергетической шкалы. Это существенно повышает качество суммарных спектров и обеспечивает разрешение по ^{137}Cs (линия 0,662 МэВ) не хуже 9%. Также выполняется коррекция данных за атмосферный радон. Обработка ведется по нескольким фотопикам для урана и тория, а это увеличивает чувствительность и повышает точность [Бабаянц и др., 2015]. Для кларковых содержаний точность съемки составляет 0,2% для калия, для урана – 1,5 ppm, для тория – 2 ppm [Grasty and Minty, 1995].

По результатам аэрооблетов выделяются перспективные аномалии и области, которые необходимо заверить наземными геофизическими методами в профильном варианте, а также геохимией. Применение аэрогеофизики позволяет существенно ускорить разведку территорий, а заверка наземными методами надежно определяет возможную природу выявленных аномалий и тем самым минимизирует объемы горно-буровых работ.

Возможные поисковые аналоги и физико-геологические модели золоторудных месторождений кварцево-жильного и кварцево-, сульфидно-жильного типов.

Рассмотрим как возможный поисковый аналог геологическое строение золоторудного месторождения Купол. Месторождение расположено в северо-восточной части Охотско-Чукотского вулканоген-

ного пояса. Рудные тела и зоны околорудных изменений месторождения могут выделяться в геофизических полях следующим образом:

1. Локальными аномалиями очень высокого сопротивления 5000–10000 Ом·м на фоне 500–2000 Ом·м, соизмеримыми с размерами рудных тел (кварцевые жилы) на фоне агломератов и туфов.

2. По данным гамма-спектрометрии контрастными аномалиями концентрации калия при минимуме содержания тория (адуляры содержат до 18% калия).

3. Контрастными минимумами на фоне знакопеременного магнитного поля с высокой дисперсией магнитного поля, связанной с вулканитами основного состава.

Технические возможности аэросистемы гарантируют фиксацию подобных аномалий как по амплитуде, так и по пространственному разрешению. Более удобным для оценки применимости аэрогеофизического комплекса для золотопоисковых работ является рассмотрение физико-геологических моделей (ФГМ). Для примера рассмотрим обобщенные ФГМ, разработанные по результатам многолетних поисково-оценочных работ на территории Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, для трех видов золоторудных месторождений кварцево-жильного типа: в минерализованных зонах дробления, секущих складчатость, в магматических образованиях и зонах дробления, согласных со складчатостью. Все три модельных объекта встречаются в виде различных комбинаций на основных золоторудных рудопроявлениях и на территории Восточной Сибири [Татьков, 2015].

Золоторудные поля в минерализованных зонах дробления широко распространены на территории Восточного Саяна, а также на ряде объектов юга Восточной Сибири.

Основной характеристикой данной группы месторождений является приуроченность рудных тел к зонам развития крупных тектонических нарушений. Анализ вмещающих пород позволяет условно разделить их на четыре типа: в терригенной толще; колчеданного типа в углефицированных терригенных толщах; в зонах сканирования терригенно-карбонатной толщи; золотоносные коры выветривания и золоторудные поля в минерализованных зонах дробления терригенно-карбонатной толщи на флангах гипербазитовых массивов. Все эти типы значительно отличаются по физическим свойствам (удельные сопротивления, намагниченность, радиоактивность) и морфологии аномалий. По опыту работ с комплексом «Экватор» в пределах Ангольского щита и Центрально-Африканского разлома все подобные объекты детально картируются и идентифицируются. Субвертикальные объекты лучше определяются в ЧЗ [Hodges, 2013].

Золоторудные месторождения, связанные с интрузивными образованиями.

Основной характеристикой данного типа месторождений является приуроченность рудных тел к краевым частям магматических образований, развивающихся в толщах терригенных и терригенно-

карбонатных пород (рис. 3). Для них характерен золотокварцевый и золотосульфидный структурно-формационный тип оруденения. Несмотря на малую мощность зон приконтактных изменений (первые десятки метров), они будут надежно фиксироваться магнитными аномалиями и аномалиями кажущихся сопротивлений благодаря детальному шагу измерений и высоте магнитного и электромагнитного сенсоров. Рудные тела, связанные с дайковыми комплексами, также будут уверенно выделяться методами магниторазведки и электроразведки.

Золоторудные месторождения во флексурах терригенно-карбонатных толщ. Данный тип месторождений распространен на территории Дальнего Востока и Восточного Саяна, в районе верховьев рек Бирюсы и Зимы. Основным элементом рудовмещающей структуры для данных месторождений являются прослои аргиллитов, кварцевые жилы, сульфидизация жил и околожильного пространства, мелкие складки и флексуры жил, к которым приурочены наиболее обогащенные участки. Применение комплекса «Экватор» при масштабе исследований 1:10000 или 1:5000 обеспечит надежное картирование основных структурных элементов подобных объектов (тектоника, дайковые комплексы, минерализованные шовные зоны).

Кварцевые жилы (даже с горизонтальной мощностью менее метра) и сопровождающие их зоны лиственитизации среди практически немагнитных кристаллических сланцев будут надежно фиксироваться магниторазведкой. Также эти зоны зафиксируются линейными аномалиями повышенных сопротивлений (2000–6000 Ом·м при удельных сопротивлениях вмещающих пород 500–700 Ом·м). Зоны сульфидизации как с поверхности, так и на глубине, вероятно представленные пирротинном, надежно определяются положительными локальными магнитными аномалиями (300–700 нТл на фоне 10–30 нТл) и локальными аномалиями пониженных сопротивлений (100–300 Ом·м на фоне 500–700 Ом·м).

Практические результаты работ. Центрально-Африканский разлом. Республика Руанда. В 2016–2017 гг. была выполнена аэрогеофизическая съемка всей территории Руанды [Podmogov et al., 2019].

Картирование интрузий основного состава и определение параметров аномального объекта по аэромагнитным данным.

Отрицательная локальная магнитная аномалия интенсивностью 1300 нТл и размерами 2300 x 950 м была выделена на поисково-картировочной стадии работ масштаба 1:50000. Она была классифицирована как слепая интрузия основного состава. Вызвала интерес, поскольку находится в зоне развития низкоомных углефицированных сланцев. Восточный борт интрузии имеет контакт с интенсивной линейной аномалией повышенного сопротивления, вероятно связанной с кварцевой жилой. В этой связи была выполнена аэродетализация участка в масштабе 1:10000. Результаты детализации показаны на рис. 4, 5. По результатам детализации определены размеры, контур и эпицентры магнитной аномалии (показан красным

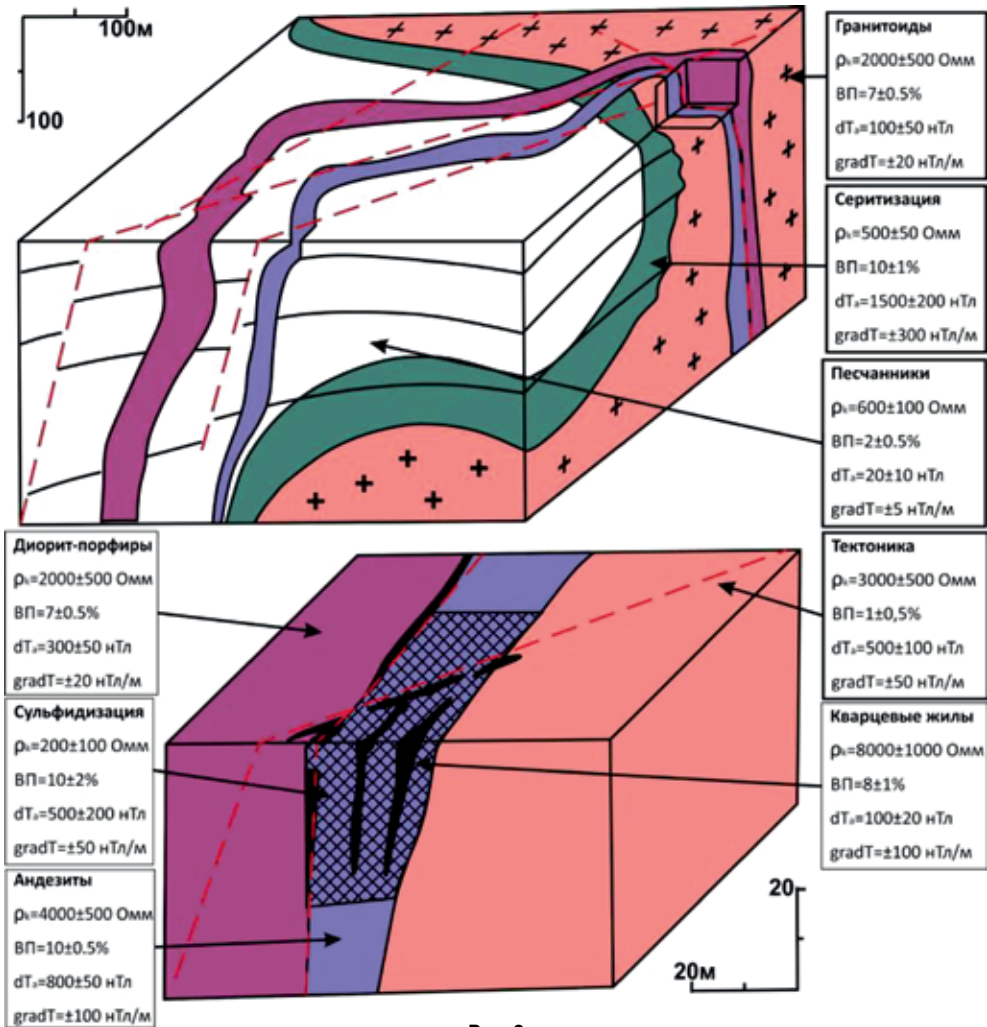


Рис. 3

Обобщенная статистическая ФГМ золоторудных месторождений, связанных с интрузивными образованиями [Татьков, 2015]

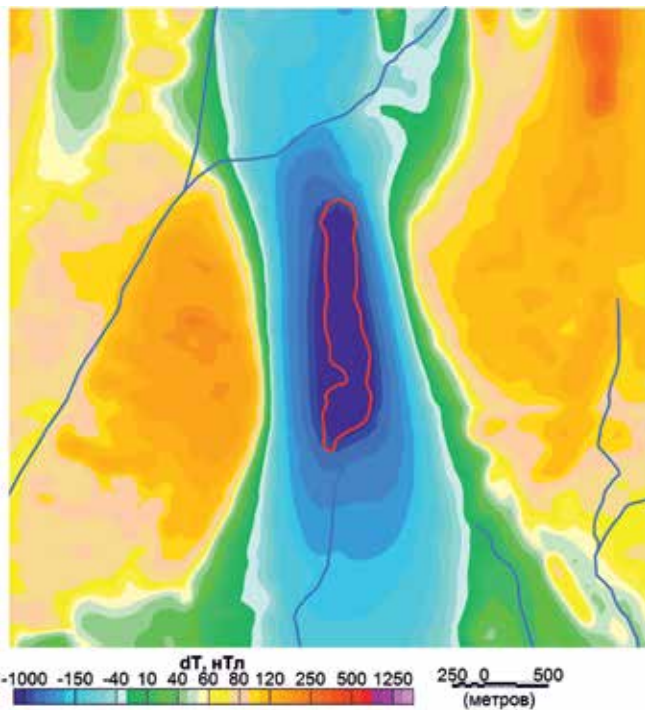


Рис. 4

Карта аномального магнитного поля, редуцированного к полюсу. Голубыми линиями показана гидросеть, красным контуром – выделенная аномалия

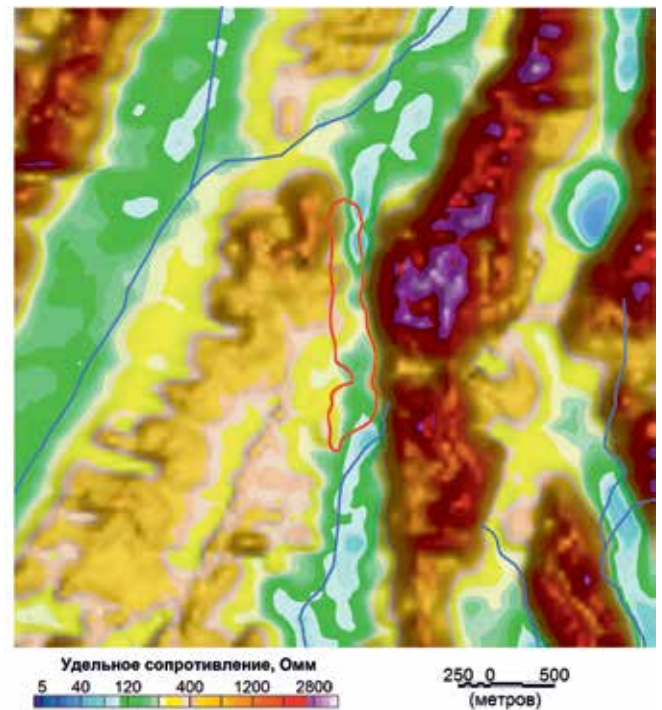


Рис. 5

Карта кажущихся сопротивлений для интервала глубин 0-200 м (справа). Голубыми линиями показана гидросеть, красным контуром – выделенная аномалия



Рис. 6
Керн разведочного бурения аэрогеофизической аномалии

контуром). Глубина верхней кромки магнитного объекта порядка 100 м, а нижней не менее 700–800 м. Возможная природа – крутопадающая дифференцированная интрузия пород основного состава даечного типа, размеры в плане 300 x 1800 м.

В 2018 г. разведочным бурением на 98 м был вскрыт объект с повышенным содержанием Cu, Ni, Ag, Au (рис. 6).

Пример выделения линейных аномальных зон в пределах сильнодислоцированных сложенных черносланцевыми толщами флишевых формаций протерозоя.

Площадь была выделена по результатам съемки масштаба 1:50000 благодаря интенсивным линейным магнитным аномалиям и узким линейным зонам как высокого, так и низкого сопротивления.

