

ИНТЕРЭКСПО

ISSN 2618-981X

ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Форум № 1 в России

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**Недропользование. Горное дело.
Направления и технологии поиска,
разведки и разработки месторождений
полезных ископаемых. Экономика.
Геоэкология**

№ 2

Новосибирск
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

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

№ 2

Новосибирск
СГУГиТ
2021

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, главный научный сотрудник
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН, академик РАН, главный научный сотрудник
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

М. И. Эпов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, врио директора Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

А. П. Хмелинин

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск

М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск

А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г.,
Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф.
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки
и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкологи-
я». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 2. – 336 с. – ISSN 2618-981X

DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622.3

© СГУГиТ, 2021

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ ГЛИН СИБИРИ ДЛЯ ЛЕЧЕБНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Марина Геннадьевна Бородина

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства», Россия, Томская область, г. Северск, 636035, ул. Мира, 4; младший научный сотрудник, тел. (3822)51-50-29, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Надежда Георгиевна Клопотова

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства», Россия, Томская область, г. Северск, 636035, ул. Мира, 4; к.г.н., ведущий научный сотрудник, тел. (3822)51-50-29, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Татьяна Александровна Пушкарёва

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства», Россия, Томская область, г. Северск, 636035, ул. Мира, 4; к.б.н., старший научный сотрудник, тел. (3822)51-50-29, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

На примере исследования каолиновых и полиминеральных глин Сибирского региона определены показатели безопасности, установлены унифицированные критерии, определяющие возможность использования глин в целях медицины.

Ключевые слова: глины, свойства, медицина, информативные параметры, хранение

ASSESSMENT OF NATURAL CLAYS OF SIBERIA FOR MEDICAL USE

Marina G. Borodina

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; Junior Researcher. Phone / fax: (382 2) 51-50-29. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Nadezhda G. Klopotova

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; PhD, Leading Researcher. Phone / fax: (382 2) 51-50-29. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Tatiana A. Pushkareva

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; PhD, Senior Researcher. Phone / fax: (382 2) 51-50-29. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru; Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe uchrezhdenie «Sibirskiy Federal'nyy nauchno-klinicheskiy zentr Federal'nogo mediko-biologicheskogo agentstva» Rossija, 636035 g. Seversk, ul. Mira, 4

On the example of the study of kaolin and polymineral clays of the Siberian region, safety indicators have been determined, unified criteria have been established that determine the possibility of using clays for medical purposes, the conditions and methods of their storage.

Keywords: clays, properties, medicine, informative parameters, storage

Грязелечение или пелоидотерапия является одним из древнейших методов использования природных факторов в целях оздоровления организма. Как пространённый тип осадочных горных пород, глины представляют собой доступный природный материал, широко применяемый в качестве эффективного, безопасного лечебного средства. О целебных свойствах глины, ее воздействии и способах лечения упоминается в трактатах античных ученых, в «Каноне врачебной науки» Авиценны. В России развитие глинолечения связано с именами известных медиков: С.П. Боткина, Н.И. Соколова, А.Н. Покровского. В 1939 году Комитетом международного общества медицинской гидрологии глины отнесены к пелоидам (лечебным грязям) [1]. Применению в целях медицины наиболее соответствуют тонкодисперсные осадочные породы, в составе которых содержится не менее 25 % частиц диаметром менее 0,001 мм. Особые свойства глинам сообщает их состав, представленный преимущественно глинистыми минералами, имеющими слоистую или ленточно-слоистую структуру и пластинчатую форму [2]. Большинство глин являются полиминеральными, характерными представителями мономинеральных являются каолинитовые и отчасти гидрослюдистые глины озерных фаций, монтмориллонитовые, бейделлитовые и гидрослюдистые разновидности. Мономинеральные глины распространены в природе значительно меньше, чем полиминеральные [3]. Как генетическая разновидность лечебных грязей, глины характеризуются рядом ценных качеств, таких как влагоёмкость, пластичность, обменные и адсорбционные свойства, наличие биологически активных веществ и соединений.

Возросший в настоящее время интерес к глинам, как лечебному сырью обусловлен их относительной доступностью в сочетании с благоприятными характеристиками. Установлено, что лечебное действие глины при наружном применении достигается за счет термического, механического и восстанавливающих эффектов [4].

На сегодняшний день вопросы применения глин достаточно полно освещены в медицинской литературе и, тем не менее, методологические подходы к оценке их как сырья для целей медицины остаются актуальными в связи с широкой распространенностью, многообразием и требуют дальнейшего рассмотрения.

Целью нашей работы явилось определение наиболее информативных параметров природных глин месторождений Сибирского региона, позволяющих оценить их качество для использования в лечебной практике.

Объектами исследований послужили генетически разнообразные природные глины эксплуатационных участков Кемеровской области, Красноярского края, аллювиальные отложения рек Ак-Кем, Артыбаш, Усть-Кокса и Лосиха (Республика Алтай, Алтайский край). В качестве примера в данной работе приведены результаты исследований глин Кемеровской области.

Оценка качества глин проводилась согласно требованиям методических указаний Минздрава РФ №2000/34 «Классификация минеральных вод и

лечебных грязей для целей их сертификации» [5], с использованием весового, титриметрического, фотоколориметрического, потенциометрического методов.

Безопасность по содержанию тяжелых металлов и радиологическому состоянию контролировалось методами гамма-спектрометрического (МВИ 15.1.6(2)-14) и нейтронно-активационного анализа. Адсорбционные свойства глин – по ГОСТ 30036.2–93 [6]. Кристаллическое строение глин, элементный состав и размерность частиц исследовались методами рентгеноструктурного, спектрального и гранулометрического анализа. Эпидемиологическую безопасность глин оценивали показателями санитарно-микробиологического состояния согласно требованиям, предъявляемым к лечебным грязям: по содержанию бактерий группы кишечной палочки (БГКП), сульфитвосстанавливающих клостридий, общему микробному числу, наличию синегнойной палочки [7].

В естественном состоянии исследуемые глины представляют собой рыхлую, глыбистую массу разнообразной окраски, влажностью не более 4,0 % с содержанием зольных компонентов до 96 %. Минеральных включений размером более 5 мм в большинстве проб не выявлено, содержание частиц размером более 0,25 мм отвечает требованиям, предъявляемым к лечебным грязям (не более 2-3 %). Результаты рентгеноструктурного анализа глин свидетельствуют о полидисперсном составе, представленном тонкочешуйчатым каолинитом, незначительно гидрослюдами, монтмориллонитом и минералами хлоритовой группы.

Основные физико-химические свойства глин исследовались после увлажнения их дистиллированной водой до оптимальной для апплицирования консистенции. При этом, показатель сопротивление сдвигу, отражая вязко-пластичные свойства глин, не должен превышать 4000 дин/см². Реакция среды (рН грязевого отжима), в основном, соответствовала щелочной (табл.1).

Таблица 1

Основные физико-химические свойства исследуемых глин

Объект, разновидности глин	Естественная влажность W, %	Подготовленных для процедур, W, %	Теплоёмкость, кал /г/град	Сопротивление сдвигу, дин/см ²	рН отжима	Зольность, А ^с , %
красная Апрельский Вагановский	1,60 2,38	54,4 41,7	0,63 0,53	3065 >4000	8,9 7,0	91,6 88,6
белая Апрельский Мусохрановский	1,64 3,16	47,3 36,2	0,58 0,49	3188 4905	7,9 8,5	87,0 94,5
серая Апрельский Моховский	1,30 3,48	34,5 27,4	0,47 0,41	1226 3065	8,6 8,9	96,1 92,0

Согласно результатам анализа (табл. 2), преобладающими компонентами химического состава исследуемых глин являются соединения кремния, железа и алюминия.

Таблица 2

Валовый состав глин (% на прокаленную навеску)

Участок лечебных глин	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅
красная									
Апрельский	48,20	29,97	17,0	0,85	0,02	2,74	0,43	0,75	0,01
Вагановский	30,37	41,55	22,0	0,75	0,01	3,92	0,44	0,78	0,02
белая									
Апрельский	51,35	41,73	0,70	0,79	0,01	3,67	0,11	1,54	0,02
Мусохранов- ский	67,30	26,91	0,64	0,10	0,03	3,74	0,10	1,09	0,02
серая									
Апрельский	61,76	30,39	2,57	0,40	0,02	2,79	0,31	1,57	0,01
Моховский	64,38	24,85	6,23	0,38	0,02	2,44	0,22	1,16	0,02

Известно, что благоприятные физические свойства (объемный вес, вязкость, пластичность, влажность, тепловые свойства) характерны для глин, в составе твердой фазы которых суммарно преобладают тонкие пылеватые фракции. По результатам гранулометрического анализа глин Кемеровской области, приведенных в таблице 3, суммарное содержание пыли и тонких иловых фракций составило от 50 % до 73 %.

Таблица 3

Гранулометрический состав глин Кемеровской области

Участок	Фракции в %, размер в мм			
	0,05-0,01 пыль крупная	0,01-0,005 пыль средняя	0,005-0,001 пыль мелкая	<0,001 ил
Апрельский	22,53	14,83	15,13	17,52
Моховской	21,53	7,69	28,44	15,11
Вагановский	15,3	8,81	13,28	28,49
Мусохрановский	10,52	4,68	18,70	39,43

Глинистые минералы обладают ярко выраженными ионно-обменными свойствами, что совместно с малым размером частиц и высокой удельной поверхностью определяет их повышенную адсорбционную способность. Это свойство позволяет использовать глины как природные высокоэффективные сорбенты. Адсорбционная способность исследованных глин колеблется в пределах от 7,0 до 36,0 мг/см³ (табл.4).

Информативные показатели качества исследованных глин

Участок лечеб- ных глин	Содержание Fe ₂ O ₃ , % на прока- ленную навеску	Содержание илистой фракции, % (менее 0,001 мм)	Содержание суммы пыле- ватых фрак- ций, % (менее 0,01 мм)	Адсорб- ционная способ- ность, мг/см ³	Железо- бактерии
красная Апрельский Вагановский	17,0 22,0	22,0 26,0	50,0 55,0	13,0 18,0	10 ² 10 ²
белая Апрельский Мусохранов- ский	0,7 0,6	12,0 38,0	43,0 56,0	15,5-22,0 6,9-36,0	10 1,0
серая Апрельский Моховский	2,6-6,2 6,0	не опр. 12,0	не опр. 50,0	9,0-22,0 22,0	10 ² 10

Одним из факторов отрицательного воздействия окружающей среды на человека является ионизирующее излучение, что требует предварительных испытаний по нормируемым естественным и техногенным радионуклидам (радий-226, уран-238, торий-232, цезий-137, стронций-90), тяжелым металлам (цинк, ртуть, свинец, кобальт, кадмий) в глинах. Согласно полученным результатам, их концентрации в исследованных глинах не превышали уровня естественного природного фона. Показатели санитарно-микробиологического состояния исследованных глин соответствуют нормативным требованиям.

По результатам изучения месторождений глин Сибирского региона определены наиболее информативные параметры их качества для целей медицины: отсутствие засоренности твердыми минеральными включениями диаметром более 5 мм; гранулометрический состав; адсорбционная способность, реакция среды; соответствие показателям безопасности (радиологическим, содержанию тяжелых металлов, санитарно-микробиологическим).

Таким образом, комплексные исследования месторождений глин Сибирского региона, позволят рекомендовать их для использования, как в нативном виде, так и в качестве лечебных композитов направленного действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лечебные грязи СССР. Пояснительная записка к карте лечебных грязей СССР масштаба 1: 8000000 - М., 1977. - 80 с.
2. Викулова М.Ф., Бурков Ю.К., Македонов А.В. и др. Фациальные типы глинистых пород (и их первичные литологические особенности). Л., «Недра», 1973. – 288 с
3. Дегенс Э. Т. Геохимия осадочных образований М., изд-во «Мир» 1967, 300 с.
4. Карманова Т.А. Этапы научного обоснования пелоидотерапии в условиях ОАО Санаторий «Краснозерский» / Т.А. Карманова, Т.Н. Морозова, Е.А. Курнявкина, В.Ю. Куликов // Сб. матер. НПК «Актуальные вопросы восстановительного лечения в Сибирском регионе». Омск. – 2008. – С. 113-114.

5. Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации. Методические указания № 2000/ 34. – М. - 2000. 73 с.
6. ГОСТ 30036.2 – 93. Каолин обогащенный. Метод определения показателя адсорбции. – Минск: Из-во стандартов, 1994.- 5 с.
7. Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу лечебных грязей МЗ РФ № 143-9/316-17.- М. -1989. 28 с.

REFERENCES

1. Lechebnye gryazi SSSR. Poyasnitel'naya zapiska k karte lechebnyh gryazej SSSR masshtaba 1: 8000000 - М., 1977. - 80 s.
2. Vikulova M.F., Burkov YU.K., Makedonov A.V. i dr. Facial'nye tipy glinistyh porod (i ih pervichnye litologicheskie osobennosti). Л., «Nedra», 1973. – 288 s
3. Degens E. T. Geohimiya osadochnyh obrazovanij М., izd-vo «Mir» 1967, 300 s.
4. Karmanova T.A. Etapy nauchnogo obosnovaniya peloidoterapii v usloviyah OAO Sanatorij «Krasnozerskij» / T.A. Karmanova, T.N. Morozova, E.A. Kurnyavkina, V.YU. Kulikov // Sb. mater. NPK «Aktual'nye voprosy vosstanovitel'nogo lecheniya v Sibirskom regione». Omsk. – 2008. – S. 113-114.
5. Klassifikaciya mineral'nyh vod i lechebnyh gryazej dlya celej ih sertifikacii. Metodicheskie ukazaniya № 2000/ 34. – М. - 2000. 73 s.
6. GOST 30036.2 – 93. Kaolin obogashchennyj. Metod opredeleniya pokazatelya adsorbicii. – Minsk: Iz-vo standartov, 1994.- 5 s.
7. Metodicheskie ukazaniya po sanitarno-mikrobiologicheskomu analizu lechebnyh gryazej MZ RF № 143-9/316-17.- М. - 1989. 28 s.

© М. Г. Бородина, Н. Г. Клоптова, Т. А. Пушкарёва, 2021

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА ТИХООКЕАНСКОЙ И ОХОТОМОРСКОЙ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Наталья Анатольевна Бушенкова

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

Ольга Анатольевна Кучай

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

Сейсмотектонические деформации в зоне субдукции Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит определены по данным о 2458 механизмах очагов землетрясений за период 1977–2019 гг. Показаны особенности деформирования среды по разным глубинным слоям. Выявлена однородность поля деформаций в диапазоне глубин 1-70 км и неоднородность поля деформаций для глубоких частей (105-200, 200-400 и 400-700 км) погружающейся плиты. Одной из причин изменения поля деформаций является влияние восходящих и, особенно, нисходящих течений теплогравитационной конвекция в подлитосферной части верхней мантии, в частности, влияние структуры конвекции на геометрию субдуцирующей части плиты.