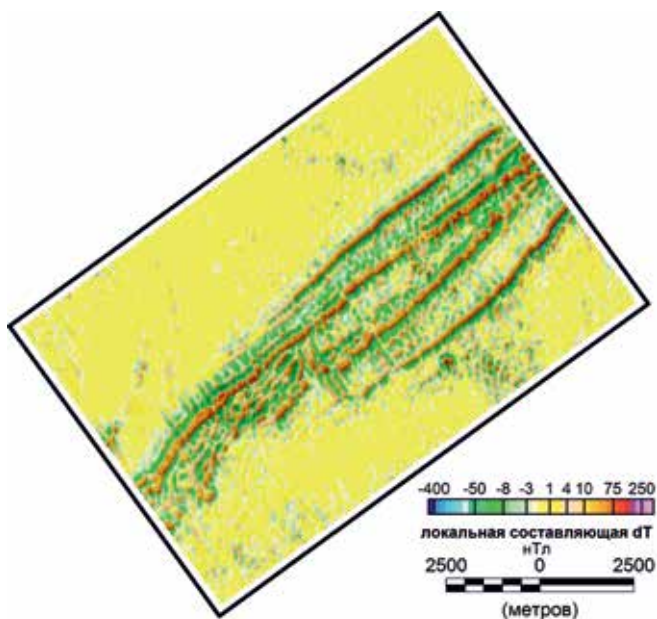


Рис. 7
Участок 14. Карта локальной составляющей аномального магнитного поля

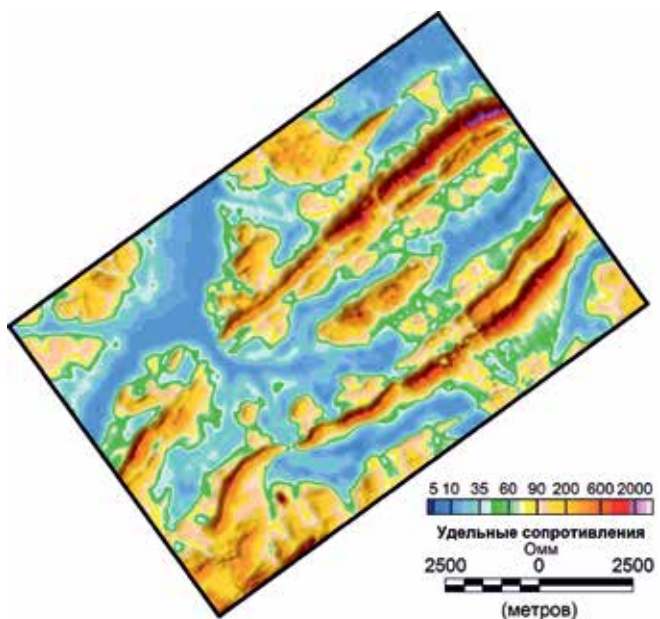


Рис. 8
Участок 14. Карта кажущихся сопротивлений для интервала 0–200 м

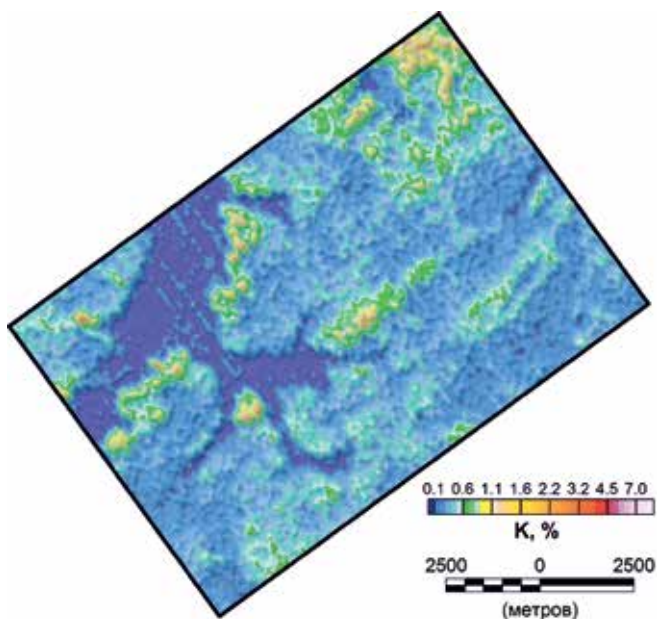


Рис. 9
Участок 14. Карта концентраций калия

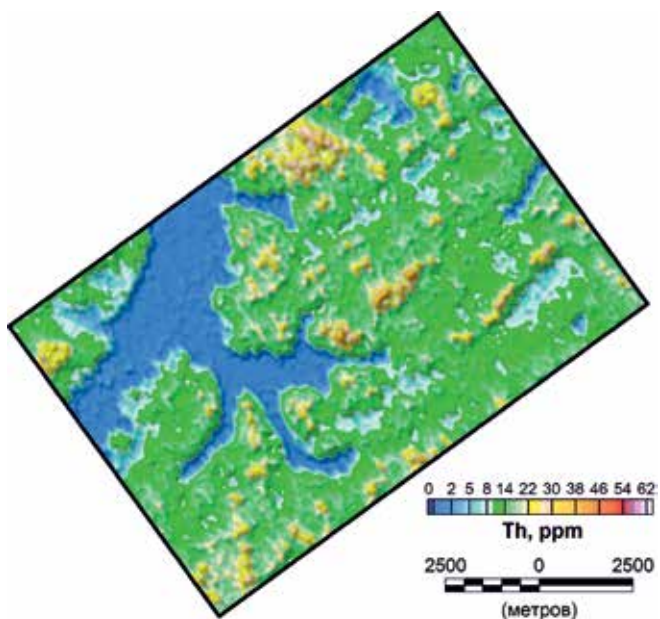


Рис. 10
Участок 14. Карта концентраций тория

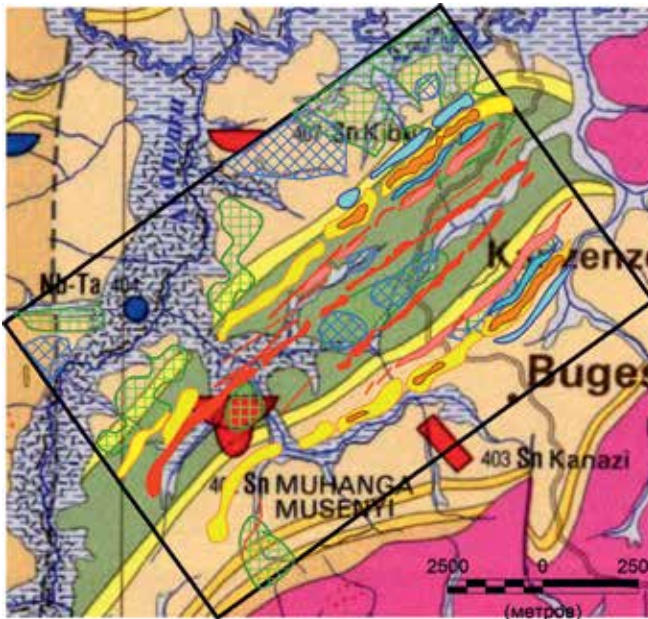


Рис. 11
Участок 14. Выделенные линейные аномальные зоны
на геологической основе

Условные обозначения

-  Оси положительных линейных локальных магнитных аномалий
-  Немагнитные линейные зоны повышенных сопротивлений (вероятно, области интенсивного окварцевания)
-  Линейные зоны повышенных сопротивлений (вероятно, кварцевые жилы)
-  Положительно намагнитненные объекты со средними сопротивлениями
-  Положительно намагнитненные объекты с пониженными сопротивлениями
-  Линейные зоны повышенной электропроводности
-  Области повышенных концентраций калия
-  Области повышенных концентраций тория

Указанные линеаменты находятся как на крыльях, так и в осевой части сложнодислоцированной антиклинальной складки, сложенной метаморфизованными сланцами. Результаты детализации масштаба 1:10000 представлены на рис. 7–11.

В результате комплексной интерпретации электроразведочных, магнитных и гамма-спектрометрических данных выделены те аномальные объекты, которые, по нашему мнению, связаны с реальными геологическими телами. Они вынесены на геологическую карту и представлены на рис. 11.

Таким образом, детально откартированы интенсивные линейные положительно намагнитненные тела. Средняя интенсивность аномалий 500–800 нТл, в отдельных экстремальных точках она достигает более 1200 нТл; по расчетам в этих точках магнитные тела близки к поверхности. Эти тела пересекают водотоки, проходят по их склонам и локальным водоразделам, но не отражены на геологических

картах. По всем признакам тела не выходят на дневную поверхность, а, скорее всего, перекрыты отложениями типа кор выветривания мощностью 150–200 м. По электрическим свойствам тела не контрастны.

Субпараллельно интенсивным магнитным аномалиям находятся линейные магнитные объекты интенсивностью порядка 250–480 нТл, отрицательно намагнитненные на севере и положительно – на юге. Магнитные объекты сопровождаются аномалиями сопротивления порядка 250–450 Ом·м. Описываемые тела также не выходят на дневную поверхность.

Линейные немагнитные высокоомные тела (500–1800 Ом·м) мы связываем с кварцитами. Аномально высокие сопротивления в их пределах можно трактовать как возрастание доли кварца в их составе или присутствие кварцевых жил.

Проводящая зона на юге сопровождается узкой линейной положительной магнитной аномалией (100–150 нТл). Объяснить природу проводящей зоны наличием углистых сланцев не позволяют магнитные аномалии. С другой стороны, низкое сопротивление не свойственно кварц-магнетитовым жилам. По нашему мнению, возможной причиной повышенной проводимости является сульфидная минерализация в приконтактной зоне либо наличие вертикальных кор выветривания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Аэрогеофизический комплекс «Экватор» одновременно выполняет электромагнитные зондирования, регистрацию значений геомагнитного поля и гамма-спектрометрические измерения.

Конструкция комплекса обеспечивает выполнение кондиционных измерений в условиях очень сложного горного рельефа при высоте полета авианосителя 100 м, соблюдая требования технических инструкций к съемкам 1:10000 и 1:5000 масштаба.

Высокая производительность комплекса (10000 п. км за месяц), простота и легкость конструкции делают рентабельными съемки маленьких участков (100 км² и менее).

Высокая чувствительность сенсоров системы, стабильные условия измерений, высокая плотность наблюдений и минимальная высота полета обеспечивают надежное картирование контрастных аномальных объектов с горизонтальной мощностью менее метра.

Для решения золоторудных задач комплекс «Экватор» способен надежно выделять и картировать в интервале глубин 0–400 м следующие геологические объекты:

- массивы гранитоидов, определять их типы и радиогеохимическую специализацию, фиксировать приконтактные изменения, связанные с процессами серицитизации и лиственитизации;
- зоны окварцевания, кварцевые и адуляр-кварцевые жилы, выделять сопровождающие их зоны лиственитизации и сульфидизации;
- углеродистые (черносланцевые) толщи, фиксировать в их пределах области окварцевания и сульфидизации;

- дайки различного состава (риолитового, диоритового, диорит-порфирового, андезитового, габбрового и т.д.);
 - зоны дробления и тектонические нарушения различного порядка;
 - коры выветривания и области повышенной мощности рыхлых отложений (возможные россыпи) в пределах современных водотоков и палеодолин;
 - различные типы вмещающих пород.
- Мировой опыт открытия гигантских месторождений (Kidd Creek [Cu-Zn], Канада [Bleeker и Parrish, 1996], Olympic Dam [Cu-U-Au-Ag-REE], Австралия [Roberts и Hudson, 1983]) показывает, что за этапом

высокоточной аэрогеофизической съемки следуют значительные объемы геолого-геофизических и горно-буровых работ.

Благодарность

Авторы выражают глубочайшую признательность коллективу компании «Геотехнологии», выполняющему геофизические работы в Республике Руанда, данные которых приведены в этой статье, компании «Нгали Холдингс» за возможность публикации указанных материалов, а также Е.В. Каршакову и А.К. Волковичкову за ценные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаянц П.С., Керцман В.М., Левин Ф.Д., Трусов А.А. Особенности современной аэрогамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. 2015. № 12. С. 10–16.
2. Долгаль А.С., Христенко Л.А. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках рудного золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2008. № 2. С. 57–69.
3. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политех. ун-та. 2014. № 324. С. 80–86.
4. Константинов М.М. Золоторудные месторождения России. М.: Акварель, 2010. 349 с.
5. Приходько А.Ю. Условия формирования золоторудных месторождений по геофизическим данным. Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые: тезисы докладов Международной геофизической конференции. СПб., 2–6 октября, 2006. СПб.: ООО «Издательство Welcome», 2006. С. 284–285.
6. Татьков И.Г. Физико-геологические модели основных типов золоторудных месторождений юга Восточной Сибири: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2015. 23 с.
7. Becker A., Barringer A.R., Annan A.P. 1987. Airborne electromagnetics 1978–1988, in Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys, D.V. Fitterman (ed.). United States Geological Survey Bulletin, 1925. P. 9–20.
8. Bleeker W., Parrish R.R. 1996. Stratigraphy and U – Pb zircon geochronology of Kidd Creek: implications for the formation of giant volcanogenic massive sulphide deposits and the tectonic history of the Abitibi greenstone belt. Canadian Journal of Earth Sciences, 33(8), 1213–1231.
9. Collett L.S. 1986. Development of the airborne electromagnetic techniques, in Airborne Resistivity Mapping. Geological Survey of Canada Paper, 86, 9–18.

10. Grasty R.L., Minty B.R.S. A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys: Australian Geological Survey Organisation, Canberra. 1995. 90 p.
11. Hodges G. 2013. The power of frequency domain: When you should be using it. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa. 5 p.
12. Kaufman A.A., Alekseev D.A., Oristaglio M. 2014. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, Elsevier, 45, 469 p.
13. Podmogov Yu.G., Moilanen J., Kertsman V.M. 2019. Results of the Complex Airborne Geophysical Survey in the Central African Ridge Area / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham, Switzerland: Springer, p. 387–394.
14. Macnae J., Baron-Hay S. 2010. Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. Proceedings of ASEG, 4 p.
15. Pavlov B.V., Volkovitsky A.K., Karshakov E.V. 2010. Low Frequency Electromagnetic System of Relative Navigation and Orientation. Gyroscopy and Navigation, 1, № 3, 201–208.
16. Roberts D.E. and Hudson G.R.T. 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit: Roxby Downs, South Australia, Econ. Geol., 78, 799–822.
17. Smith R.S. 2001. On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data: some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors. Geophysical Prospecting, 49, 405–416.
18. Volkovitsky A., Karshakov E., 2013. Airborne EM systems variety: What is the difference? Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa. 4 p.

REFERENCES

1. Babayants P.S., Kertsman V.M., Levin F.D., Trusov A.A. Specialities of modern airborne gamma-ray spectrometry. *Razvedka i ohrana nedr.* 2015; (12): 10–16 (in Russian).
2. Dolgal A.S., Khristenko L.A. Results and perspectives of geophysical survey for gold ore in eastern part of Kuznetsk Alatau. *Vestnik KRAUNC, Earth science.* 2008; (2): 57–69 (in Russian).
3. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geology-geophysical conditions on gold ore fields of Siberia. *Izvestia of Tomsk Polytech. university.* 2014; (324): 80–86 (in Russian).
4. Konstantinov M.M. Gold ore deposits of Russia: Moscow: Akvarel, 2010. 349 p. (in Russian).

5. Prikhodko A.Yu. Conditions of gold ore deposits formation based on geophysical data: Geophysical survey, thesis of International geophysical conference. – Saint Petersburg., 2–6 October 2006. Saint Petersburg: Welcome Publishing. 2006. P. 284–285 (in Russian).
6. Tatkov I.G. Physic-geology models of base types of gold ore deposits of south-eastern Siberia. *Geology Ph.D. thesis.* Irkutsk University, 2015. 23 p. (in Russian).
7. Becker A, Barringer A.R., Annan A.P. 1987. Airborne electromagnetics 1978–1988, in Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys, D.V. Fitterman (ed.). *United States Geological Survey Bulletin*, 1925, 9–20.

8. *Bleeker W, Parrish RR.* Stratigraphy and U – Pb zircon geochronology of Kidd Creek: implications for the formation of giant volcanogenic massive sulphide deposits and the tectonic history of the Abitibi greenstone belt. *Canadian Journal of Earth Sciences.* 1996; 33(8): 1213–1231.

9. *Collett LS.* Development of the airborne electromagnetic techniques, in Airborne Resistivity Mapping. *Geological Survey of Canada Paper.* 1986; (86): 9–18.

10. *Grasty RL, Minty BRS.* A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys: Australian Geological Survey Organisation, Canberra, 1995. 90 p.

11. *Hodges G.* The power of frequency domain: When you should be using it. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa. 2013. 5 p.

12. *Kaufman AA, Alekseev DA, Oristaglio M.* Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, Elsevier, 2014, 45, 469 p.

13. *Podmogov YuG, Moilanen J, Kertsman VM.* Results of the Complex Airborne Geophysical Survey in the Central African Ridge Area. *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields.* Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham, Switzerland: Springer, 2019, p. 387–394.

14. *Macnae J, Baron-Hay S.* Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. *Proceedings of ASEG*, 2010, 4 p.

15. *Pavlov BV, Volkovitsky AK, Karshakov EV.* Low Frequency Electromagnetic System of Relative Navigation and Orientation. *Gyroscopy and Navigation.* 2010; 1(3): 201–208.

16. *Roberts DE and Hudson GRT.* The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit: Roxby Downs, South Australia. *Econ. Geol.* 1983; (78): 799–822.

17. *Smith RS.* On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data: some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors. *Geophysical Prospecting.* 2001; (49): 405–416.

18. *Volkovitsky A, Karshakov E.* 2013. Airborne EM systems variety: What is the difference? Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa. 4 p.

Положительная рецензия от 21.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



КЕРЦМАН

Владимир Менделевич

Преподаватель кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ им. М.В. Ломоносова. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Ликвидатор последствий аварии на ЧАЭС 1986 г. Специалист в области геофизики, геологии. Автор более 50 научных работ.



МОЙЛАНЕН

Евгений Викторович

Научный сотрудник ИПУ РАН. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова. Специалист в области аэрогеофизических технологий. Автор 30 научных работ.



ПОДМОГОВ

Юрий Геннадиевич

Главный геофизик компании «Гео-технологии». Окончил Уральский государственный горный университет. Специалист в области геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых. Автор 30 научных работ.

УДК 550.8.053

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

К.М. Ермохин¹

¹ СПбФ ИЗМИРАН. 194354, Россия, г. Санкт-Петербург, Менделеевская линия, д. 3; e-mail: k_m_e@list.ru

Аннотация. В статье предлагается решение обратной задачи теории магнитного потенциала Земли для осесимметричного случая, что служит предпосылкой для получения общего решения обратной 3D-задачи теории магнитного потенциала Земли.

Ключевые слова. Внутренняя структура магнитного поля Земли, аналитическое продолжение, физический диполь.

METHOD FOR DETERMINING THE STRUCTURE OF THE EARTH'S INTERNAL MAGNETIC FIELD

K.M. Ermokhin¹

¹ SPbF IZMIRAN. Mendeleev line 3, Saint Petersburg, Russia, 194354; e-mail: k_m_e@list.ru

Abstract. The article proposes a solution to the inverse problem of the theory of the magnetic potential of the Earth for an axisymmetric case, which is a prerequisite for obtaining a general solution of the inverse 3D problem of the theory of the magnetic potential of the Earth.

Key words. Internal structure of the Earth's magnetic field, analytical continuation, physical dipole.

ВВЕДЕНИЕ. Задача определения внутренней структуры магнитного поля Земли является важной фундаментальной проблемой. Ее решение позволит приблизиться к пониманию природы этого поля, его источников. Из множества гипотез о его происхождении [5] можно будет выделить наиболее вероятные.

Попытки решения этой задачи предпринимались многими геофизиками (см., например, [4]). Но сводились они, как правило, к подбору дипольных источников внутри Земли, аппроксимирующих наблюдаемое на поверхности поле. Этот путь не представляется перспективным, поскольку:

1. В качестве источников использовались абстрактные математические диполи (с нулевой длиной), тогда как в Земле источники носят объемный характер (а именно физические диполи, т.е. разнесенные на реальное расстояние магнитные массы противоположного знака).

2. Метод последовательного подбора (по величине момента) не дает однозначного решения задачи ввиду отсутствия ортогональности полей различных диполей на поверхности Земли и неопределенности их положения, т.е. имеет место зависимость результата от последовательности выбора подбираемых источников.

В качестве первого шага к корректному решению проблемы рассмотрим осесимметричное распределение магнитных масс для реального физического диполя.