Ключевые слова: механизмы очагов землетрясений, Тихоокеанская литосферная плита, сейсмичность зон конвергентных границ

SEISMOTECTONIC DEFORMATIONS IN THE PACIFIC AND OKHOTSK LITHOSPHERIC PLATES CONTACT ZONE

Natalia A. Bushenkova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Olga A. Kuchay

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

The seismotectonic deformations were determined in the Pacific and Okhotsk (Eurasian) lithospheric plates subduction zone based on 2458 mechanisms of earthquake foci data for 1977-2019. The deformation features of medium in different deep layers are shown. The deformation field uniformity in the depth range of 1-70 km and the deformation field inhomogeneity for the submerged plate deep parts (105-200, 200-400 and 400-700 km) are revealed. One of the deformations field change reasons is the influence of ascending and, especially, descending currents of thermogravitational convection in the upper mantle sublithospheric part, in particular, the convection structure influence on the subducting plate geometry

Keywords: focal mechanisms, Pacific lithospheric plate, convergent boundary zones seismicity

Работа посвящена исследованию характеристик деформирования зоны конвергентных границ Тихоокеанской плиты с Охотоморской и выявлению особенностей распределения Р- и Т-осей механизмов землетрясений в зависимости от направления вектора смещения Тихоокеанской плиты.

Как известно, пограничные области литосферных плит являются сейсмически активными. По мере погружения литосферной плиты количество сейсмических событий сокращается и глубина землетрясений в разных фрагментах погружающейся плиты существенно меняется. Конвергентная граница Тихоокеанской и Охотоморской плит проходит вдоль Курило-Камчатского и Японского желобов (рис. 1). На эту зону оказывает влияние северо-западное направление движения Тихоокеанской плиты и юго-восточное – Охотоморской. Движение Тихоокеанской плиты происходит примерно вкост Курило-Камчатской зоны контакта [1]. Японский желоб является продолжением Курило-Камчатского. Сегмент Тихоокеанской плиты погружается под о. Хоккайдо, где контактирует с Охотоморской плитой, и под северную часть о. Хонсю, где граничит с Евразийской плитой.

Достаточно давно известно о возникновении землетрясений сбросового типа в зонах изгиба погружающихся океанических плит [2]. Ранее было показано, что при крутом погружении сегмента литосферной плиты в области ее изгиба в очагах возникают сбросовые типы смещения. При уменьшении угла падения слэба сбросовые подвижки в очагах отсутствуют [3].

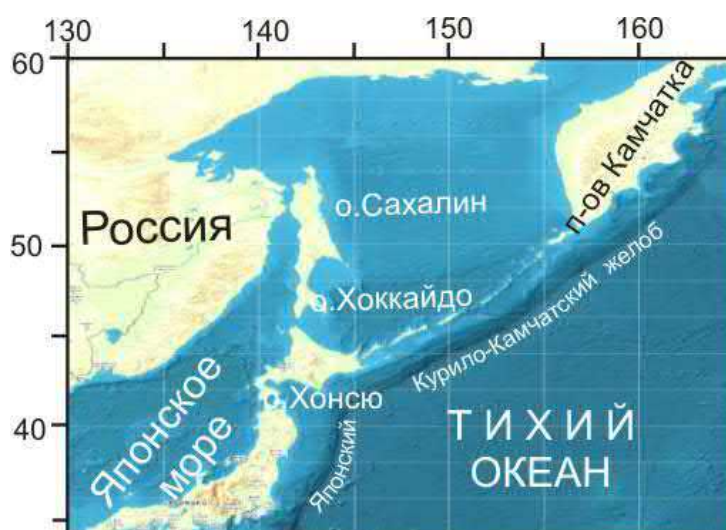


Рис. 1 Зоны конвергентных границ Тихоокеанской плиты с Охотоморской, расположение желобов в зоне контактов

Для анализа распределения типов подвижек в очагах использованы землетрясения с M_w 4.7-8.0 за период 1977- 2019 гг. из каталогов Международного сейсмологического центра (ISC) [<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms>]. Полученные материалы разделены на два типа по характеру смещения в очагах. Первый тип - землетрясения с надвиговой и сдвиго-надвиговой подвижками в очагах, второй – со сбросовыми и сдвиго-сбросовыми. Надвиговые и

сдвиго-надвиговые подвижки характеризуются близгоризонтальным расположением осей сжатия при изменении направлений осей растяжения, соответственно, от вертикального до близгоризонтального. Сбросовые и сдвиго-сбросовые подвижки имеют близгоризонтальные оси растяжения, а оси сжатия меняют свои направления от близвертикального до близгоризонтального.

Для выявления особенностей погружения субдуцирующей Тихоокеанской плиты по данным каталогов ISC за период с 1973 по 2019 гг. через Курило-Камчатский и Японский глубоководные желоба построены профили распределения землетрясений ($M \geq 4$) по глубине, в среднем через два градуса.

Угол погружения литосферной плиты в районе Курило-Камчатского желоба меняется незначительно, что согласуется с данными из работы [4]. В районе Японского желоба угол погружения оказывается более пологим и приобретает более крутое положение лишь в южной части. Анализ имеющихся данных показал, что несмотря на значительные изменения углов наклона погружающихся фрагментов Тихоокеанской плиты в зоне субдукции механизмы очагов землетрясений, произошедших в верхней части (до 35 км) океанической плиты в области ее изгиба, являются сбросовыми.

При исследовании ориентаций осей механизмов очагов землетрясений в разных слоях погружающейся Тихоокеанской плиты Р- и Т-оси учитывались следующим образом: при надвиговых и сдвиго-надвиговых подвижках в очагах привлечены только Р-оси механизмов очагов, при сбросовых и сдвиго-сбросовых – только Т-оси. Такая выборка позволяет использовать близгоризонтальные оси Р и Т и оси со средними углами с горизонтом, оставляя в стороне ориентацию близвертикальных Р и Т, азимут которых при построении решений механизмов очагов значительно меняется при малых изменениях положения нодальных плоскостей.

Исследование показало, что азимутальная ориентация Р-осей механизмов очагов землетрясений в верхней части зоны контакта литосферных плит (1-70 км) соответствует направлению вектора смещения Тихоокеанской плиты при погружении фрагментов этой плиты к западу-северо-западу (рис. 2). Глубже 70 км происходит изменение азимутальной ориентации осей сжатия в погружающейся плите: оси занимают разные азимутальные сектора. Оси Т ведут себя аналогично осям Р. В нижнем слое каждого фрагмента Тихоокеанской плиты происходит разворот осей Р в диапазонах глубин 200-700 км. В этих слоях увеличивается число землетрясений со сбросовыми подвижками в очагах [5], а ориентации осей Т принимают разнонаправленные азимутальные направления.

Восстановление поля сейсмотектонических деформаций (СТД) осуществлялось по отобранному из каталогов ISC данным о 2458 механизмах очагов землетрясений с магнитудой M_w 4.7-8.0, произошедших в районе исследования за период 1977-2019 гг. СТД рассчитывались с использованием методики, описанной в публикациях [4, 5, 6, 7, 8], с учетом величины сейсмического момента каждого землетрясения, размера площадок осреднения в 1° и разделения сейсмоактивного слоя по интервалам глубин: 1-35, 35-70, 71-105, 105-200, 201-400 и 401-700 км. Выбор мощности слоя определялся плотностью данных о механизмах очагов

землетрясений. Расчеты компонент деформаций для ячеек осреднения осуществлялись методом скользящего окна с шагом 0.5° . В пределах каждого элементарного объема рассчитывались величины компонент в географической системе координат. При построении карт максимальных значений в каждой ячейке выбирались СТД, наибольшие по абсолютной величине из трех диагональных компонент (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}).