Постановка задачи: определить магнитное поле внутри сферы на основании его измерений на поверхности при осесимметричном распределении источников.

Решение.

Поскольку предлагаемое решение носит концептуальный характер, примем радиус Земли равным 1, а магнитные заряды и потенциал будем измерять в условных единицах.

Потенциал единичного точечного источника находящегося на оси SN шара в точке с координатой z по оси ON на удалении от центра r (точка p):

$$U(r, z) = 1 / \sqrt{r^2 - 2rz \cos(a) + z^2}.$$

Рассмотрим разложение потенциала $U(r, z)$ в ряд по полиномам Лежандра (модель Гаусса) [6]:

$$U(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos(a)) \left(\frac{z}{r}\right)^n. \quad (1)$$

При $\cos(a) = 1$ (на радиусе шара ON):

$$U(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{r}\right)^n.$$

При $r > z$ ряд сходится:

$$U(r, z) = \frac{r}{r - z}.$$

Магнитное поле порождается, как известно, магнитными массами противоположного знака равной величины, разнесенными на некоторое расстояние (физический диполь).

Беря два одинаковых заряда (+m и -m) с разными знаками в точках на оси z z1 и z2 (z1 > z2), формально получим:

$$U_d(r, z1, z2) = m \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z1}{r}\right)^n - m \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z2}{r}\right)^n = \\ = m \left(\frac{r}{r - z1} - \frac{r}{r - z2} \right). \quad (2)$$

Суммирование при этом чисто формальное: в области $r > z1$ оба ряда (2) сходятся, при $r < z2$ – расходятся, при $z2 < r < z1$ – один сходится, другой расходится (как геометрические прогрессии со знаменателем меньше и больше единицы).

На поверхности шара имеем ряд:

$$U_d(R, z1, z2) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n(\cos(a)) \frac{z1^n - z2^n}{R^n}.$$

При достаточном количестве значений потенциала на поверхности шара при различных значениях угла (a) однозначно определяются коэффициенты $(z1^n - z2^n)/R^n$ методом наименьших квадратов.

Теперь рассмотрим выражение $U_d(r, z)$ в виде ряда на оси ON:

$$U_d(r, z1, z2) = m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z1^n - z2^n}{r^n} \quad (3)$$

и назовем функцию $m \left(\frac{r}{r-z1} - \frac{r}{r-z2} \right)$ индикатрисой, которая согласно определению есть «линия или поверхность, наглядно характеризующая какое-нибудь свойство изучаемого объекта» [1] (в данном случае отражает особенности потенциала на оси ON). Данная индикатриса показывает наличие двух полюсов первого порядка в точках $z1$ и $z2$ и их знаки.

Без потери общности положим $R = 1$ (соответственно, $(z2, z1, r) < 1$). На поверхности сферы имеем:

$$U_d(z1, z2) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n(\cos(a))(z1^n - z2^n).$$

В качестве модели возьмем физический диполь с единичным моментом (DP). Один его полюс расположим в точке 0,4, другой в точке 0,6 (рис. 1) с магнитными зарядами $m = \pm 5$ у.е., при этом используем ряд (3), ограничившись 23 коэффициентами (как в системе IGRF), полученными по значениям потенциала на поверхности путем интегрирования.

Неизвестными, подлежащими определению, являются в данном примере коэффициенты $(z1^n - z2^n)$ при полиномах Лежандра.

Положение центра диполя на рис. 2 легко определяется (по переходу через нуль в 60° от полюса N). Однако истинное положение полюсов DP, а тем более величину их заряда так просто определить невозможно.

Рассмотрим теперь аналитическое продолжение ряда (3) посредством преобразования его в цепную дробь методом Висковатова [7], примененным нами ранее [2, 3].

$$U_d(r, z1, z2) = \frac{a1/r}{1 + \frac{a2/r}{1 + \frac{a3/r}{1 + \dots}}} \quad (5)$$

где коэффициенты $a1, a2 \dots$ цепной дроби (5) определяются однозначно по коэффициентам ряда (3). Причем для рассматриваемого осесимметричного случая дробь (5), в отличие от ряда (3), оказывается конечной.

Рис. 3 говорит о совпадении индикатрисы и аналитического продолжения ряда (3) цепной дробью.

В качестве индикатрисы можно взять и ее производную по r :

$$m \left[\frac{-z1}{(r-z1)^2} + \frac{z2}{(r-z2)^2} \right]$$

(т.е. радиальную составляющую) и, соответственно, преобразовать формальную производную ряда (2):

$$\frac{d}{dr} U_d(r, z1, z2) = -m \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{z1^n - z2^n}{r^{n+1}} \quad (6)$$

в цепную дробь. Это еще более наглядно позволяет локализовать источники поля и их знаки.

Различие амплитуды полюсов на рисунках объясняется наличием в числителях индикатрис множителем r (рис. 3) или $z1$ и $z2$ (рис. 4). Но для опре-

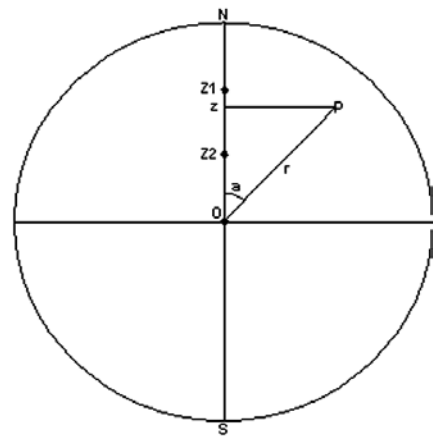


Рис. 1

Обозначения для формулы расчета потенциала

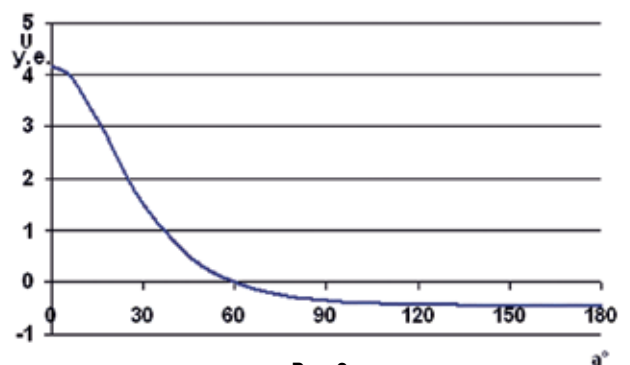


Рис. 2

График потенциала физического диполя DP по дуге окружности NS (рис. 1)

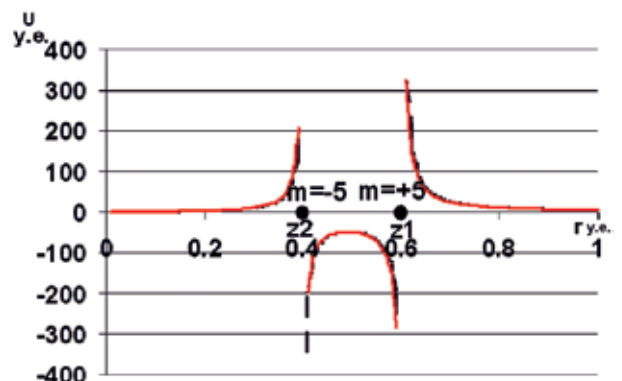


Рис. 3

График индикатрисы вдоль радиуса ON (черный пиксель) и значений цепной дроби Висковатова (красная линия)

деления истинной мощности источников методом наименьших квадратов это не имеет значения, поскольку для этого достаточно знать только их местоположение.

Таким образом, с помощью цепной дроби определены истинные положения полюсов DP. Последующее определение величины заряда m по значениям функции $U_d(R, z1, z2)$ на поверхности шара делается элементарно методом наименьших квадратов (при достаточном количестве значений на поверхности) путем решения системы линейных уравнений, поскольку положение источников и даже их знаки известны (рис. 5).

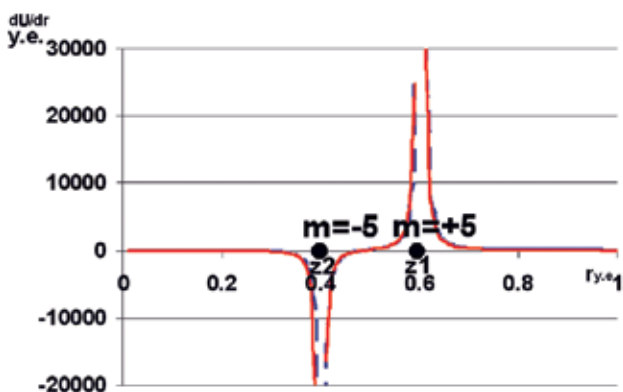


Рис. 4

График производной индикатрисы вдоль радиуса ON (черный пунктир) и значений формальной производной ряда (5), преобразованной в цепную дробь Висковатова (красная линия)

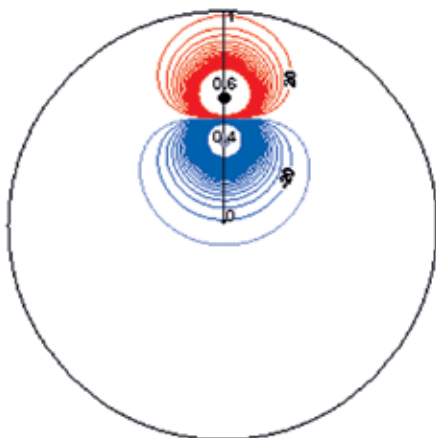


Рис. 5

Изолинии потенциала физического диполя (DP) (у.е.) (синие – отрицательные, красные – положительные) на основе значений на поверхности сферы после определения положения источников посредством цепной дроби, с последующим расчетом его внутри сферы на основе метода наименьших квадратов

Как видно, можно продолжать цепную дробью не сам потенциал или поле на поверхности сферы, а ряды, полученные из него, имеющие в качестве формальных сумм их индикатрисы, что не мешает полностью решить задачу локализации и определения величины источников, т.е. строение внутреннего магнитного поля Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Решение обратной задачи теории магнитного потенциала Земли принципиально возможно на основе применения аналитического продолжения ряда Гаусса цепной дробью Висковатова.

Вопрос о том, достаточно ли данных измерений IGRF (коэффициенты Гаусса до 23-го порядка) для полного решения проблемы в 3D-постановке предложенным методом, нуждается в дальнейшем исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большая советская энциклопедия. М., 1969—1978.
2. Ермохин К.М. Технология построения разрезов методом аналитического продолжения геофизических полей // Геоинформатика. 2010. № 2. С. 51–60.
3. Ермохин К.М. Аналитическое продолжение гравимагнитных полей через массы. Докл. АН, 2017. Т. 476. С. 104–107.
4. Ладынин А.В., Попова А.А. Оптимизационный подбор параметров эксцентричного диполя путем сравнения модельных полей с магнитным полем Земли. Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 266–278.
5. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Изд. Ленинградского ун-та, 1978. 591 с.
6. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. М.: Наука, 1979. 415 с.
7. Viskovatov B. De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantitees en fraction continues. Memoires de l'Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg, № 1, 1805, p. 226–247.

REFERENCES

1. Bolshaia Sovetskaia Enciklopedia. [Great Soviet Encyclopedia] Moscow, 1969–1978 (in Russian).
2. Ermokhin KM. Tekhnologia postroyeniya razrezov metodom analititseskogo prodoljeniya geofizitseskikh poley. [Technology of construction of sections by the method of analytical continuation of geophysical fields] *Geoinformatics*. 2010; (2): 51–60 (in Russian).
3. Ermokhin KM. Analititseskoe prodoljenie gravimagnitnykh poley tcherez massi. [Analytical continuation of gravimagnetic fields through the masses] Report AN, 2017. V. 476. P. 104–107 (in Russian).
4. Ladynin AV, Popov AA. Optimizatsionniy podbor parametrov ekscentritchnogo dipolia putem sravneniya magnitnykh poley s magnitnim polem Zemli [Optimization selection of parameters of an eccentric dipole by comparing model fields with the Earth's magnetic field]. *Geology and Geophysics*. 2009; 50(3): 266–278 (in Russian).
5. Yanovsky BM. Zemnoy magnetizm. [Terrestrial magnetism] Ed. Leningrad University, 1978. 591 p. (in Russian).
6. Suetin PK. Klassitscheskie ortogonalnie polinomi [Classical orthogonal polynomials]. Moscow: Science, 1979. 415 p. (in Russian).
7. Viskovatov B. De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantitees en fraction continues. Memoires de l'Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg, № 1, 1805, p. 226–247.

Положительная рецензия от 23.08.2019
Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРЕ



ЕРМОХИН
Константин Михайлович
Ведущий научный сотрудник,
доктор технических наук, доцент
СПбФ ИЗМИРАН.

УДК 550.831+550.732

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ

Ю.В. Антонов¹, А.К. Рыбин², В.Е. Матюков²¹ Воронежский государственный университет. 394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1; e-mail: yuriyantov@yandex.ru² Научная станция РАН в г. Бишкеке. 720049, Кыргызстан, Бишкек-49; e-mail: rybin99@yandex.ru, vitaliy_cowboy@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты спектрального анализа неприливых вариаций силы тяжести и магнитотеллурического поля мониторинговых наблюдений в г. Бишкеке (Кыргызстан) за 2015 и 2017 годы. Основные периоды колебаний в интервале 0–10000 мин. совпадают между собой. С собственными колебаниями Земли и Солнца совпадают колебания магнитотеллурического поля. Основными периодами колебаний гравитационного и магнитотеллурического полей являются суточные колебания и в меньшей степени полусуточные.

Ключевые слова. Лунно-солнечные вариации силы тяжести, неприливые вариации силы тяжести, магнитотеллурическое поле.

SPECTRAL ANALYSIS OF NON-TIDAL VARIATIONS OF THE GRAVITATIONAL AND ELECTROMAGNETIC FIELDS

Yu.V. Antonov¹, A.K. Rybin², V.E. Matiukov²¹ Voronezh state University. Russia, 394006, Voronezh, Universitetskaya sq., 1; e-mail: yuriyantov@yandex.ru² Research station of RAS in Bishkek. Kyrgyzstan, Bishkek-49, 720049; e-mail: rybin99@yandex.ru, vitaliy_cowboy@mail.ru

Abstract. The results are indicated of spectral analysis of non-tidal variations of gravity and magnetotelluric field monitoring observations in Bishkek (Kyrgyzstan) for 2015 and 2017 years is presented. The main periods of oscillations in the range 0–10000 min are coincided. With periods of oscillations of the Earth and Sun match the oscillations in the magnetotelluric field. The main periods of oscillations of the gravitational and magnetotelluric fields are daily oscillations and to a lesser extent semi-diurnal.

Key words. Lunar-solar variations of gravity, non-tidal variations of gravity, magnetotelluric fields.

ВВЕДЕНИЕ. Наблюдаемые изменения силы тяжести и электромагнитного поля во времени имеют достаточно сложную структуру и обусловлены различными причинами. Вариации силы тяжести могут быть обусловлены геодинимическими процессами, происходящими в земной коре, землетрясениями, ударами корональных выбросов масс по магнитосфере и метеорных потоков по атмосфере Земли и т.д. Это так называемые неприливые вариации силы тяжести, которые наиболее трудно поддаются расшифровке. Магнитотеллурическое поле образуется большей частью за счет процессов, происходящих на Солнце.

Исходные данные

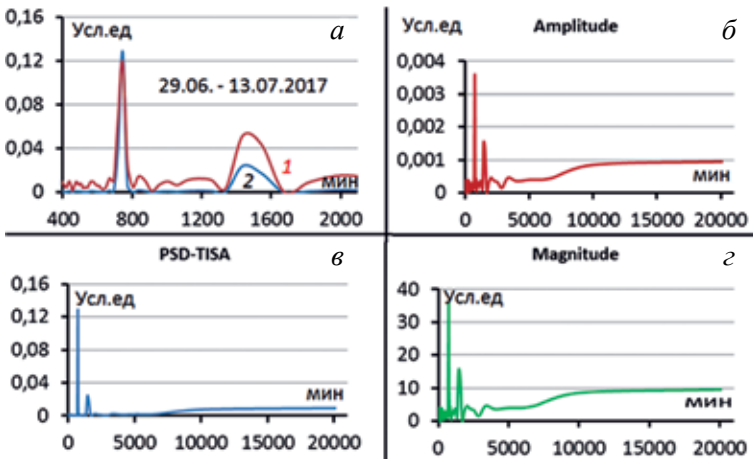
В статье, как и в предыдущих работах авторов [1–7], анализируются мониторинговые наблюдения силы тяжести, выполненные на Бишкекском геодинимическом полигоне РАН (г. Бишкек, Кыргызстан). Измерения силы тяжести проводились гравиметром GC-5 Autograv. Регистрация электромагнитного поля проводилась измерительными комплексами «Феникс MTU-5» в двух пунктах Аксу и Чон-Курчак. Для выявления корреляции силы тяжести и электромагнитного поля был выбран пункт мониторинга Аксу, так как на данном пункте наблюдалось более точное и стабильное определение электромагнитных параметров. В качестве параметра для анализа нами использовалась вертикальная компонента магнитного поля.

Методика обработки измерений

Под неприливыми вариациями силы тяжести будем понимать все изменения силы тяжести, исключая лунно-солнечные вариации силы тяжести, вне зависимости от источника их происхождения. Так что неприливая вариация может служить источником для изучения как внутреннего строения Земли, так и космического пространства вокруг Земли.