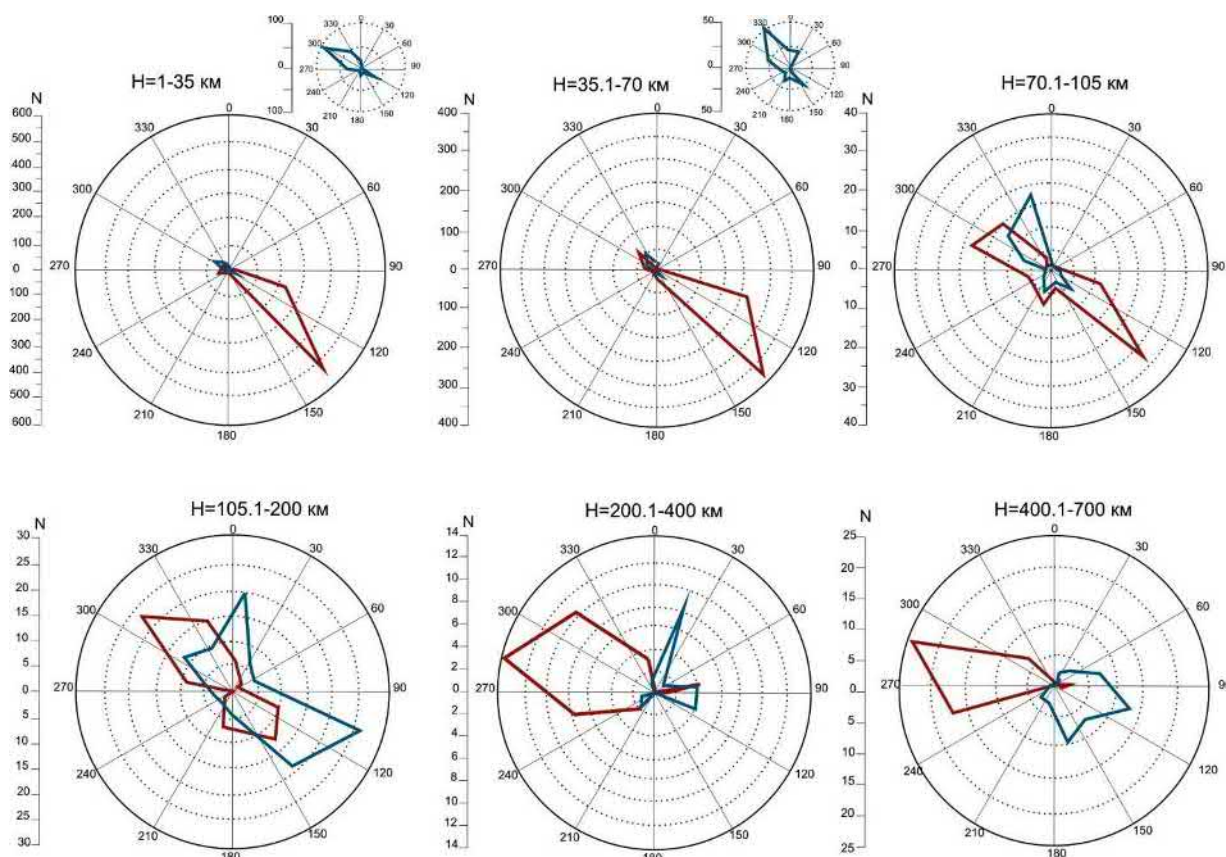


Рис. 2 Азимутальное распределение осей сжатия (Р, красный цвет) и растяжения (Т, синий цвет) в районе полуострова Камчатка, островов Хоккайдо и Курильских. Ориентация Р- и Т-осей построена по механизмам очагов землетрясений для нижней полусферы. На врезке дополнительно показано распределение осей растяжения

На основе данных о механизмах очагов землетрясений выполнен расчет СТД и выявлено, что поля широтной (E_{xx}) и вертикальной (E_{zz}) компонент деформаций, более однородные для глубин 1-70 км, характеризуются преимущественно широтным укорочением и вертикальным удлинением при чередовании областей удлинения и укорочения в поле меридиональной (E_{yy}) компоненты, в то время как для слоя 70-105 км объемы горных масс приобретают преимущественно меридиональное удлинение (рис. 3). Картина СТД резко меняется для глубоких (105-200, 200-400 и 400-700 км) частей погружающейся плиты,

наблюдаются неоднородные поля деформаций E_{xx} , E_{yy} и E_{zz} , с перемежающимися участками удлинений и укорочений.

Из трех диагональных компонент (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}) для верхнего диапазона глубин (1-70 км) наибольшие площади занимают области с максимальными значениями вертикального удлинения. Глубже 70 км для всей рассматриваемой территории наблюдается мозаичная картина, где происходит чередование объемов с максимальными значениями по компонентам E_{xx} , E_{yy} и E_{zz} .

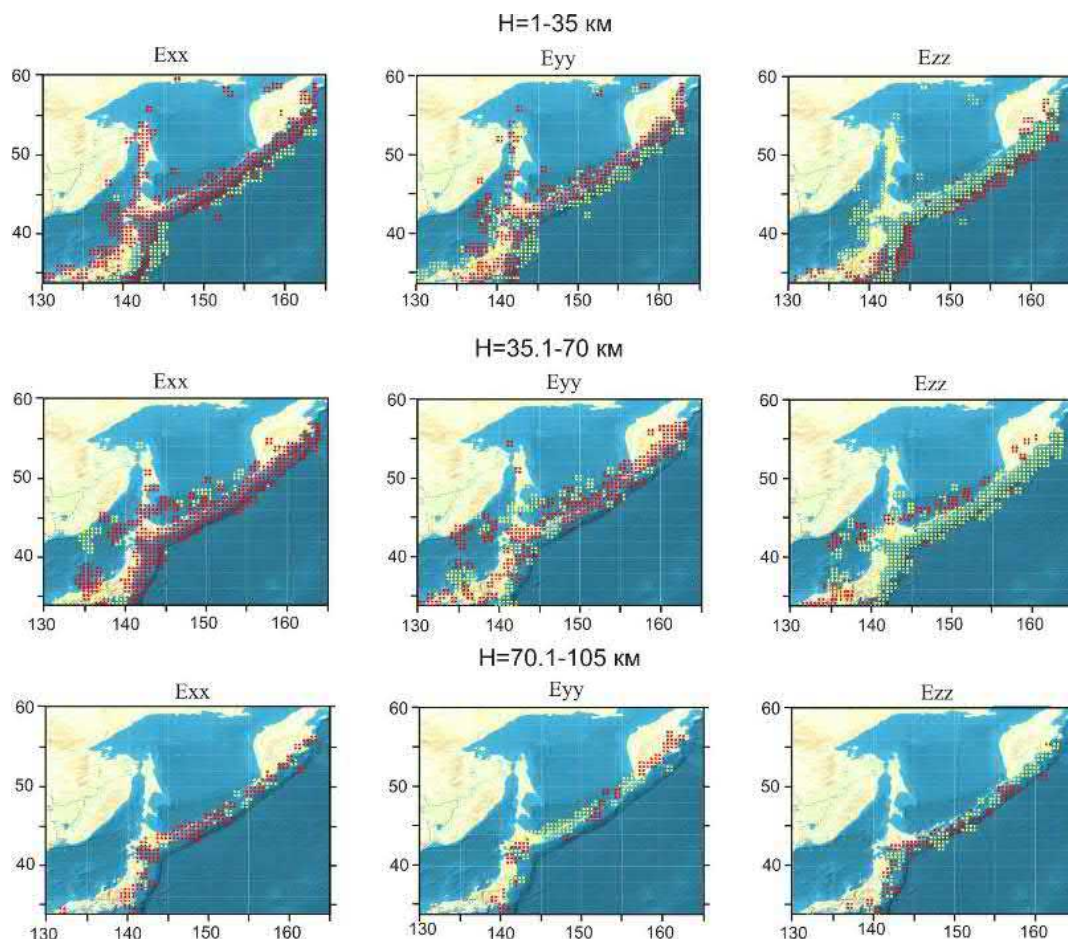


Рис. 3 Поле широтной (E_{xx}), меридиональной (E_{yy}) и вертикальной (E_{zz}) компонент СТД по данным механизмов очагов землетрясений ($M > 4.7$), зарегистрированных в 1976-2019 гг. в различных диапазонах глубин. Красными квадратами показаны области укорочения, зелеными – удлинения в соответствующих направлениях

Особенности распределения зон сейсмоактивности в погружающемся фрагменте плиты и смена типа землетрясений с глубиной, мы полагаем, связаны с изменениями геометрии слэба под влиянием мантийных процессов. Наличие областей перегиба слэба вкост его простираения на глубинах свыше 70 км обычно интерпретируют наличием зон фазовых переходов и вещественным составом субдуцирующей океанической плиты, сформированным на этапе ее созревания

и по разному реагирующим на повышение температуры (высвобождение воды, дегазация, частичное плавление и т.д.). Мы предлагаем добавить к причинам появления этих неоднородностей еще одну, которая может оказаться катализатором всех вышеперечисленных. В предыдущих работах мы исследовали взаимосвязь сейсмических характеристик в литосфере и процессов теплогравитационной конвекции в подлитосферной части верхней мантии. В результате мы обнаружили заметное влияние восходящих и, особенно, нисходящих течений конвекции на направленность главных осей СТД в очагах зарегистрированных землетрясений, отражающееся и в других геолого-геофизических характеристиках литосферы [9, 10, 11]. На рис. 4 мы представляем схему влияния структуры конвекции на геометрию субдуцирующей части плиты.