При наблюдении вариаций силы тяжести дело с исключением влияния Луны и Солнца обстоит достаточно просто. Современные гравиметры оснащены программным продуктом [19], который позволяет учитывать притяжение Луны и Солнца. Поэтому полученные неприливые вариации силы тяжести в мониторинговых наблюдениях не содержат в себе какой-то неучтенной значимой части лунно-солнечных вариаций. Оставшаяся часть вариаций, после исключения лунно-солнечной части, содержит в себе эффекты влияния от внешних и внутренних источников геодинимической системы Земля – Луна – Солнце.

Вначале остановимся на методике представления результатов спектрального анализа. Рассмотрим различные преобразования спектрального анализа (рис. 1). Амплитудная и магнитудная периодограммы спектральной плотности мощности на графиках практически выглядят одинаково. В итоге можно отметить, что амплитудный спектр наиболее адекватен и практически в большинстве случаев исследователи пользуются им, поэтому далее по тексту под словом спектр имеем в виду амплитудный спектр.



На всех графиках рис. 1 отмечаются два основных периода (750 и 1440 мин), характерные практически для всех рассматриваемых в статье случаев. На рис. 1, а показаны эти периоды для амплитудного спектра и спектральной плотности. Графики практически совпадают.

Результаты трансформаций на рис. 1 даны для отрезка времени, когда не было землетрясений, пульсаций вариаций силы тяжести и была штилевая космическая погода. А как меняются спектры, если не выполняются указанные условия? Начнем с того, что неприливные вариации силы тяжести после исключения лунно-солнечных вариаций осложнены нуль-пунктом (рис. 2, а, кривая 1), который сильно искажает спектр (рис. 2, б, кривая 1). После исключения нуль-пункта неприливная вариация (рис. 2, а, кривая 2) имеет другой вид, и спектр изменяется (рис. 2, б, кривая 2). На рис. 2, в и г (кривые 1) приведены периодограммы для временных интервалов, соответственно (400–2000 мин) и (0–200 мин).

Изменение неприливных вариаций колеблется в пределах $\pm(0,02-0,04)$ мГал. При пульсациях неприливных вариаций силы тяжести [5, 7, 8] амплитуда колебаний увеличивается до $\pm(0,05-0,07)$ мГал, редко достигая $\pm 0,1-0,15$ мГал. На фоне небольших колебаний неприливных вариаций выделяются очень большие по амплитуде значения силы тяжести, которые по интенсивности превышают вариации в десятки раз. Конкретно на рис. 2, а эти выски обусловлены катастрофическим землетрясением

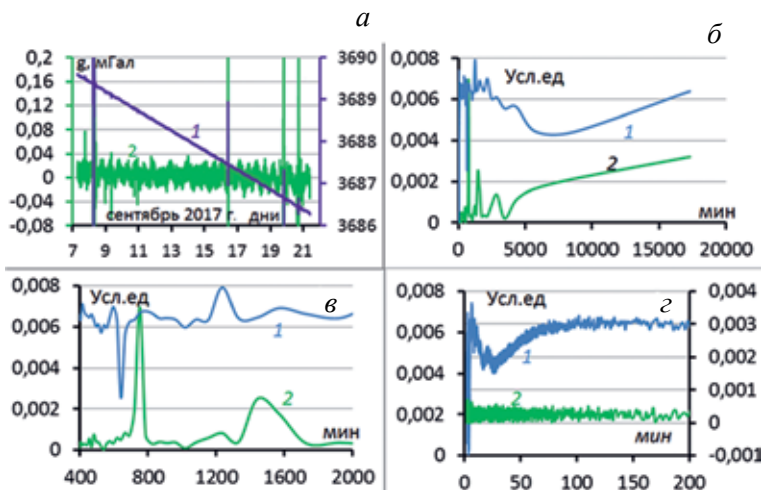


Рис. 1
 Периодограммы амплитудного и магнитудного спектров и спектральной плотности мощности (июнь – июль 2017 г.):
 а – периодограммы амплитудного (1) и СПМ-спектров (2) в интервале 400–1600 мин;
 б – периодограммы амплитудного спектра;
 в – периодограммы спектральной плотности мощности;
 г – периодограммы магнитудного спектра

в Мексике 8 сентября 2017 г. (магнитуда 8,4). На этом же рисунке отмечаются еще три землетрясения меньшей магнитуды, связанные с землетрясениями в Мексике, Кыргызстане и на о. Ява. Землетрясения на фоне колебаний неприливных вариаций в первом приближении представляют собой прямоугольный импульс (рис. 2, а, кривая 2). При спектральном анализе прямоугольного импульса возникают известные боковые помехи, которые по амплитуде намного превосходят «полезные» сигналы и искажают их.

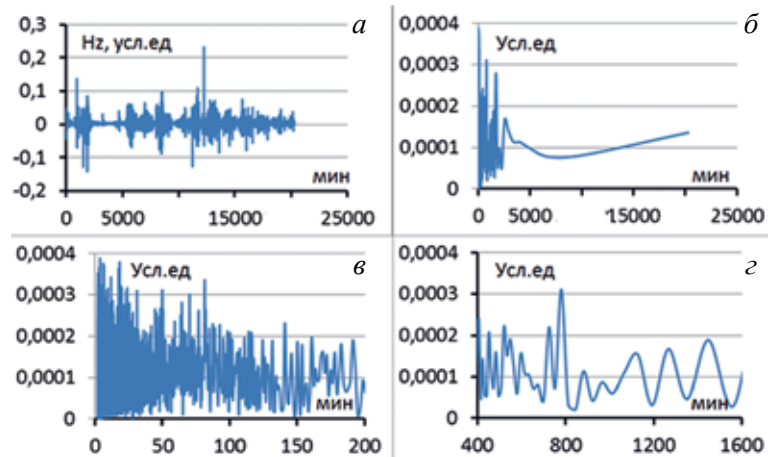
На рис. 2, в (кривая 1) для интервала 400–2000 мин приведены периодограммы для наблюдений, включающих в себя землетрясения (рис. 2, а, кривая 2). Тут же приводятся периодограммы (рис. 2, в, кривая 2) с исключением землетрясений. Периодограммы существенно различаются. Вновь полученная периодограмма (рис. 2, в, кривая 2) совпадает с периодограммой на рис. 1, а. Исключение землетрясений было сделано путем обрезания амплитуды наблюдений: все значения, большие или меньшие $\pm 0,05$ мГал, заменялись значениями $\pm 0,05$ мГал. Это наиболее рациональный путь при обработке. Не менее существенная разница наблюдается при сравнении периодограмм в полосе 0–200 мин при наличии землетрясений (рис. 2, г, кривая 1) и их отсутствии (рис. 2, г, кривая 2).

На рис. 3 приведены данные спектрального анализа электромагнитного поля за тот же период, что и для гравиметрических наблюдений (рис. 2, а). Относительно отдельных выбросов в значениях магни-

Рис. 2
 Периодограммы неприливной вариации силы тяжести до и после исключения данных о землетрясениях
 а – графики неприливной вариации силы тяжести после исключения лунно-солнечного притяжения (кривая 1) и неприливной вариации после исключения сползания нуль-пункта (кривая 2);
 б – периодограммы до (кривая 1) и после исключения (кривая 2) данных о землетрясениях;
 в – те же периодограммы в интервале 400–1600 мин;
 г – те же периодограммы в интервале 0–200 мин

Рис. 3
Периодограммы магнитотеллурического поля (июнь – июль 2017 г.):

a – значения магнитотеллурического поля;
б – периодограмма в интервале 0–20000 мин;
в – периодограмма в интервале 0–200 мин;
г – периодограмма в интервале 400–1600 мин



тотеллурического поля можно сказать то же самое, что о высоках в гравитационном поле. Роль «землетрясений» в электромагнитном поле, вероятно, играют грозовые разряды в атмосфере и быстропротекающие процессы в ионосфере [12]. Полусуточные и суточные периоды в магнитотеллурическом поле тоже выделяются (рис. 3, *г*). Характер изменения частот в полосе 0–200 мин (рис. 3, *в*) такой же, как в поле силы тяжести (рис. 2, *г*, кривая 2).

Обсуждение результатов

Теперь рассмотрим спектры для вариаций силы тяжести и электромагнитного поля, когда наблюдаются пульсации силы тяжести. Во время пульсаций силы тяжести (рис. 4, *в*) амплитуда электромагнитного поля уменьшается (рис. 4, *а*). Уменьшение амплитуды магнитотеллурического поля легко объясняется тем, что пульсации вызваны метеорными потоками, а метеорные потоки являются фильтром для прохождения потока заряженных частиц света к Земле [8–10].

Как видим на рис. 4, *б* и *г*, периодограммы гравитационного и электромагнитного полей внешне совпадают между собой. На рис. 5 приведены для того времени периодограммы в полосе 0–200 и 400–1600 мин. Очень четко выделяются суточные и полусуточные периоды для гравитационного и магнитотеллурического полей. Можно предложить еще одно объяснение, что суточный и полусуточный периоды объясняются деформацией

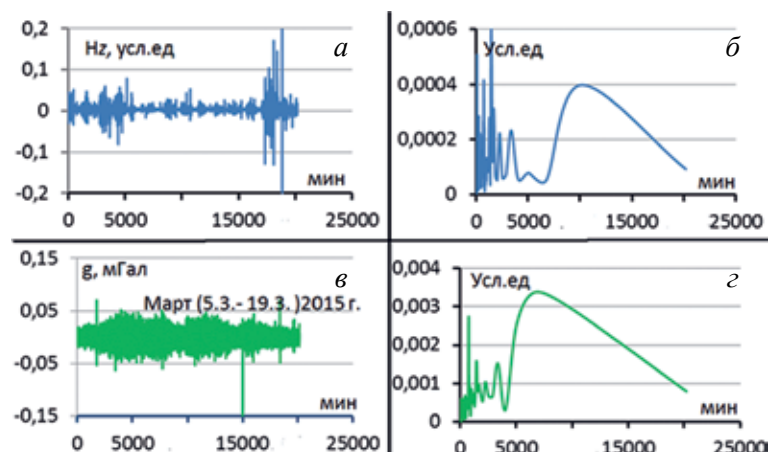
атмосферы, хотя метеорологи всегда считают влияние атмосферы пренебрежимо малым [13, 14]. Что же касается периодов, связанных с магнитотеллурическим полем, то давно известно, что вариации поля имеют суточный период, а полусуточный период имеет сезонную зависимость.

В интервале 0–200 мин выделяются периоды различных значений. Амплитуда частот с увеличением частоты увеличивается. Следует отметить, что высокочастотную часть спектра составляют периоды до 15–20 мин, что соответствует данным по атмосферным колебаниям [13, 14]. Далее можно отметить очень четкое выделение по электромагнитным данным периода 60 мин (рис. 5, *в*), являющимся основным маркером для собственных колебаний Земли [18].

Можно также отметить выделение периодов с длительностью 108, 150 и 175 мин. Все они связаны с собственными колебаниями Земли [15, 17]. Такие же соотношения между магнитотеллурическими и гравитационными периодами в это же время отмечаются в 2017 г. (рис. 6). В целом же основные периоды колебаний, характерные для Земли, имеют место во всей Солнечной системе [11]. На спектрах вариаций четко выделяются периоды 107, 147, 171, 273 и 349 мин. Кстати, в [11] выделяются собственные колебания Солнца с периодом 105, 149 и 171 мин. Какие колебания (Солнца или Земли) являются первичными, не ясно. На рис. 7, 8 за 2015 и 2017 гг. приведены наблюдения электромагнитного поля

Рис. 4
Сравнение периодограмм магнитотеллурического поля и неупругой вариации силы тяжести 5–19 марта 2015 г.:

a – график значений магнитотеллурического поля;
б – график спектра магнитотеллурического поля;
в – график неупругой вариации силы тяжести;
г – график спектра неупругой вариации силы тяжести



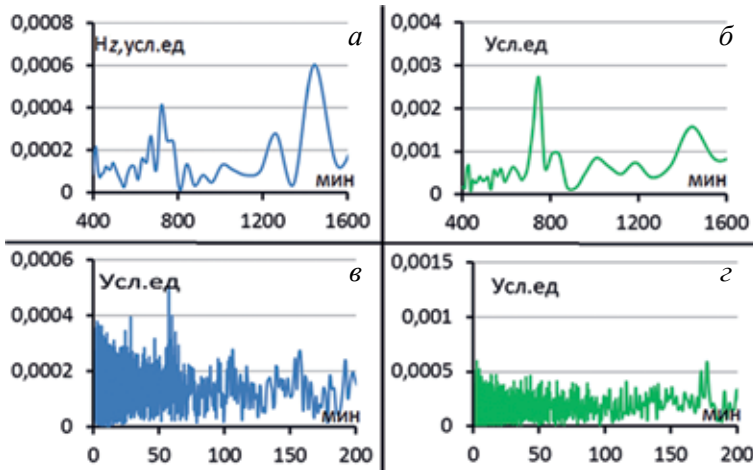


Рис. 5
Сравнение периодограмм магнитотеллурического поля и неприливной вариации силы тяжести 5-19 марта 2015 г.:
а – периодограмма магнитотеллурического поля в интервале 400–1600 мин;
б – периодограмма неприливной вариации силы тяжести в интервале 400–1600 мин;
в – периодограмма магнитотеллурического поля в интервале 0–200 мин;
г – периодограмма неприливной вариации силы тяжести в интервале 0–200 мин

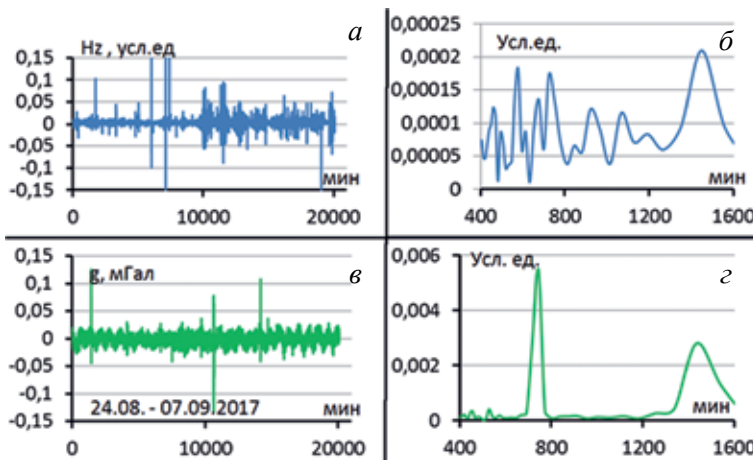


Рис. 6
Сравнение периодограмм магнитотеллурического поля и неприливной вариации силы тяжести 9-23 марта 2017 г. в интервале 400–1600 мин:
а – значения магнитотеллурического поля;
б – периодограмма магнитотеллурического поля;
в – значения неприливной вариации силы тяжести;
г – периодограмма неприливной вариации силы тяжести

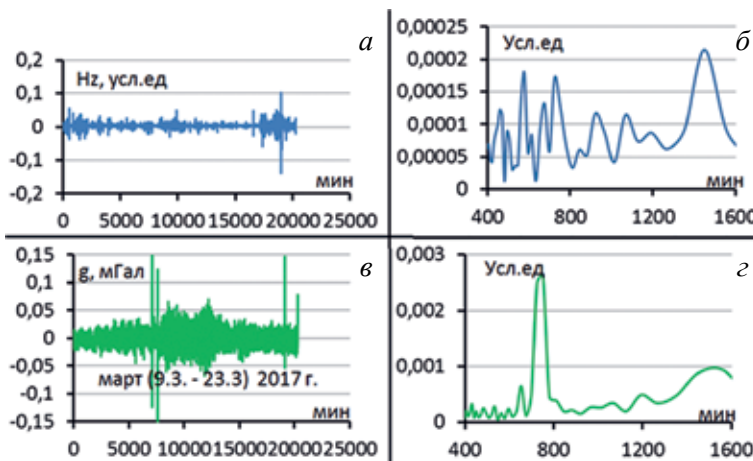


Рис. 7
Сравнение спектров магнитотеллурического поля и неприливной вариации силы тяжести 20 августа – 3 сентября 2015 г.:
а – значения магнитотеллурического поля;
б – периодограмма магнитотеллурического поля в интервале 400–1600 мин;
в – неприливая вариация силы тяжести;
г – периодограмма неприливной вариации силы тяжести в интервале 400–1600 мин

и неприливных вариаций силы тяжести и их периодограммы в интервале 400–1600 мин. Периодограммы не только в этом интервале, но на остальной части совпадают между собой.

Неприливное вариации силы тяжести минимальны. Это конец августа – начало сентября, и если не случается землетрясений, то это самое спокойное время. Магнитотеллурическое поле тоже относительно спокойно, но есть одна особенность. В конце августа 2017 г. наблюдается уменьшение амплитуды магнитотеллурического сигнала, как во время пульсаций в марте 2015–2017 гг. (рис. 4, *в* и рис. 6, *в*). Но в это время метеорного дождя и, соответственно, пульсаций силы тяжести не наблюдалось. Можно

предположить, что метеорный поток прошел между Землей и Солнцем, не задев атмосферу Земли. Ежегодно с 17 июля по 24 августа наша планета проходит сквозь пыль и обломки, оставленные кометой Свифта – Туттля. Пыль и метеоры, которые оторвались от кометы, видимо, задержали какую-то часть корпускулярного потока, летящего на Землю. Но по спутниковым данным в конце августа происходили солнечные вспышки мощностью более класса M и, соответственно, магнитные бури класса G2. А вот в начале сентября не было ни магнитных бурь, ни солнечных вспышек, а амплитуда магнитотеллурического сигнала в разы больше, чем в конце августа. Причина пока не ясна.