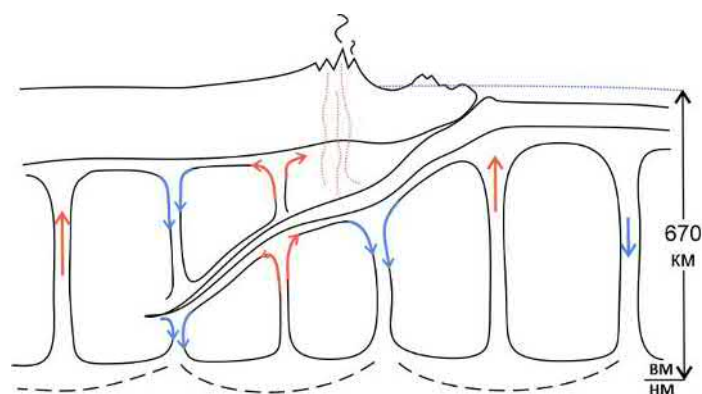


Рис. 4 Влияние структуры конвекции в верхней мантии на геометрию слэба (вертикальный срез вкрест субдукции), авторская схема. Черным пунктиром отмечены отдельные ячейки конвекции с восходящим потоком в центре и нисходящим по периферии ячейки

В местах контакта с восходящим потоком, вероятно, присутствует локальный нагрев слэба и повышение его пластичности (следовательно, уменьшение количества очагов землетрясений в самом слэбе с увеличением сейсмичности над ним за счет продвижения высвободившихся флюидов), локальное поднятие слэба и уменьшение угла его погружения. Поскольку восходящий поток конвективной ячейки находится в ее центре, что в горизонтальной проекции имеет локальное проявление, то в сейсмотомографических изображениях может проявляться «разрывом» в слэбе. В местах контакта с нисходящим потоком дополнительного прогрева нет, но будет накапливаться вертикальная «тянущая вниз» составляющая напряжений. Причем в горизонтальной проекции такие зоны имеют большую протяженность (это вся периферия конвективной ячейки), и вероятно, должны проявляться повышенной сейсмогенерацией с изменением направленности осей тензора СТД и сменой типов землетрясений на разных участках слэба.

Исследование выполнено при поддержке проектов ФНИ №№ 0331-2019-0006 и 0331-2019-0010

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Steblov G.M., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Grekova T.A. Dynamics of the KurilKamchatka Subduction Zone from GPS Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2010. – V. 46. – № 5. – С. 440–445. DOI: 10.1134/S1069351310050095.
2. Hayes, G. P., D. J. Wald, and R. L. Johnson Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries // *J. Geophys. Res.* – 2012. – 117. – B01302.
3. Dyadkov P.G., Kuchay O.A., Romanenko Y.M., Dzhumagaliyeva Z.S. Deformations in the Middle America Trench according to earthquake focal mechanisms and their features in the area of the 2017 Mw 8.2 Chiapas earthquake, Mexico // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – 11 (2). – P. 320–333.
4. Christova C.V. Spatial distribution of the contemporary stress field in the Kurile Wadati-Benioff zone by inversion of earthquake focal mechanisms // *Journal of Geodynamics*. – 2015. – V. 8. – P. 1-17.
5. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – 5 (2). – P. 469–506.
6. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
7. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
8. Kuchai O.A., Kozina M.E. Regional Features of Seismotectonic Deformations in East Asia Based on Earthquake Focal Mechanisms and Their Use for Geodynamic Zoning // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – 10. – P. 1491-1499.
9. Chervov V.V., Chernykh G.G., Bushenkova N.A., Koulakov I.Y. Numerical modelling of 3D convection in the upper Earth mantle under lithosphere of Eurasia // *Computational technologies*. – 2014. – V. 19. – № 5. – P. 101-114.
10. Бушенкова Н.А., Кучай О.А., Червов В.В. Роль неоднородной мощности литосферы в процессах субдукции: сопоставление сейсмотомографической и термогравитационной моделей верхней мантии с характером сейсмичности и сейсмотектоническими деформациями на примере Камчатского региона и Японии // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН (г. Москва, 3-7 октября 2016 г.): Материалы докладов конференции: В 2-х т.* – 2016. – Т. 1. – С. 369-374.
11. Bushenkova N.A., Kuchay O.A., Chervov V.V. Submeridional boundary zone in Asia: seismicity, lithosphere structure, and the distribution of convection flows in the upper mantle // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2018. – V. 9 (3). – P. 1007-1023. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0381.

REFERENCES

1. Steblov G.M., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Grekova T.A. Dynamics of the KurilKamchatka Subduction Zone from GPS Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2010. – V. 46. – № 5. – S. 440–445. DOI: 10.1134/S1069351310050095.
2. Hayes, G. P., D. J. Wald, and R. L. Johnson Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries // *J. Geophys. Res.* – 2012. – 117. – B01302.
3. Dyadkov P.G., Kuchay O.A., Romanenko Y.M., Dzhumagaliyeva Z.S. Deformations in the Middle America Trench according to earthquake focal mechanisms and their features in the area of the 2017 Mw 8.2 Chiapas earthquake, Mexico // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – 11(2). – 320–333.
4. Christova C.V. Spatial distribution of the contemporary stress field in the Kurile Wadati-Benioff zone by inversion of earthquake focal mechanisms // *Journal of Geodynamics*. – 2015. – V. 8. – P. 1-17.

5. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – 5 (2). – P. 469–506.
6. Rebeckij Yu.L. Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' gornyh massivov. M.: Akademiya, 2007. – 406 s.
7. Riznichenko Yu.V. Problemy sejsmologii. M.: Nauka, 1985. – 408 s.
8. Kuchai O.A., Kozina M.E. Regional Features of Seismotectonic Deformations in East Asia Based on Earthquake Focal Mechanisms and Their Use for Geodynamic Zoning // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – 10. – P. 1491-1499.
9. Chervov V.V., Chernykh G.G., Bushenkova N.A., Koulakov I.Y. Numerical modelling of 3D convection in the upper Earth mantle under lithosphere of Eurasia // *Computational technologies*. – 2014. – V. 19. – № 5. – P. 101-114.
10. Bushenkova N.A., Kuchay O.A., Chervov V.V. Rol' neodnorodnoi moshnosti litosferu v protsessax subdukcii: sopostavlenie seismotomographicheskoi i termogravitatsionnoi modelei verkhnei mantii s harakterom seismichnosti i seismotektonicheskimi deformatciyami na primere Kamchatskogo regiona i Yaponii // *Tectonophizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle. Chetvertaya tektonofizicheskaya konferencia v IFZ RAN (g. Moskva, 3-7 oktyabrya 2016 g.: Materialy dokladov konferencii v 2-h t.* – 2016. – T. 1. – S. 369-374.
11. Bushenkova N.A., Kuchay O.A., Chervov V.V. Submeridional boundary zone in Asia: seismicity, lithosphere structure, and the distribution of convection flows in the upper mantle // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2018. – V. 9 (3). – P. 1007-1023. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0381.