Рис. 8

Сравнение периодограмм магнитотеллурического поля и неприливной вариации силы тяжести 24 августа – 7 сентября 2017 г. в интервале 400–1600 мин

a – значения магнитотеллурического поля;
б – периодограмма магнитотеллурического поля;
в – график неприливной вариации силы тяжести;
г – периодограмма неприливной вариации силы тяжести

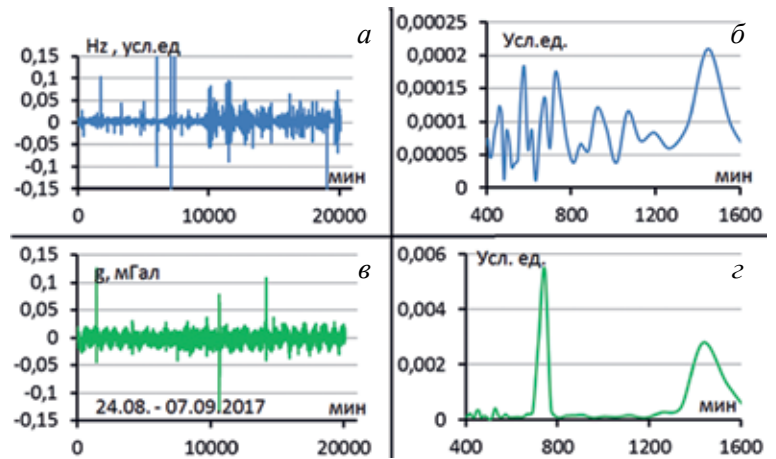
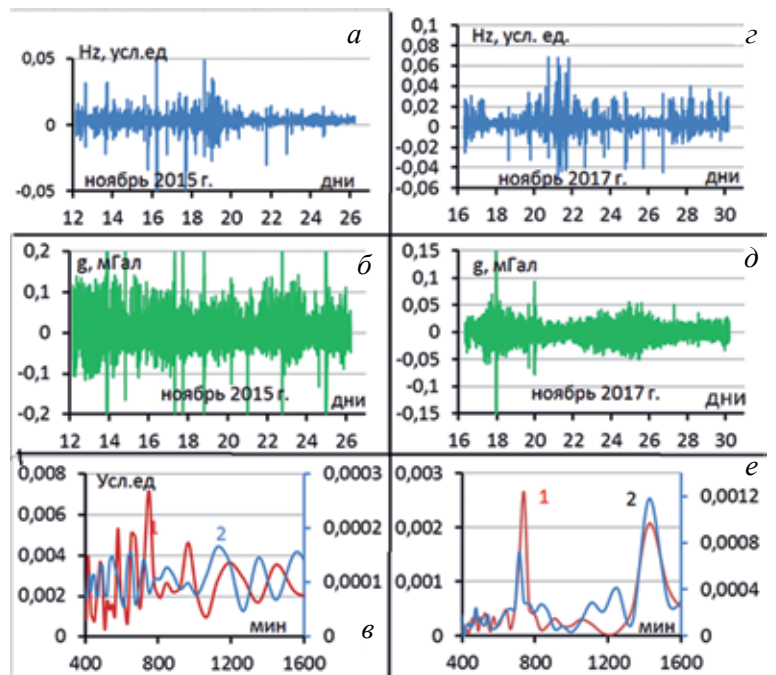


Рис. 9

Графики магнитотеллурического поля и неприливной вариации силы тяжести и их периодограммы в ноябре 2015 и 2017 гг. в интервале 400–1600 мин:

a – значения магнитотеллурического поля;
б – значения неприливной вариации силы тяжести;
в – спектры магнитотеллурического поля (кривая 2) и неприливной вариации силы тяжести (кривая 1);
г – значения магнитотеллурического поля;
д – значения неприливной вариации силы тяжести;
е – периодограммы магнитотеллурического поля (кривая 2) и неприливной вариации силы тяжести (кривая 1)



Теперь посмотрим, что делается с периодограммами, когда вариации силы тяжести имеют аномальное поведение [1]. Особо следует остановиться на результатах за 2015 г. На рис. 9, *a* изменение электромагнитного поля не укладывается в рамки обычного поведения. На рис. 9, *б* приведены графики наблюдений неприливных вариаций силы тяжести. Весь двухнедельный отрезок времени характеризуется пульсацией большей амплитуды, чем за все предыдущие годы. Пульсациям обычно соответствует меньшая амплитуда магнитотеллурического сигнала. На самом деле уменьшенная амплитуда магнитотеллурического сигнала соответствует только второй половине наблюдений. Кстати, второй половине соответствует метеорный поток Леониды. Он проявляется ежегодно и отмечается пульсациями силы тяжести. На рис. 9, *д* в ноябре 2017 г. такая пульсация отмечается.

Таким образом, поведение одной половины графика электромагнитного поля объясняется. А чем можно объяснить поведение второй части?

Очень сильно электромагнитные поля связаны с космическим излучением. Ранее была попытка

объяснить эту связь с импульсами Лоримера [1]. Длительность импульсов составляет несколько миллисекунд, поэтому вряд ли они смогут воздействовать на датчик гравиметра. Скорее всего, эти импульсы являются своеобразным маркером, который контролирует неизвестные проявления космических излучений. Частично это подтверждается тем, что импульсы сопровождаются гамма-вспышками, длительность которых составляет от 2 до 6 сек.

Какова же возможная природа рассмотренных аномальных колебаний неприливных вариаций силы тяжести? Являются ли источники колебаний внутриземными или внешними? Однозначно можно утверждать, что источники колебаний являются внешними. Дело в том, что под действием Солнца и Луны земная кора деформируется в первом приближении с полусуточным периодом, вызывая подъемы и опускания суши. Амплитуды лунно-солнечных вариаций силы тяжести и аномальных колебаний сопоставимы между собой. Тогда, если аномальные колебания являются внутрикоровыми, наложение колебаний друг на друга должно привести к катастрофическим последствиям на поверхности Земли.

Если источник колебаний находится вне Земли, то источником колебаний могут быть всевозможные излучения в космосе. Вероятно, в данном случае имеем дело с «аппаратурной» аномалией, которая возникает за счет действия космического излучения на датчики.

В 2017 г. в тот же временной отрезок (рис. 9, *з*, *д*, *е*) наблюдается совершенно другая картина. Космическая погода штилевая: нет вспышек на Солнце, магнитные бури отсутствуют, магнитотеллурические и неприливные вариации силы тяжести минимальны. Спектры магнитотеллурического и гравитационного полей идентичны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Спектры вариаций магнитотеллурического поля и неприливных вариаций силы

тяжести определяются преимущественно космической погодой. При спокойной космической погоде спектры совпадают между собой полностью. При наличии космической бури, как это было осенью 2015 г., сопоставление практически бессмысленно. Внутриземные процессы также вносят свои коррективы, но искажают спектры неприливных вариаций силы тяжести за счет землетрясений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции РАН, тема 0155-2019-0001 «Изучение глубинного строения Тянь-Шаня и окружающих областей по комплексу геофизических методов для выяснения взаимосвязи переноса вещества-энергии в земной коре и верхней мантии с пространственно-временным распределением сейсмичности».

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В. Аномальные изменения неприливных вариаций силы тяжести // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2017. № 2. С. 70–75.
2. Антонов Ю.В. Разделение неприливных вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения // Вест. ВГУ. Сер.: Геология. 2016. Вып. 2. С. 100–106.
3. Антонов Ю.В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2015. № 1. С. 67–71.
4. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Особенности морфологии неприливных вариаций силы тяжести // Вест. ВГУ. Сер.: Геология. 2014. Вып. 4. С. 129–133.
5. Антонов Ю.В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2014. № 5. С. 54–57.
6. Антонов Ю.В., Рыбин А.К., Матюков В.Е. Возможная природа изменения интенсивности магнитотеллурического поля во время пульсаций неприливных вариаций силы тяжести // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2016. № 2. С. 39–43.
7. Антонов Ю.В., Сизаск И.А. Синхронные пульсации в неприливных вариациях гравитационного и сейсмического полей // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2015. № 5. С. 46–52.
8. Антонов Ю.В. Возможная природа пульсаций неприливных вариаций силы тяжести // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2015. № 4. С. 5–13.
9. Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В. Метеороидные рои: образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // Астрон. вестник. 1991. Т. 25. № 4. С. 387–407.

10. Богачев С.А., Кириченко А.С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 5. С. 3–15.
11. Воронцов С.И., Жарков В.Н. Собственные колебания Солнца и планет-гигантов // УФН. 1981. Т. 134. С. 675–710.
12. Гульельми А.В., Зотов О.Д. Связь электромагнитных волн Pc1 с землетрясениями // Физика Земли. 2011. № 6. С. 28–34.
13. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы // Л.: Гидрометеиздат, 1969. 195 с.
14. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океанов // Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
15. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
16. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 29–40.
17. Собственные колебания Земли. М.: Мир, 1964. 316 с.
18. Benioff H., Press F., Smith S. Excitation of the free oscillations of the Earth by earthquakes // J. Geophys. Res. 1961. V. 66(2). P. 605–619.
19. Longman I.M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun // J. Geophys. Res. 1959. V. 64. № 12. P. 2351–2355.

REFERENCES

1. Antonov YuV. Anomal'nye izmeneniya neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Izv. VUZov. Geol. i razvedka*. 2017; (2); 70–75 (in Russian).
2. Antonov YuV. Razdelenie neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti na osnove spektral'nogo analiza i metoda osredneniya. *Vest. VGU. Ser.: Geologiya*. 2016. Vyp. 2. P. 100–106 (in Russian).
3. Antonov YuV. Struktura i morfologiya neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Geofizika*. 2015; (1): 67–71 (in Russian).
4. Antonov YuV, Antonova IYu. Osobennosti morfologii neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Vest. VGU. Ser.: Geologiya*. 2014. Vyp. 4. P. 129–133 (in Russian).
5. Antonov YuV. Pul'satsii neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Izv. VUZov. Geol. i razvedka*. 2014; (5): 54–57 (in Russian).

6. Antonov YuV, Rybin AK, Matyukov VE. Vozmozhnaya priroda izmeneniya intensivnosti magnitotelluricheskogo polya vo vremya pul'satsiy neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Izv. VUZov. Geol. i razvedka*. 2016; (2): 39–43 (in Russian).
7. Antonov YuV, Sizask IA. Sinkhronnye pul'satsii v neprilivnykh variatsiyakh gravitatsionnogo i seysmicheskogo poley. *Geologiya i razvedka. Izv. VUZov*. 2015; (5): 46–52 (in Russian).
8. Antonov YuV. Vozmozhnaya priroda pul'satsiy neprilivnykh variatsiy sily tyazhesti. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES*. 2015; (4): 5–13 (in Russian).
9. Babadzhanov PB, Obrubov YuV. Meteoroidnye royi: obrazovanie, evolyutsiya, svyaz' s kometami i asteroidami. *Astron. Vestnik*. 1991; 25(4): 387–407 (in Russian).

10. Bogachev SA, Kirichenko AS. Solnechnye vspyshki. *Zemlya i Vselennaya*. 2013; (5): 3–15 (in Russian).
11. Vorontsov SI, Zharkov VN. Sobstvennye kolebaniya Solntsa i planet gigantov. *UFN*. 1981. T. 134. P. 675–710 (in Russian).
12. Gul'yel'mi AV, Zotov OD. Svyaz' elektromagnitnykh voln Pcl s zemletryasenyami. *Fizika Zemli*. 2011; (6): 28–34 (in Russian).
13. Dikiy LA. Teoriya kolebaniy zemnoy atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 195 p. (in Russian).
14. Maksimov IV. Geofizicheskie sily i vody okeanov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 447 p. (in Russian).
15. Mel'khiy P. Zemnye prilivy. Moscow: Mir, 1968. 482 p. (in Russian).
16. Rybin AK, Batalev VYu, Bataleva EA, Matyukov VE. Variatsii elektrosoprotivleniya zemnoy kory po rezul'tatam magnetotelluricheskogo monitoringa seysmoaktivnykh zon Tyan'-Shanya. *Vestnik KRSU*. 2011; 11(4): 29–40 (in Russian).
17. Sobstvennye kolebaniya Zemli. Moscow: Mir, 1964. 316 p. (in Russian).
18. Benioff H, Press F, Smith S. Excitation of the free oscillations of the Earth by earthquakes. *J. Geophys. Res.* 1961; (66): 605–619.
19. Longman IM. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. *J. Geophys. Res.* 1959; 64(12): 2351–2355.

Положительная рецензия от 20.08.2019

Решение редколлегии о публикации от 26.08.2019

ОБ АВТОРАХ



АНТОНОВ
Юрий Васильевич

Профессор кафедры геофизики ВГУ. Окончил в 1962 году Московский геолого-разведочный институт. Направление научных исследований – теория и геологическая интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Автор более 200 научных работ.



РЫБИН
Анатолий Кузьмич

Окончил в 1979 году Московский инженерно-физический институт. Директор, заведующий лабораторией Научной станции РАН в Бишкеке, доктор физико-математических наук. Направление научных исследований – изучение глубинного строения земной коры и современной геодинамики геофизическими методами. Автор более 170 научных работ.



МАТЮКОВ
Виталий Евгеньевич

Окончил в 2004 году Киргизско-Российский славянский университет. Научный сотрудник Научной станции РАН в Бишкеке, кандидат физико-математических наук. Направление научных исследований – изучение строения земной коры и современной геодинамики геофизическими методами. Автор более 60 научных работ.

УДК 550.837

ОПЕРАТИВНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ПОДХОДА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЯХ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ

В.С. Могилатов¹, А.В. Злобинский²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, д. 3; Новосибирский государственный университет. 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2; e-mail: mvecs@ya.ru

² ООО «Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО». 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, д. 26/1, оф. 56; e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

Аннотация. Авторы дополняют предыдущую публикацию, посвященную современному универсальному математическому обеспечению зондирований становлением (ЗС) поля при одномерном подходе. Одномерный подход все еще остается основной методикой интерпретации данных ЗС. Но разумеется, давно уже назрела необходимость неодномерного подхода. Эта проблема в ЗС решается не просто. Прямая трехмерная задача для зондирований становлением является все еще труднодоступной для электро-разведчиков. Это высокотехнологичный математический продукт, требующий весьма квалифицированного обслуживания, обычно даже авторского сопровождения и больших вычислительных ресурсов. Еще большей проблемой является отсутствие общепризнанного подхода к решению трехмерной обратной задачи. В статье развивается подход, который состоит в прямой инверсии (без явного решения прямой задачи) большого количества данных на основе приближенного линейаризованного представления прямой задачи. Такая процедура легко укладывается в рамки томографической инверсии. Нельзя сказать, что такой подход нов. Авторы и сами предлагали это довольно давно. В данной публикации излагаются некоторые новые результаты исследований в этом направлении. Так, например, реализована быстрая процедура решения прямой трехмерной задачи в составе известной системы «Подбор», а также создан пакет программ для трехмерной томографической инверсии данных площадных работ ЗСБ. Линейаризованный томографический подход обещает создание крайне оперативного, общедоступного и легко тиражируемого математического аппарата трехмерной инверсии, что поможет сделать 3D-электроразведку контролируемым стандартным производственным методом.

Ключевые слова. Зондирования становлением, трехмерная прямая задача, трехмерная инверсия, электромагнитная томография, система «Подбор».

OPERATIVE SOFTWARE FOR THE THREE-DIMENSIONAL APPROACH IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD (TEM)

V.S. Mogilatov¹, A.V. Zlobinskiy²

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Koptuyug ave., 3, Novosibirsk, Russia, 630090; Novosibirsk State University. Pirogova str., 2. Novosibirsk, Russia, 630090; e-mail: mvecs@ya.ru

² ZaVeT-GEO ltd. Voskhod str., 26/1, office 56, Novosibirsk, Russia, 630102; e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

Abstract. The authors supplement the previous publication devoted to the one-dimensional universal modern mathematical support of the transient method (TEM). The one-dimensional approach still remains the main technique for interpreting the TEM data. But, of course, the need of multidimensional approach is long overdue. This problem is not simple. The forward three-dimensional problem in TEM is still difficult to access for professionals in electrical prospecting. A bigger problem is the lack of universally accepted approach to solving three-dimensional inverse problem. This article develops the approach, which consists of direct inversion (without an explicit solution of the forward problem) large amounts of data on the basis the approximate linearized representation of the forward problem. Not to say that this approach is new. The authors themselves suggested it a long time ago. This publication presents some new results in this direction. So, for example, implemented operational forward three-dimensional problem in the consisting of the famous system Podbor, and also created a software package for three-dimensional tomographic inversion of the data of areal works by TEM. Linearized tomographic approach promises the creation of extremely operational, public and easily replicable mathematical apparatus of three-dimensional inversion that will help to make 3D electrical exploration the controlled standard production method.

Key words. TEM, 3D modelling, 3D data, tomographic inversion.

ВВЕДЕНИЕ. Авторы ранее уже приложили много усилий для создания математического обеспечения электромагнитных зондирований становлением поля (ЗС). Сошлемся здесь на широко применяемую с начала 1990-х годов систему интерпретации для зондирований в ближней зоне (ЗСБ) – систему «Подбор» [3]. Новое универсальное обеспечение в случае слоистых (одномерных) сред для широкого круга методик ЗС представлено в недавней работе [4]. Между тем давно уже назрела необходимость неодномерного подхода при интерпретации данных ЗС. Прямая трехмерная задача для электромагнит-

ных зондирований становлением поля является все еще малодоступной для широкого круга геоэлектриков. Это высокотехнологичный математический продукт, требующий весьма квалифицированного обслуживания, обычно даже авторского сопровождения и больших вычислительных ресурсов. Опасаемся, что геоэлектрические исследования с массовым привлечением такого трехмерного моделирования еще долго будут носить уникальный характер и такие исследования нельзя квалифицировать как метод электроразведки в геофизическом производственном смысле. Особенно заметно отсутствие

общепризнанного подхода к решению трехмерной обратной задачи. Конечно, очевидный путь, который состоит в использовании процедуры решения прямой трехмерной задачи для подбора определенным образом параметризованной трехмерной неоднородности, мало устраивает электроразведчиков из-за медлительности такого процесса.

В статье предлагается подход, который состоит в прямой инверсии (без явного решения прямой задачи) большого количества данных на основе приближенного линейаризованного представления прямой задачи. Такая процедура легко укладывается в рамки томографической инверсии. Этот подход не нов, и авторы статьи предлагали его еще в 2000 году [5], а за последние годы регулярно появляются работы в этом направлении [2, 6]. Мы постепенно реализовывали этот подход в виде прямой трехмерной задачи в составе известной системы «Подбор», а также в виде пакета программ для трехмерной томографической инверсии данных площадных работ методом ЗСБ, что поможет сделать 3D-электроразведку контролируемым стандартным производственным геофизическим методом.

Борновское приближение

Одномерная кусочно-однородная среда – до сих пор основная интерпретационная модель в геоэлектромагнитных исследованиях, в особенности в методах становления с контролируемым источником. За основу берется модель среды, описываемая лишь одномерной кусочно-постоянной функцией $\sigma_0(z)$ с магнитной проницаемостью, равной проницаемости вакуума. Базовая модель подразумевает квазистационарный, чисто электродинамический процесс, и в целом можно говорить о базовой задаче, решение которой имеет известные интегральные представления для любого переменного и распределенного источника [3]. Если рассмотреть теперь возмущающий фактор как дополнительный сторонний ток в базовой задаче, конкретно в первом уравнении Максвелла, то можно получить алгоритм для расчетов аномального поля при возмущениях самого разного рода. Метод возмущений давно и широко применяется в физике в разных областях и наибольшую известность получил в виде приближения Борна. В геофизике этот подход давно применяется [2], и авторы статьи описывали практические результаты его использования в начале 2000-х годов [5].

Построим подобный алгоритм для петлевого варианта зондирования в ближней зоне (ЗСБ). Итак, источник – токовая петля с током I , радиуса a с центром в точке $S(x_0, y_0)$ на дневной поверхности (для определенности). В этом случае электрическое поле имеет только компоненту E_ϕ^0 в одномерной слоистой среде, и решение можно представить как

$$E_\phi^0(x, y, z, S, \omega) = I \cdot e(x, y, z, S, \omega). \quad (1)$$

Пусть имеется некоторое возмущение проводимости $\Delta\sigma$ в области $V(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. В этой области первое уравнение Максвелла есть:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma_0 \cdot \mathbf{E} + \Delta\sigma \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

где σ_0 представляет одномерную среду. Будем рассматривать $\Delta\sigma \cdot \mathbf{E}$ как дополнительный источник в 1D-среде. Область возмущения можно представить совокупностью электрических диполей с моментами $d\mathbf{l} = \Delta\sigma \cdot E_\phi^0 \cdot d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}$, где E_ϕ^0 – нормальное (не возмущенное) поле, которым мы заменяем полное поле. Замена полного поля нормальным как раз и дает приближенное линейаризованное решение. Мы также можем использовать в данном случае то обстоятельство, что задача симметрична относительно источника и приемника (петлевого). На рис. 1 проиллюстрирована эта схема генерации аномального отклика возмущения $\Delta\sigma$ проводимости в прямоугольной области V . Итак, полагая, что возмущение $\Delta\sigma$ в области V в целом слабо повлияет на процесс становления, мы получим полный сигнал в приемной петле с центром в точке $R(x, y)$ на дневной поверхности в виде:

$$E(R, S, \omega) = E^0(R, S, \omega) + I \cdot \Delta\sigma \cdot \iiint_V e(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, S, \omega) e(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, R, \omega) \phi d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}. \quad (3)$$

Рассмотрим формулы (1) и (3) более подробно. Итак, как известно (например, [3]),

$$E_\phi^0(r, z, \omega) = -i\omega\mu_i \cdot I \cdot a \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda X(\lambda, \omega, z) d\lambda, \quad (4)$$

где J_1 – функция Бесселя, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, a – радиус питающей петли, X – решение одномерной задачи в области пространственных гармоник. Аномальное поле теперь вместо (3) представится в виде

$$\Delta E(R, S, \omega) = \Delta\sigma \cdot (i\omega\mu)^2 \text{Iab} \int_0^\infty \int_0^\infty T(\lambda, \lambda') \lambda \lambda' Z(\lambda, \lambda', \omega) d\lambda' d\lambda, \quad (5)$$

где

$$Z(\lambda, \lambda', \omega) = \int_{z_1}^{z_2} X(\lambda, \omega, \bar{z}) X(\lambda', \omega, \bar{z}) d\bar{z} = \left[\frac{X'_z(\lambda) X(\lambda') - X(\lambda) X'_z(\lambda')}{\lambda^2 - \lambda'^2} \right]_{z_1}^{z_2} \\ T(\lambda, \lambda') = J_1(\lambda a) J_1(\lambda' b) \cdot \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \phi(S, R, \bar{x}, \bar{y}) J_1(\lambda r_1) J_1(\lambda' r_2) d\bar{x}d\bar{y}$$

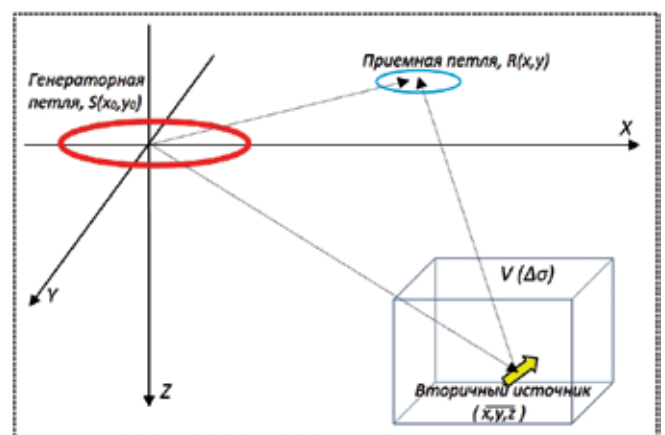


Рис. 1

Схема генерации аномального отклика возмущения $\Delta\sigma$ проводимости в прямоугольной области V (вторичные источники)

$$r_1 = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2}.$$

b – радиус приемной петли, x_p, y_p, z_i – границы прямоугольного объекта, ϕ – геометрический фактор, учитывающий взаимное расположение источника, приемника и объекта (угловой коэффициент). Мы здесь воспользовались свойствами функции X как решения граничной задачи [3]. Следует еще рассмотреть Z при $\lambda = \lambda'$. Во временной области решение получается преобразованием Фурье выражений (4)–(5).

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{-i\omega} f(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Этот алгоритм был реализован в программе. При написании кодов (на языке фортран) учитывалось, что функция (интеграл) T не зависит от частоты и рассчитывается один раз, а при вычислении матрицы значений $Z(\lambda, \lambda')$ используются заранее рассчитанные векторы $X(\lambda), X'_z(\lambda)$. В целом можно сказать,

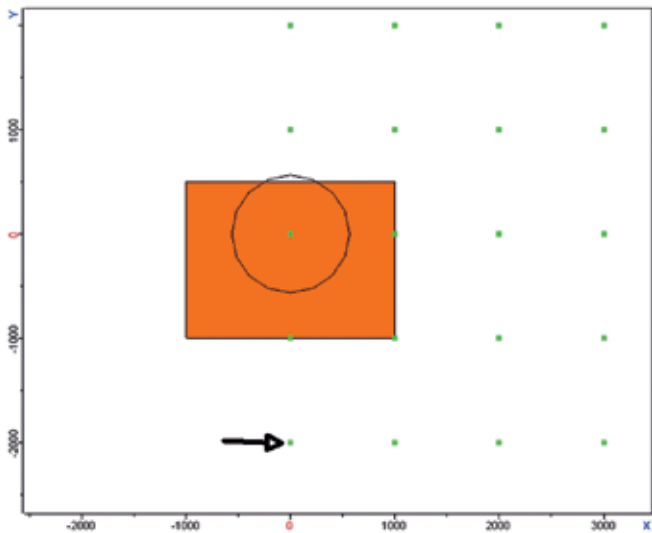


Рис. 2

Геоэлектрическая модель для тестирования программы

что при создании алгоритма расчета приближенного отклика от трехмерной среды использовались алгоритмы и элементы полуаналитического «одномерного» математического аппарата. В результате написана и отлажена процедура MAG3D расчета аномального сигнала от локального прямоугольного объекта. Процедура в виде dll-модуля может быть внедрена в любую систему обработки данных ЗСБ.

Тесты

Основное тестирование процедуры MAG3D заключалось в сравнении с точными трехмерными расчетами методом конечных элементов (МКЭ [6]). На рис. 2 представлена одна из использованных геоэлектрических моделей.

Вмещающая среда двухслойная ($\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 1000$ м, $\rho_2 = 1000$ Ом·м). Объект по оси X от -1000 до 1000 м, по Y от -1000 до 500 м, по Z от -600 до -300 м, удельное электрическое сопротивление (УЭС) объекта $\rho_o = 50$ Ом·м (объект проводящий). Петля с радиусом 564 м, с центром в точке (0, 0 м), ток 1 А. 20 приемников с единичным моментом расположены, как показано на рис. 2.

Итак, представим для сравнения кривые становления поля в приемнике, указанном стрелкой на рис. 2, с координатами (0, -2000). На рис. 3, а суммарные поля, рассчитанные методом конечных элементов (МКЭ) и по построенному выше алгоритму борновского приближения, практически совпадают. Этот результат, конечно, выглядит вполне удовлетворительно. Однако на рис. 3, а приведена также кривая становления для вмещающей среды – нормальный сигнал. Видно, что влияние неоднородности небольшое, что показывает низкую эффективность метода ЗСБ при исследовании латеральных неоднородностей. На рис. 3, б приведено сравнение аномальных полей, и оно подтверждает работоспособность борновского приближения. Для модели, представленной на рис. 2, расчеты для других точек измерения и при другом положении источника также показывают хорошее согласие используемого приближения с результатами МКЭ.

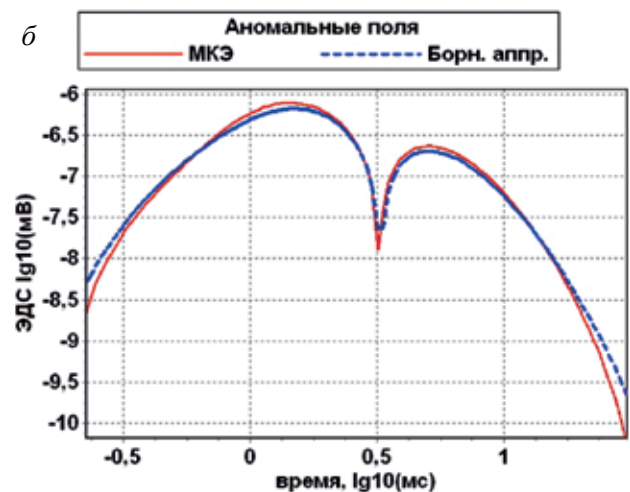
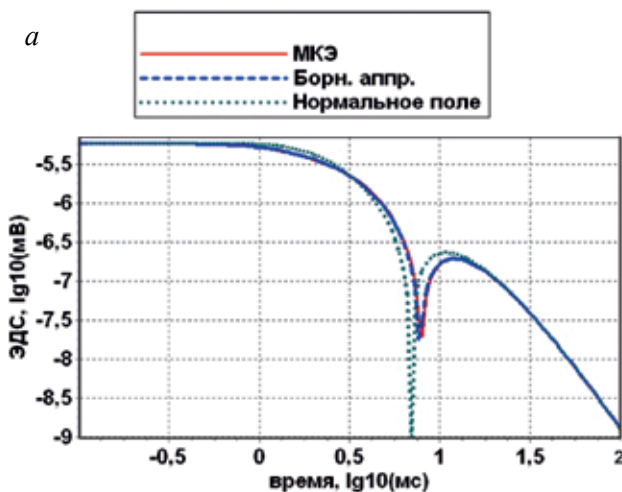


Рис. 3

Сравнение результатов MAG3D и МКЭ в точке (0, -2000). Суммарные и аномальные поля

Трехмерная процедура в системе «Подбор-5»

Процедура решения прямой трехмерной задачи на основе борновского приближения описана авторами в 2007 году и входит в состав последней версии системы «Подбор», известного математического обеспечения для ЗСБ [3]. Интересно, что приближенная трехмерная прямая задача уже появлялась (с 1995 года) в составе комплекса «Подбор», который функционировал тогда еще в системе DOS. Однако эта программа (Fast3D) так и не была востребована, насколько мы знаем. Впрочем, и возможности программы были весьма ограниченными по части формы неоднородности и применяемой приемно-питающей установки (только осесимметричные петли).

На рис. 4 и 5 представлены элементы интерфейса системы «Подбор-5». Для демонстрации мы возьмем тот же пример, который использовался выше при тестировании (только петля теперь квадратная).

Появление оперативной процедуры трехмерного моделирования в составе системы «Подбор» софта для ЗСБ можно считать важным, знаковым событием с точки зрения развития трехмерной электроразведки.

Трехмерный подход 3D в условиях поляризующей среды

Когда говорят о трехмерном подходе, о трехмерной интерпретации, то обычно имеется в виду трехмерная структура распределения удельного сопро-

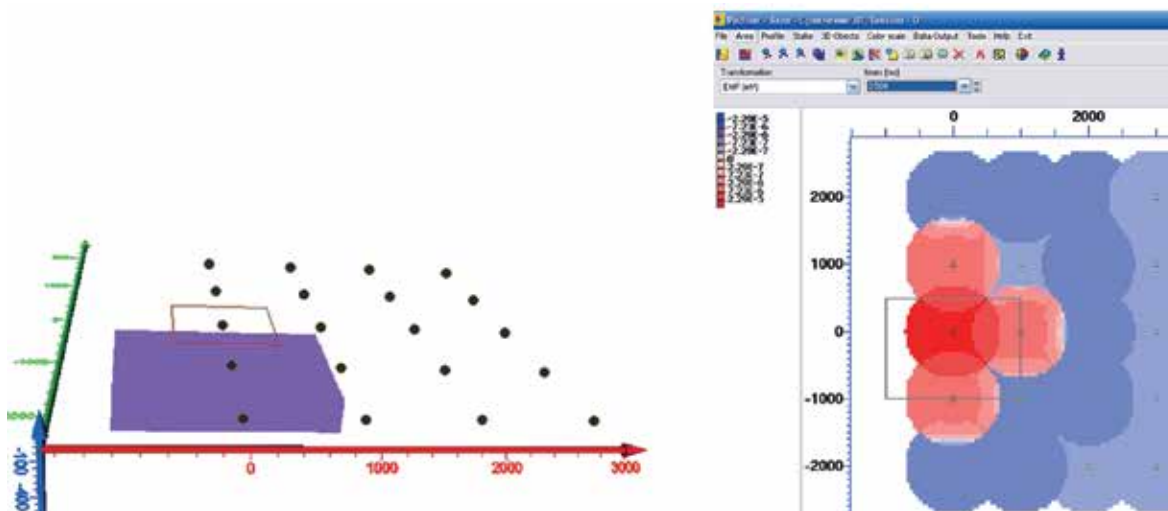


Рис. 4
Неоднородность, источник и система наблюдений, а также площадное отображение отклика