© *Н. А. Бушенкова, О. А. Кучай, 2021*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОЙ ДИСПЕРСИИ В ЗАДАЧЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛНЫХ ВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Ксения Александровна Гадыльшина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, тел.: (383)330-27-96, e-mail: gadylshinaka@ipgg.sbras.ru

Кирилл Геннадьевич Гадыльшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, тел.: (383)330-27-96, e-mail: gadylshinkg@ipgg.sbras.ru

Лисица Вадим Викторович

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Михайлович Вишневский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел.: (383)330-00-54, e-mail: VishnevskyDM@ipgg.sbras.ru

Численное моделирование требует большого объема вычислительных ресурсов. В этом смысле оно является одной из самых тяжелых процедур сейсмической обработки. Обычно создание набора сейсмических данных требует приблизительно 10^8 ядро-часов на типичном вычислительном кластере. Такие высокие требования возникают из-за необходимости использовать в расчетах пространственные сетки с мелким шагом с целью уменьшения численной дисперсии. В этой работе представлен новый подход к сейсмическому моделированию, в котором волновые поля для всех источников моделируются на грубой сетке с относительно большим шагом по пространству. Небольшое количество синтетических сейсмограмм рассчитывается на сетке с шагом по пространству, достаточным для получения корректного результата моделирования. Эти данные используются для обучения искусственной нейронной сети (ИНС). Обученная ИНС используется далее для уменьшения численной дисперсии для волновых полей, рассчитанных на грубой сетке.

Ключевые слова: полноволновое моделирование, численная дисперсия, машинное обучение

DEEP LEARNING-BASED NUMERICAL DISPERSION MITIGATION IN SEISMIC MODELLING

Kseniia A. Gadylshina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia Engineer, tel.: 8 (383) 330-27-96, e-mail: gadylshinaka@ipgg.sbras.ru

Kirill G. Gadylshin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, tel.: 8 (383) 330-27-96, e-mail: gadylshin@gmail.com

Vadim V. Lisitsa

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia, 4, Akademika Koptyuga Ave, PhD, Senior Researcher, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Dmitry M. Vishnevsky

Akademika Koptyuga Ave, Researcher, tel.: 8 (383) 330-00-54, e-mail: VishevskyDM@ipgg.sbras.ru

Seismic modelling is the most computationally intense and time consuming part of seismic processing and imaging algorithms. Indeed, generation of a typical seismic data-set requires approximately 10^8 core-hours of a standard CPU-based clusters. Such a high demand in the resources is due to the use of fine spatial discretizations to achieve a low level of numerical dispersion (numerical error). This paper presents an original approach to seismic modelling where the wavefields for all sources (right-hand sides) are simulated inaccurately using coarse meshes. A small number of the wavefields are generated with computationally intense fine-meshes and then used as a training dataset for the Deep Learning algorithm - Numerical Dispersion Mitigation network (NDM-net). Being trained, the NDM-net is applied to suppress the numerical dispersion of the entire seismic dataset.

Keywords: seismic modelling, numerical dispersion, machine learning

Введение

Сейсмическое моделирование является инструментом исследования особенностей распространения сейсмических волн в реалистичных моделях земных недр [1], [2], [3], верификации алгоритмов обработки и инверсии сейсмических данных, а также как составляющая методов инверсии [4]. В то же время, моделирование распространения сейсмических волн в сложных средах – это одна из задач, требующих наиболее интенсивного использования высокопроизводительных вычислений. Например, если рассматривать типичную систему наблюдений, необходимо рассчитывать волновые поля для сотен тысяч сейсмических источников. Каждое моделирование сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ) выполняется в области размером около 10^3 км, что соответствует 100^3 длинам волн. Таким образом, для получения достаточно точных численных результатов необходимо до $8 \cdot 10^9$ узлов сетки. Уменьшение размерности задачи за счет увеличения шага сетки приводит к росту численной ошибки, что может полностью разрушить решение. Есть разные способы уменьшения численной дисперсии, например, использование разностных схем высокого порядка [5], схемы подавления дисперсии [6], методы конечных элементов высокого порядка и разрывные методы Галеркина [7], [8], [9]. Однако, повышение точности решения не только требует больших затрат вычислительных ресурсов, но и может повлечь ошибки из-за частого обращения к ОЗУ и увеличение количества операций с плавающей точкой.

Другой способ уменьшить численную дисперсию в смоделированных волновых полях – это постобработка [10], [11]. Но необходимо отметить, что

стандартные процедуры коррекции формы волны, используемые при обработке сейсмических данных, неэффективны для уменьшения численной дисперсии. Ошибка, связанная с численной дисперсией, зависит от пути распространения волны, модели скорости и т.д. Таким образом, она не может быть компенсирована только однофазным сдвигом. В этой статье мы предлагаем подход к постобработке, основанный на методе глубокого обучения.

Метод глубокого обучения широко применяется в различных областях науки. Обучившись на большом репрезентативном наборе данных, глубокие искусственные нейронные сети могут аппроксимировать сложные нелинейные операторы в рамках контролируемого процесса обучения с учителем. Эти ИНС способны изучать нелинейную физику процесса и обычно обеспечивают гораздо более быстрые вычисления, чем традиционное моделирование [12], [13].

Для разработки эффективного алгоритма уменьшения численной дисперсии мы используем следующую особенность сейсмического моделирования. Полный набор сейсмических данных включает сейсмограммы, соответствующие различным положениям источников. Эти позиции относительно близки друг к другу (от 10 до 100 м друг от друга). Таким образом, скоростные модели и смоделированные волновые поля подобны, если источник расположен поблизости. Это позволяет использовать небольшое количество источников для моделирования точного решения, которое будет использоваться в качестве обучающего набора данных. В то же время мы можем смоделировать весь набор данных, используя достаточно грубую сетку, обучить глубокую нейронную сеть, а затем обработать данные (провести над данными постобработку).

1. Искусственная нейронная сеть для уменьшения численной дисперсии.

Сверточные ИНС обычно применяются для анализа визуальных образов. Особым случаем сверточных ИНС является сеть U-Net [14], которая изначально была изобретена для сегментации биомедицинских изображений. В настоящее время U-Net и ее модификации имеют широкое применение в сейсмической инверсии, обработке и интерпретации сейсмических данных до суммирования. В этой работе мы предлагаем использовать глубокую нейронную сеть Numerical Dispersion Mitigation (NDM-net) для изучения сопоставления синтетических сейсмических данных, смоделированных на грубой сетке, и данных, смоделированных на мелкой сетке. Другими словами, мы планируем устранить численную дисперсию с помощью ИИ. Архитектура сети аналогична представленной в [15]. Различия заключаются в использовании обычного сверточного слоя вместо частичных сверток и разных размерностей ввода/вывода, см. рис. 1. Эта ИНС содержит 16 сверточных слоев, восемь слоев повышающей дискретизации и восемь слоев конкатенации. Размеры входного и выходного тензоров $1250 \times 512 \times 2$. Функция активации для первых восьми сверточных слоев (на которых происходит кодирование или извлечение признаков) - это ReLU. Последние восемь сверточных слоев (часть декодирования) имеют активацию LeakyReLU с отрицательным коэффициентом наклона, равным 0,2. Мы реализовали NDM-сеть в TensorFlow. Веса ИНС инициализированы случайным образом. В обучении использовался алгоритм стохастической оптимизации Адама.

В текущей реализации мы рассматриваем ввод/вывод как регулярные дискретизированные сейсмические данные до суммирования. Для обучения мы использовали каждую 10ю сейсмограмму ОПВ, рассчитанную на мелкой сетке, и ее искаженную версию, смоделированную на крупной сетке. Каждая сейсмограмма преобразуется в тензор размером $1250 \times 512 \times 2$. Здесь 1250 - количество временных отсчетов в данных (дискретизация по времени 4 мс и время записи 5 с), 512 - количество приемников 2С, а 2 - количество записанных компонентов (вертикальная и горизонтальная составляющие скорости). Затем мы разбиваем этот набор данных на обучающий и проверочный наборы данных.