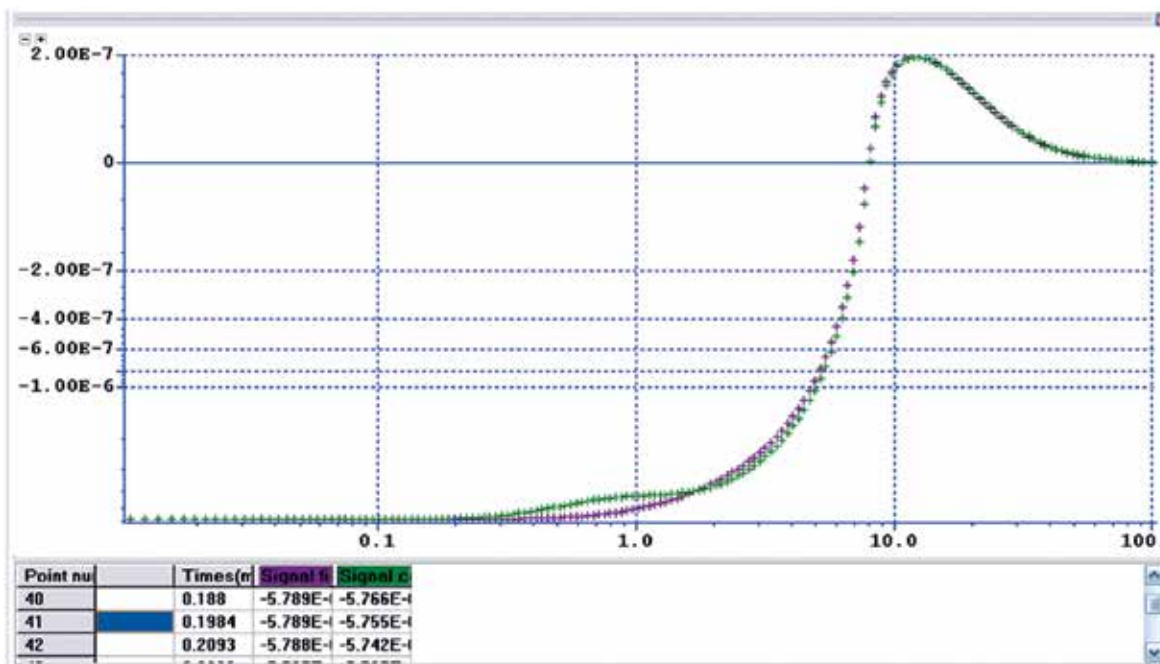


Рис. 5
Сравнение точного расчета (в качестве полевой кривой) и расчета по программе MAG3D (зеленая) в интерфейсе системы «Подбор-5» (точка X = 0, Y = -2000 м)

тивления. Однако все чаще в электроразведке сталкиваются с осложнениями в отклике среды в виде вклада поляризационных процессов. Как известно, общепринятый подход к описанию вызванной поляризации (ВП) состоит в придании частотных зависимостей (дисперсии) сопротивления по модели Cole-Cole [9]. Таким образом, существует необходимость в соответствующей трехмерной постановке. Впрочем, приведенный выше алгоритм позволяет легко обобщить его применение и на случай частотно зависимых сопротивлений вмещающей среды и включения. Мы полагаем, применяя модель Cole-Cole, что

$$\rho(\omega) = \rho_0 \cdot \left[1 - \eta \cdot \frac{(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \quad (7)$$

Таким образом, для учета процессов вызванной поляризации нужно для каждого поляризующегося слоя и для объекта-включения ввести четыре параметра – ρ , η , τ и C . В конечном итоге мы получим возможность оперативного расчета переходных сигналов в трехмерной поляризующейся среде. Это решение для трехмерной ситуации будет обладать той же степенью корректности в смысле учета ВП, как и решения для одномерной среды, давно используемые в геоэлектрике (например, [1]).

Для демонстрации используем модель среды и систему измерений, как на рис. 6. Здесь представлен эпизод моделирования сигналов морской при-

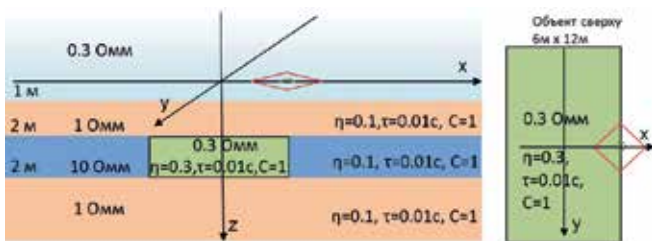


Рис. 6
Модель и точка зондирования соосной установкой

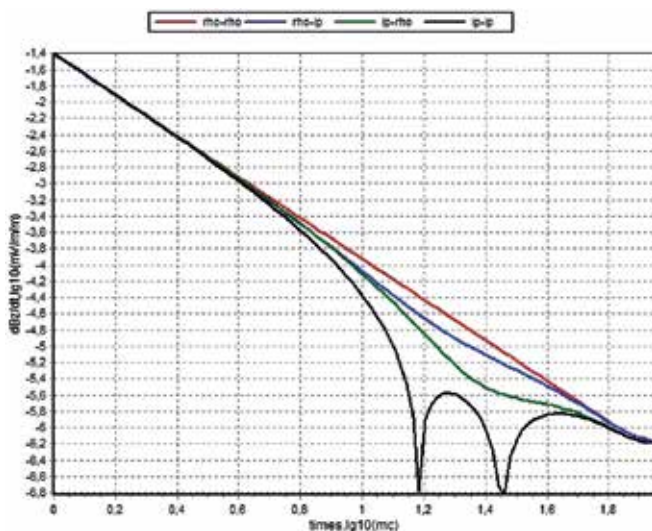


Рис. 7
Кривые становления ($x = 3$ м, $y = 0$)

донной электроразведки ЗС в поляризующейся (кроме морской воды) среде. Объект имеет собственные параметры проводимости и вызванной поляризации. На рис. 7 приводим расчеты в виде кривых переходного сигнала от соосной установки, расположенной, как показано на рис. 6. Обращает на себя внимание резкое увеличение влияния ВП в случае, когда поляризующимися являются одновременно вмещающая среда и объект (черная кривая с переходами через 0). Мы должны снова пояснить, что мы не смогли прямо сравнить эти расчеты с диспергирующими сопротивлениями с расчетами по каким-либо независимым программам. Мы, как показано выше, протестировали алгоритм для неполяризующихся сред, а затем ввели зависимость сопротивлений от частоты, как это делается в одномерном случае.

Линейная инверсия и томографический подход

Линеаризованное решение прямой задачи, предлагаемое формулой (3), позволяет, в принципе, удивительно просто решить и обратную задачу, если речь идет о небольших возмущениях проводимости в известной вмещающей одномерной среде. Наше приближение означает пренебрежение взаимодействием отдельных возмущений между собой, и мы можем составить линейную систему, связывающую полевые данные и неизвестные возмущения проводимости в некотором количестве пространственных элементов обследуемой области среды. Добавив к этому характерный подход к описанию среды и способы представления результатов инверсии, мы можем претендовать в целом на томографический подход к решению обратной задачи. Впрочем, томографический подход, несколько различным образом понимаемый в различных методах, давно провозглашается в геоэлектрике.

Томографическая инверсия есть один из способов решения обратной задачи. Здесь есть внешняя сторона, состоящая в том, что от томографической инверсии ждут весьма оперативного результата в виде некоторых изображений среды (объемных или разрезов). Это достигается за счет известных упрощений. Для томографической инверсии характерно использование приближенного, обычно линеаризованного, решения прямой задачи. Такая постановка проблемы предусматривает привлечение эффективного аппарата линейной инверсии. Приближение (линеаризация) может сопровождаться и упрощениями модели физического процесса. Характерным для томографического подхода является также приближенное, но достаточно подробное и универсальное описание среды (или возмущения некоторого параметра среды) как совокупности стандартных, однородных внутри элементов.

Таким образом, развиваемый подход основывается на следующих положениях:

1. Область возмущения состоит из множества стандартных элементов;
2. Строится линеаризованное решение многомерной прямой задачи в окрестности простой (одномерной или даже однородной) референтной модели;

3. Инверсия заключается в обращении линейной системы, связывающей экспериментальные данные и возмущения геоэлектрических параметров относительно референтной среды;

4. Структура среды восстанавливается по полученному пространственному распределению параметров (например, электропроводности). Получается трехмерный образ среды, который можно изучать в различных сечениях.

Такой подход и такое определение томографической инверсии в рамках ЗС были предложены нами еще в 2000 году [5] и не вызвали особых возражений. Однако и тогда и теперь мы не претендуем на некий абсолют, также и не видим какого-то другого универсального определения. Напротив, есть тенденция в разных методах геоэлектрики определять томографический подход различным образом. Например, т.н. электротомография на постоянном токе имеет не много общего с межскважинной томографией в частотном режиме и с нашим подходом тоже.

Центральным, но не единственным пунктом в приведенной схеме является эффективное решение прямой задачи в приближенном, линейаризованном представлении. Совокупность экспериментальных наблюдений, полученных при различных условиях (время регистрации, положение источника, точка наблюдения), необходимо соотносить с соответствующими линейаризованными представлениями, в результате чего получается линейная система для определения некоторой совокупности кусочно-постоянных возмущений проводимости. Итак,

$$\begin{aligned}
 E(t_1) &= E^0(t_1) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_1), \\
 E(t_2) &= E^0(t_2) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_2), \\
 &\dots\dots\dots \\
 E(t_i) &= E^0(t_i) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_i), \\
 &\dots\dots\dots \\
 E(t_N) &= E^0(t_N) + I_0 \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j \cdot G_j(t_N),
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где E^0 – переходной сигнал вмещающей одномерной среды, K – количество стандартных объемных элементов (ячейки томографической сетки), на которое мы разбили исследуемую часть среды, $\Delta\sigma_j$ – возмущение проводимости в j -ом элементе по отношению ко вмещающей среде, $G_j(t_i)$ – коэффициенты линейаризованного представления (определенного выше) прямой задачи, а N – количество измерений.

Понятно, что, приняв во внимание хотя бы ошибки в экспериментальных данных, нужно использовать большее число данных, нежели число неизвестных. Для обращения системы мы использовали стандартный алгоритм, позволяющий находить общее решение переопределенной системы уравнений, основанный на методе наименьших квадратов и разложении по сингулярным числам [9].

На обращении системы (8) сказывается некорректность решения обратной задачи. Оно весьма неустойчиво, неоднозначно и нуждается в дополнительных регуляризациях. Мы ограничиваем множество решений решением с минимальной нормой, т.е находим «гладкое» решение, что соответствует более или менее гладкому реальному распределению возмущения проводимости. Пользователь может рассмотреть разные возможные варианты, меняя количество используемых сингулярных чисел.

Описанная выше технология реализована в виде пакета программ. Для демонстрации томографической инверсии используем синтетические данные – трехмерные расчеты методом конечных элементов, сделанные М.Г. Персовой. Используем ту же модель, что и выше (рис. 2). Только теперь берем данные (кривые становления) от двух генераторных петель с радиусами 564 м (соответствует квадратному контуру 1000 x 1000 м), с координатами центров (0, 0) и (0, -1500 м). От каждого из них регистрируется переходный процесс в отдельной системе приемников в 20 точка. Всего, таким образом, имеется 40 кривых становления. Напомним, неоднородность с размерами 2000 x 1500 x 300 м, с УЭС 50 Ом-м помещена в двухслойный вмещающий разрез. Кровля неоднородности находится на глубине 300 м. На рис. 8 показан пример кривых становления (нормальной и суммарной) в точке $X = 2000$ м, $Y = -1000$ м от первой генераторной петли (рис. 9). Это расчетные кривые, и они «длинные» (166 времен), с излишними начальной и поздней стадиями, в которых влияние неоднородности отсутствует. К недостаткам материала следует отнести довольно слабое различие в двух положениях источника и наличие больших разносов (> 4 км), где сигнал и тем более влияние объекта слабы. Судя по сопоставлению кривой для вмещающей среды и суммарной кривой, вообще, аномальный эффект не велик и располагается в районе перехода кривых через 0, что затрудняет применение традиционных подходов с использованием кажущихся величин.

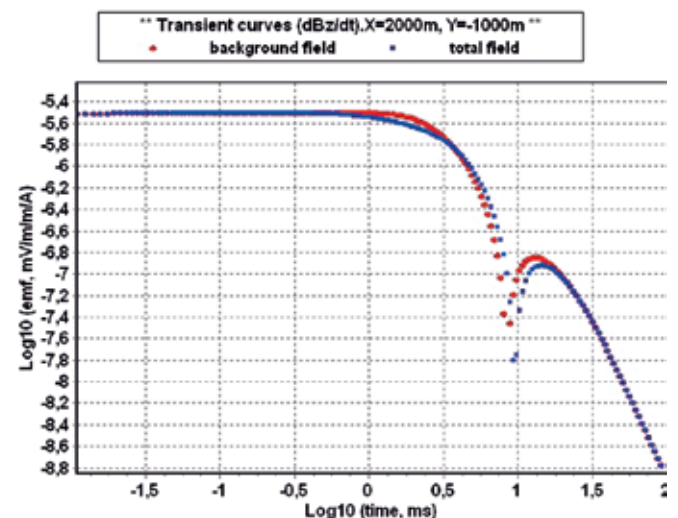


Рис. 8
Пример кривых становления

На первом этапе мы полагаем, что положение неоднородности (и даже ее наличие) нам не известно. В таком случае мы подозреваем широкую область в районе зондирований – 6000 x 6000 м. Для начала «раскидываем» грубую томографическую сеть – 6 x 6. По глубине рассматриваем диапазон глубин -600 м < z < -300 м (допустим, это априорная информация). Итак, будем определять возмущения проводимости известной вмещающей среды в 36 ячейках томографической сети.

Томографическая инверсия, согласно нашему описанию, состоит в выполнении определенных процедур, из которых первую (построение сетки) мы реализовали. Теперь мы должны, согласно выбранной сетке, сделать расчет коэффициентов для каждого элемента, т.е. построить линеаризованное решение трехмерной прямой задачи. При этом параметры вмещающего разреза должны быть установлены (например, предварительной одномерной интерпретацией). Это наиболее ресурсоемкая часть предлагаемого математического аппарата. Мы должны рассчитать и запомнить устанавливающие функции-коэффициенты в количестве $N_x * N_y * N_z * N_t$, где N_x – число разбиений сетки по X, N_y – число разбиений сетки по Y, N_z – число разбиений сетки по Z, N_t – число привлекаемых кривых становления от всех генераторов и приемников. В нашем случае сейчас это число есть $6 * 6 * 1 * 40 = 1440$ функций-коэффициентов, каждая из которых определена на 166 временных отсчетах.

Таким образом, составляется линейная система из $40 * 166$ (в нашем случае) уравнений, в которой правая часть есть разность между «полевыми» данными и расчетом для нормальной среды, коэффициенты нами рассчитаны, а неизвестными (их $N_x * N_y * N_z$) являются возмущения проводимости ($\Delta\sigma$) в каждом элементе.

Производится инверсия линейной системы по критерию наименьших квадратов и с использованием некоторой регуляризации. Это быстрая процедура. При этом мы можем повторять ее, меняя параметры инверсии и доопределяя некоторые элементы как известные (детали рельефа и ВЧР, например),

используя рассчитанные коэффициенты. Приведем результат в графическом виде на рис. 9, б.

Теперь объект примерно обозначен, и мы можем построить более подробную сетку 13 x 13 в более узкой области 2000 x 2000 м. Результат томографической инверсии представлен в графическом виде (рис. 9, в).

Мы уже довольно определенно установили местоположение, форму неоднородности и ее УЭС. Процесс уточнения можно продолжать. Однако результат ограничивается точностью линейного приближения, а также точностью априорных данных о вмещающей среде и количеством и качеством полевых данных.

Приведем еще пример томографической инверсии данных ЗС в трехмерной поляризующейся среде. Тут есть проблема. Мы делаем инверсию линейной системы во временной области, и решение предполагается вещественное. Т.е. мы должны определять вещественные параметры ρ_ϕ , η , τ и C , входящие в формулу Cole-Cole. В частотной области линеаризованное представление (аномальная часть) вместо (5) теперь выглядит так:

$$dE(R, \omega) = \left[\frac{\partial \sigma}{\partial \sigma_0} d\sigma_0 + \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \sigma}{\partial C} dC \right] (i\omega\mu)^2 lab \int_0^\infty \int_0^\infty T(\lambda, \lambda') \lambda \lambda' Z(\lambda, \lambda', \omega) d\lambda d\lambda', \quad (9)$$

где $\sigma(\omega)$ определено формулой Cole-Cole (7). Но это означает, что число неизвестных увеличивается в четыре раза, что требует соответственного увеличения числа данных. Мы предложили бы сосредоточиться на одном параметре. Конечно, он будет кажущимся, но позволит выделить объект. Именно так и поступим сейчас. Используем синтетические данные ЗС в трехмерной поляризующейся среде, определенной выше, на рис. 6, в виде переходных сигналов от соосных петель, согласно схеме на рис. 10, а. Построим сетку в один слой в интересующем нас горизонте и произведем линейную инверсию, предполагая в качестве неизвестных возмущения вещественного сопротивления.