2. Численный эксперимент.

В нашем эксперименте мы рассматриваем модель с вертикальными высоконтрастными интрузиями, вызывающими латеральную неоднородность, как показано на рис. 2. Размер всей модели составлял 220 км на 2,6 км. В набор вошел 1901 источник с дистанцией между источниками 100 м. Волновое поле регистрировалось 512 приемниками для каждого источника с максимальным удалением от источника до приемника равным 6,4 км. Расстояние между приемниками – 25 м. В этом исследовании мы моделировали волновое поле без поверхностных волн, используя идеально согласованный слой для $x < 0$. Источником вейвлета был импульс Рикера с центральной частотой 30 Гц.

Модель представлена на сетке с шагом 50 м по горизонтали и 5 м по вертикали. Мы вычислили три набора данных, используя схему на сдвинутых сетках четвертого порядка [5]. Решение, полученное на сетке с шагом 2,5 м, рассматривается как точное, в то время как два других, полученные с использованием сеток с пространственным шагом 5 м и 10 м, как неточные. Примеры данных сейсмограмм на рис. 3. Две NDM-сети обучались на двух синтетических наборах данных. Один был разработан для сопоставления данных, смоделированных для сетки с шагом 5 м, с точным решением (данные, полученные на сетке с шагом 2,5 м). Другая сеть NDM была обучена отображать 10м-данные на 2,5м-данные. Обучение проводилось на графическом процессоре Nvidia V100.

В качестве регуляризации использовалась техника ранней остановки, и обучение прерывалось, когда ошибка на проверочном наборе начинала расти. В обоих случаях (от 5 до 2,5 м и от 10 до 2,5 м) тренировочный процесс занял около 40 минут. Время прогнозирования составляет около 0,7 секунды для одной полной сейсмограммы ОПВ, в то время как одно прямое моделирование с использованием конечно-разностного подхода на графическом процессоре заняло около 40 секунд на сетке 2,5 м, и около 5 секунд на сетке 5 метров.

Чтобы оценить качество предсказания ИНС, мы используем нормализованное RMS (NRMS) в качестве меры сходства наборов данных. NRMS – это строгая метрика для каждой выборки, используемая для оценки повторяемости между двумя наборами данных в 4D сейсмике [16].

Приемлемый уровень NRMS в 4D сейсмике составляет около 20-40 процентов. Поскольку основная ошибка накапливается в позднем периоде, мы вычисляем NRMS для временного диапазона от 3 до 5 секунд (красный прямоугольник на рис. 4). Соответствующий график NRMS представлен на рис. 4. В среднем

NRMS между данными 2,5 м и 5 м составляет 65%. Применение NDM-net снизило NRMS до 30%. Среднее значение NRMS между 10-метровыми данными и 2,5-метровыми данными было около 120%, что означает, что 10-метровые данные чрезвычайно далеки от истинного решения. В результате ИНС удалось снизить NRMS до уровня 90%. Результат постобработки данных при помощи NDM-net проиллюстрирован на рис. 5.

3. Обсуждение и выводы.

В статье описан оригинальный метод уменьшения численной дисперсии синтетических сейсмограмм. Он включает в себя обычное конечно-разностное сейсмическое моделирование с последующей коррекцией данных на основе ИИ.

На первом этапе мы генерируем обучающий набор данных, моделирующий волновые поля, соответствующие не более чем 10% положений источников, с использованием достаточно точной пространственной дискретизации (до 20 точек на минимальную длину волны - prw). Затем создается полный набор данных с использованием грубой сетки не более 3-5 prw . И, в конце концов, NDM-сеть обучается уменьшать численную дисперсию в решении на крупной сетке. После этого NDM-net применяется для исправления всего набора данных. Представленные результаты демонстрируют способность NDM-net делать качественный прогноз сейсмических данных с использованием синтетики, сгенерированной на грубой сетке.

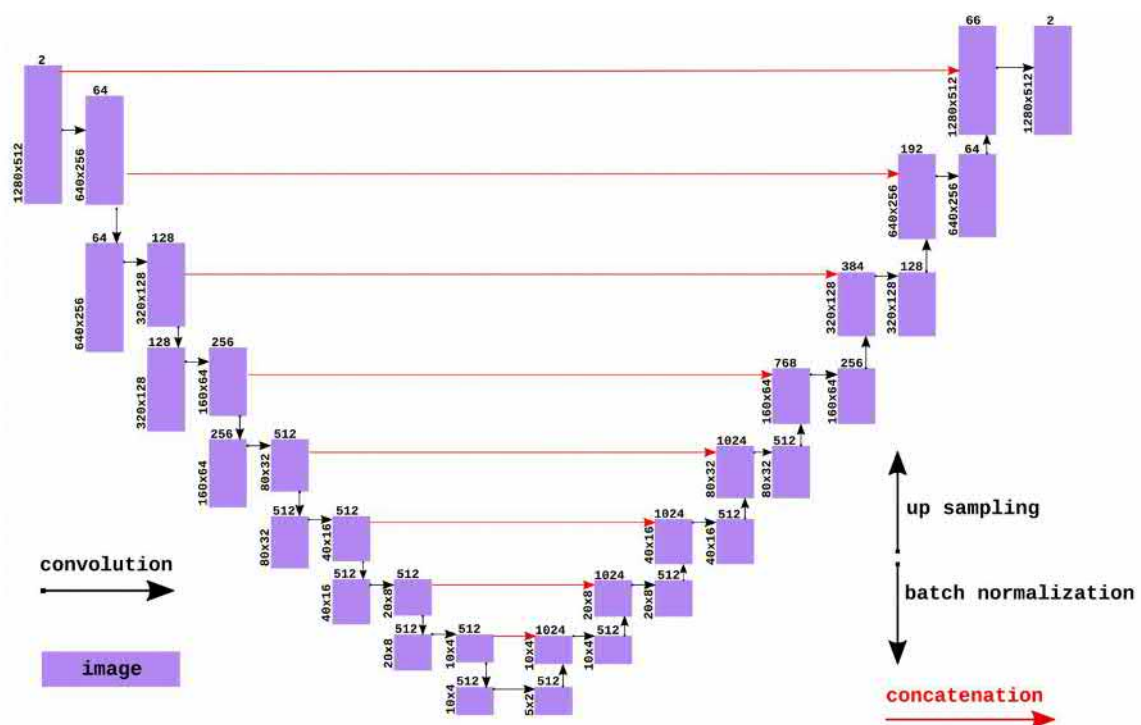


Рис. 1. Архитектура NDM-net. Черные стрелки вправо изображают оператор свертки, красные стрелки – конкатенация. Стрелки вверх и вниз изображают операторы повышающей дискретизации и пакетной нормализации соответственно