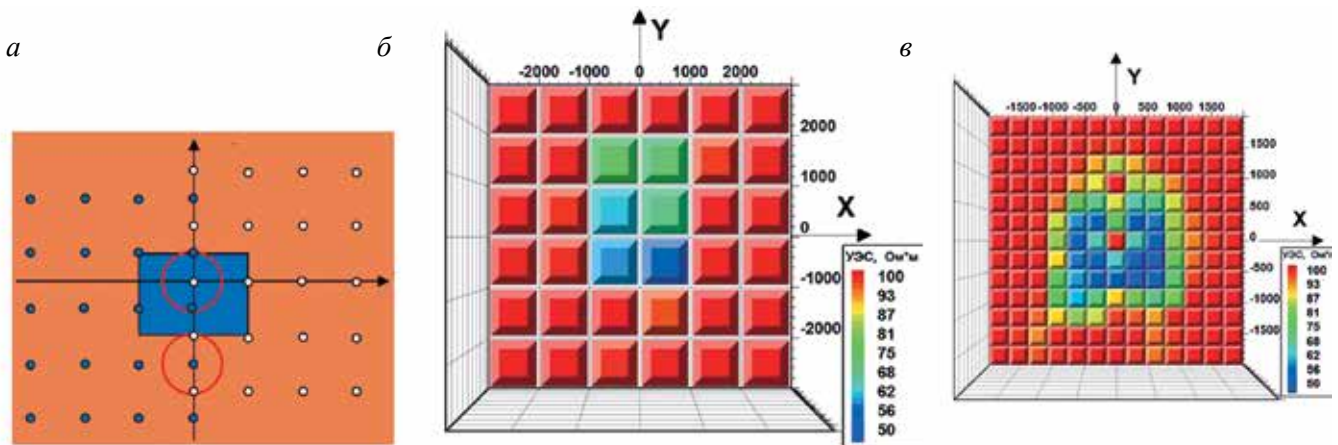


Рис. 9

Модель и схема регистрации сигнала (а); результат грубой инверсии (б); томографическая инверсия с подробной сеткой (в)

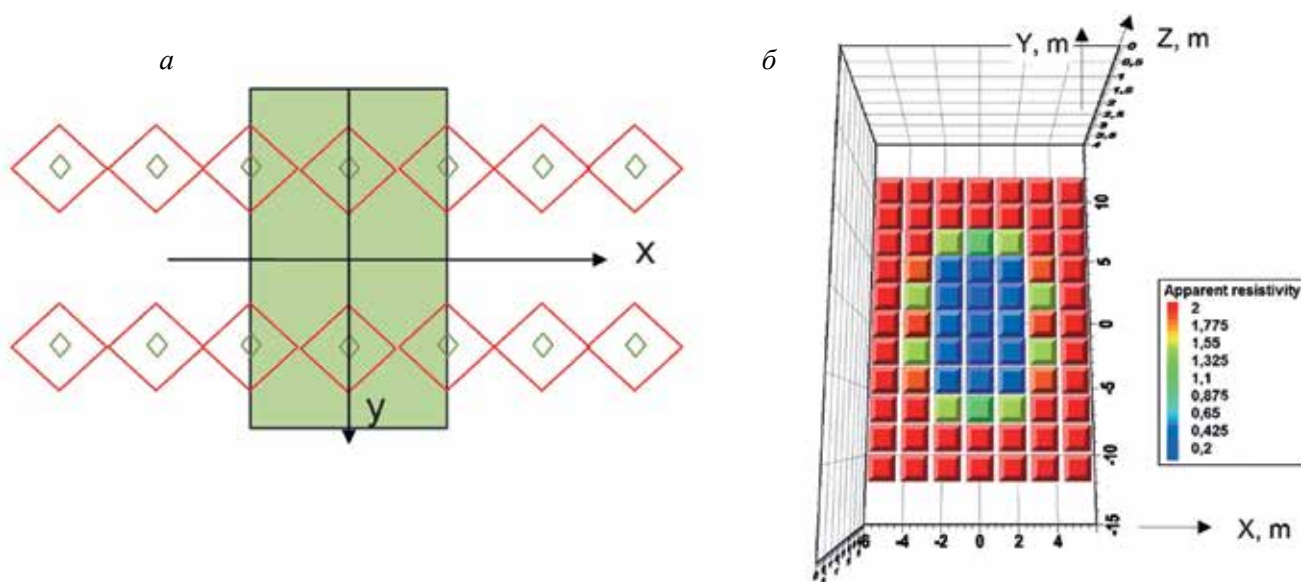


Рис. 10

Сбор данных (а) и результат томографической инверсии (б)

В результате получили положительный результат в виде вполне выделенного объекта (рис. 10, б). В синтетические данные мы закладывали параметры поляризации вмещающей среды и объекта. При инверсии мы учитывали параметры вмещающей среды как известные. А полученные значения сопротивления объекта нужно считать кажущимися.

Остается отметить слабое место этого численного эксперимента. Синтетические данные для трехмерной поляризуемой среды мы получили, воспользовавшись нашим же линейаризованным представлением (за неимением других).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенные исследования, результаты которых лишь в малой части представлены здесь, показали, что математический аппарат, основанный на борновской линейаризации прямой задачи зондирования становлением, вполне работоспособен и обещает решить до некоторой степени проблему оперативного трехмерного подхода в ЗС, в особен-

ности при структурных исследованиях. Этот аппарат, дополненный еще сервисным обеспечением по части манипуляций с полевыми и расчетными данными и графическими инструментами для представления трехмерных данных, позволяет осуществить интерпретационный процесс с использованием больших объемов площадных данных в рамках томографической технологии. Авторами статьи намечен путь к обеспечению электромагнитных зондирований становлением поля общепринятым и оперативным математическим обеспечением трехмерного характера.

Конечно, очень бы подкрепило томографический подход сопровождение его процедурой точного трехмерного расчета для окончательного уточнения результатов томографической инверсии. Мы без этого не могли обойтись даже в этой работе и должны выразить благодарность М.Г. Персовой за предоставленные расчеты методом конечных элементов, без которых наши построения и результаты не обладали бы должной достоверностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 8. С. 1282–1293.
2. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
3. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». Новосибирск: изд. СО РАН, 2007. 157 с.
4. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Универсальное математическое обеспечение зондирования становлением // Геофизика. 2017. № 1. С. 45–55.
5. Могилатов В.С., Эпов М.И. Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Физика Земли. 2000. № 1. С. 78–86.
6. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Домников П.А., Симон Е.И. О томографическом подходе к интерпретации данных электромагнитных зондирований в трехмерных средах // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» ФПЭП-2010. Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010. Т. 6. С. 150–155.
7. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли. 2011. № 2. С. 3–14.
8. Уилкинсон Дж. Райни К. Справочник алгоритмов на языке алгол. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1976. 390 с.
9. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics // J. Chem. Phys. 1941. V. 9.4. Pp. 341–351.

REFERENCES

1. Antonov EYu, Kozhevnikov NO, Korsakov MA. Avtomatizirovannaya sistema dlya interpretatsii dannykh indukcionnykh impulsnykh elektromagnitnykh zondirovaniy s uchetom indukcionno-vyzvannoj polarizatsii [Automated system for interpreting data of the inductive pulsed electromagnetic soundings given induction-induced polarization]. *Geologiya i Geofizika*. 2014; 55(8): 1282–1293 (in Russian).
2. Zhdanov Michael S. Geophysical inverse theory and regularization problem. Amsterdam: Elsevier, 2002. 710 p.
3. Mogilatov VS, Zaharkin AK, Zlobinskiy AV. Matematicheskoe obespechenie elektrorazvedki ZSB. Sistema Podbor [Software for TEM. System Podbor]. Novosibirsk: Izd. SB RAS, 2007. 157 p. (in Russian).
4. Mogilatov VS, Zlobinskiy AV. Universalnoe matematicheskoe obespechenie zondirovaniy stanovleniem [Universal software for electrical prospecting by transient]. *Geofizika*. 2017; (1): 45–55 (in Russian).
5. Mogilatov VS, Epov MI. Tomograficheskij podxod k interpretatsii dannykh geoelektromagnitnykh zondirovaniy [Tomographic approach to the interpretation of the geoelectromagnetic data]. *Fizika Zemli*. 2000; (1): 78–86 (in Russian).
6. Persova MG, Solovejchik YuG, Domnikov PA, Simon EI. O tomograficheskom podxode k interpretatsii dannykh elektromagnitnykh zondirovaniy v trexmernyx sredax [About tomographic approach to the interpretation of the geoelectromagnetic data in the 3D mediums]. *Materialy X mezhdunarodnoj konferencii Aktualnye problemy elektronnoy priborostroeniya FPEP-2010*. Novosibirsk: izd-vo NGTU, 2010. V. 6. Pp. 150–155 (in Russian).
7. Persova MG, Solovejchik YuG, Trigubovich GM. Kompyuternoe modelirovanie geoelektromagnitnykh polej v trexmernyx sredax metodom konechnyx elementov [Computer simulation geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method]. *Izv. RAN. Ser.: Fizika Zemli*. 2011; (2): 3–14 (in Russian).
8. Wilkinson JH, Reinsch C. Handbook for Automatic Computation. Volume II: Linear Algebra. Springer, 1971. 448 p.
9. Cole KS, Cole RH. Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics. *J. Chem. Phys.* 1941. V. 9.4. Pp. 341–351.

ОБ АВТОРАХ



МОГИЛАТОВ
Владимир Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируемыми источниками.



ЗЛОБИНСКИЙ
Аркадий Владимирович

Генеральный директор научно-технической компании «ЗаВеТ-ГЕО», кандидат технических наук, окончил физический факультет Новосибирского государственного университета в 1992 г. Область интересов – методика, обработка и интерпретация результатов электромагнитных зондирований. Автор около 30 научных работ (1 монография).



ООО ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДАННЫХ

ООО НПП СПЕЦГЕОФИЗИКА



Офис Е-205, Парк-Плейс,
Ленинский пр-т, 113/1
117198, Москва, Россия

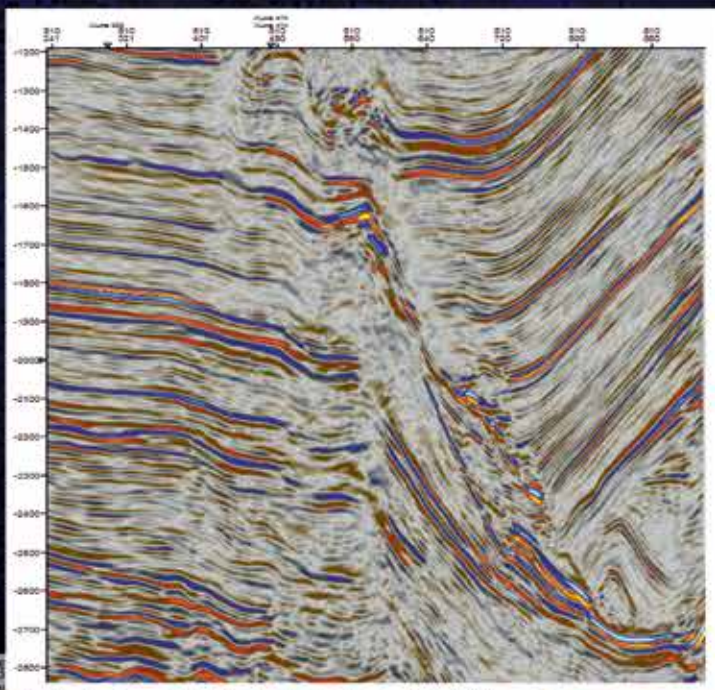
+7(495) 181 27 94
info@gds.ru
www.gds.ru



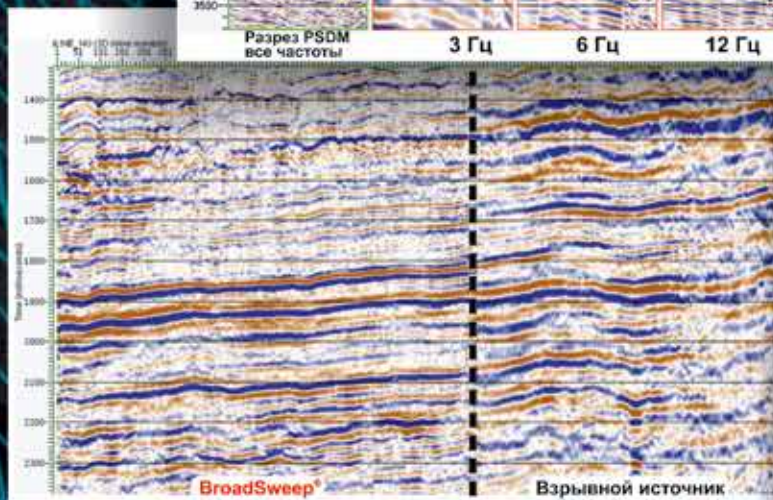
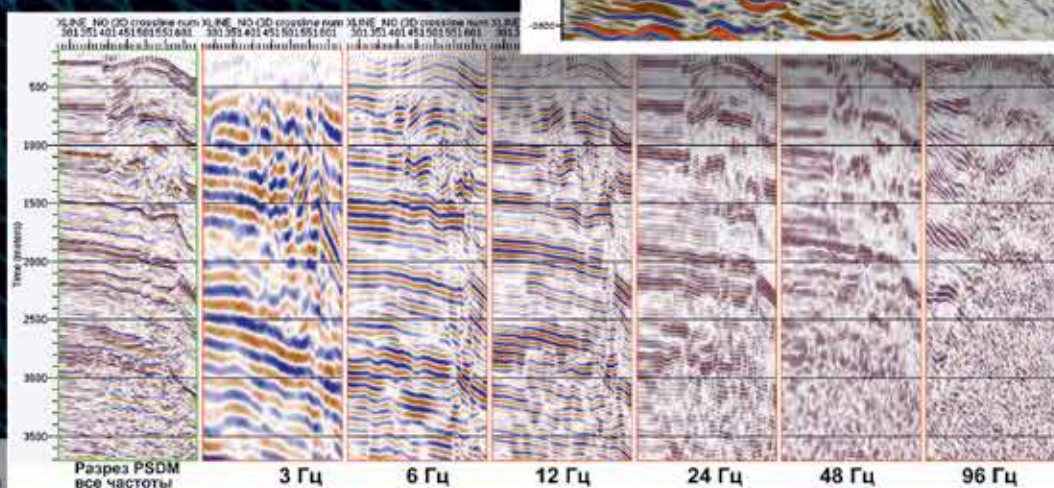
ТЕХНОЛОГИЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ

BROAD SWEEP®

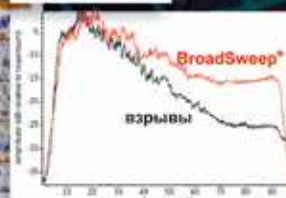
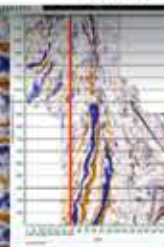
*BroadSweep® – изображение
земельной толщи сложных
геологических слоев*



*Октавность изображения
шесть октав*



*Разрез
через разные съемки
до применения
согласующего фильтра*





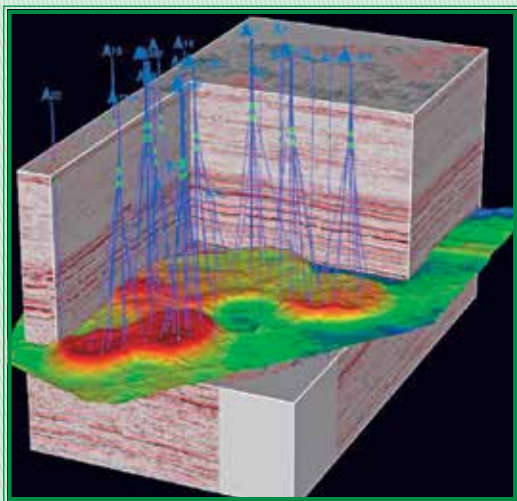
УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

ПРИГЛАШАЕМ ВАС НА ПЯТУЮ ТЕМАТИЧЕСКУЮ КОНФЕРЕНЦИЮ ЕАГО

«КАРБОНАТНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ – 2019»,

которая будет организована в **Москве,**
в **конференц-зале РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина**
29–31 октября 2019 года

ТЕМЫ УСТНЫХ ДОКЛАДОВ



1. НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОГО, ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО, ПРИКАСПИЙСКОГО И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ОСАДОЧНО-ПОРОДНЫХ БАССЕЙНОВ

2. СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ И ЛИТОФАЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

3. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ И ИЗУЧЕНИЯ КЕРНА В КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

4. ГЛУБИННЫЕ МИГРАЦИИ ДО СУММИРОВАНИЯ И УЧЕТ СКОРОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КАРБОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЯХ

5. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 2D/3D, ГИС, ВАК И FMI, КЕРНА И ГДИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

6. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ (ЭЛЕКТРО-, ГРАВИ-, МАГНИТОРАЗВЕДКИ, СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ДРУГИХ МЕТОДОВ) ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ И ОПИСАНИЯ СТРОЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

7. ВОПРОСЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

8. ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КАРБОНАТНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ



В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ ПЛАНИРУЮТСЯ МЕРОПРИЯТИЯ:

- НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ (устные доклады)
- КОММЕРЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ компаний-участников
- ДИСКУССИИ в виде круглых столов и свободного обсуждения нерешенных проблем
- КУРС д.т.н. С.Н. Птецова «Прогноз коллекторских свойств природных карбонатных резервуаров по данным 3D-сейсморазведки и бурения»

ОКОНЧАНИЕ ПРИЕМА ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ – 15 сентября 2019 года
ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ – до 30 сентября 2019 года

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННОГО И ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
доктор технических наук **Сергей Николаевич ПТЕЦОВ** (ООО «ТПГК»)

КООРДИНАТОР ПРОЕКТА:
президент МОО «ЕАГО» **Михаил Петрович ПАСЕЧНИК**
e-mail: eago@eago.ru, conference@eago.ru

Информация на сайте: www.mooeago.ru

По вопросам регистрации участников:
тел.: +7 (495) 952-47-15, +7-916-752-32-19, e-mail: conference@eago.ru

Оформление финансовых документов:
тел.: +7 (495) 952-47-15, +7-910-005-43-78, e-mail: terekhina74@mail.ru

Почтовый адрес: **Россия, 115191, г. Москва, ул. 2-я Рощинская, д. 10, офис 217**