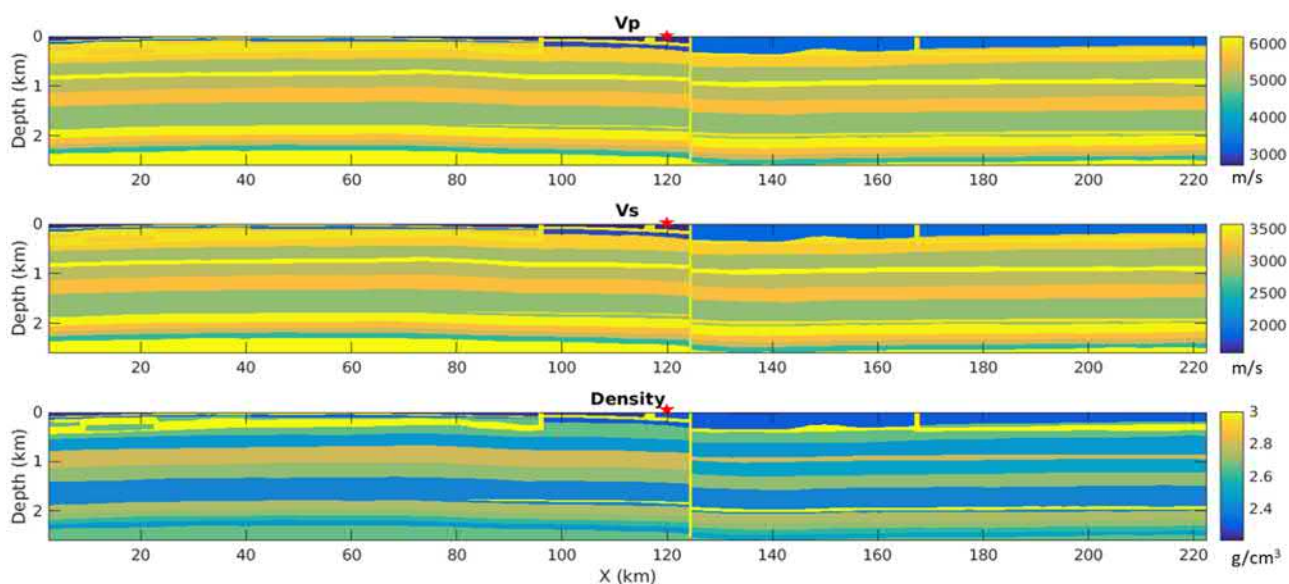


Рис. 2. Изотропная упругая модель, используемая для расчёта синтетических сейсмограмм. Красным изображено положение источника для $x=120\text{ км}$

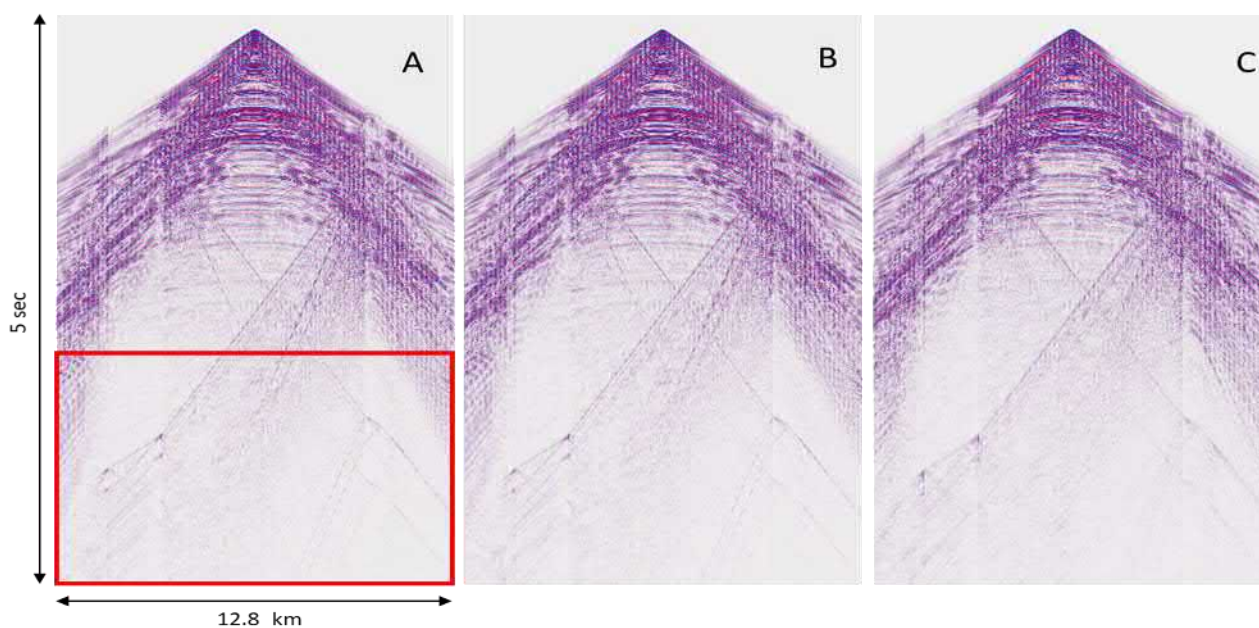


Рис. 3. Сейсмограмма, рассчитанная для источника, расположенного в точке $x=120\text{ км}$: вертикальная компонента скорости, рассчитанная на сетке с шагами 2.5м (A), 5м (B) и 10м (C)

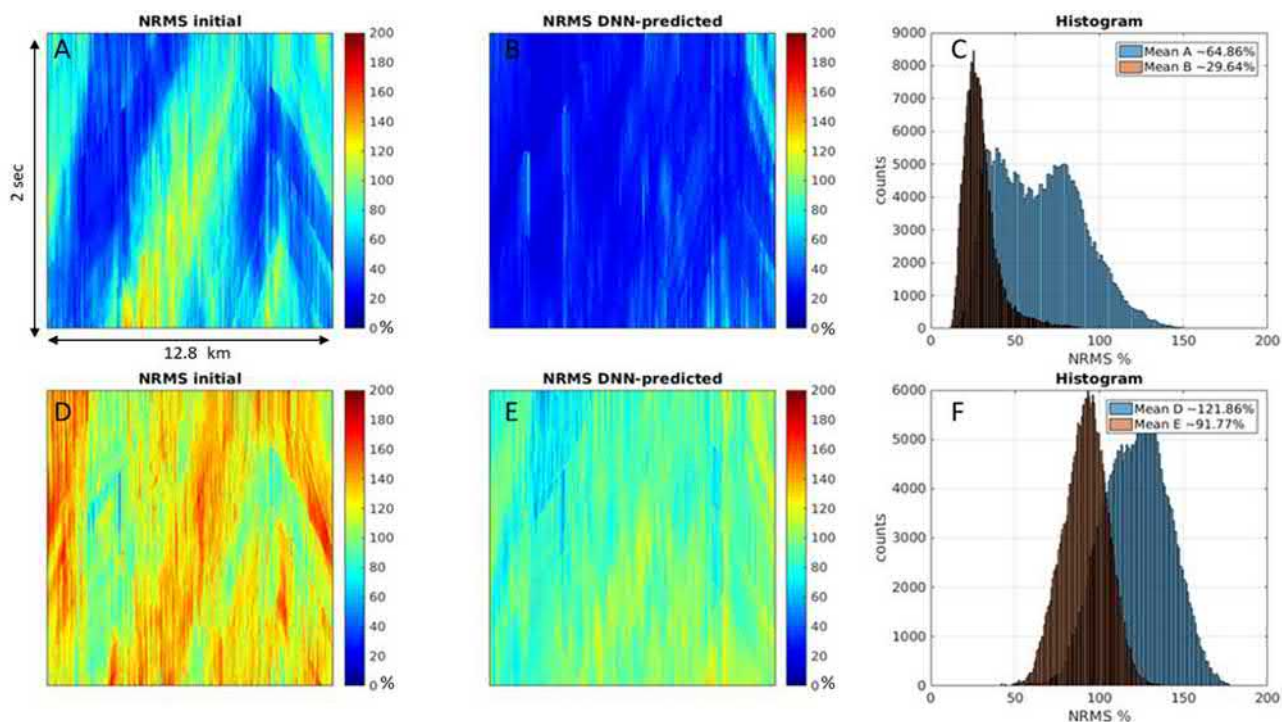


Рис. 4. NRMS рассчитанный между сейсмограммами для сеток 2.5м и 5м (A), 2.5м и ИНС прогнозом 5м (B) , между данными 2.5м и 10м (D), 2.5м и ИНС прогнозом 10м (E) и соответствующие гистограммы (C,F). NRMS рассчитан в окне, изображенном красным на рис. 3 (поздние вступления)

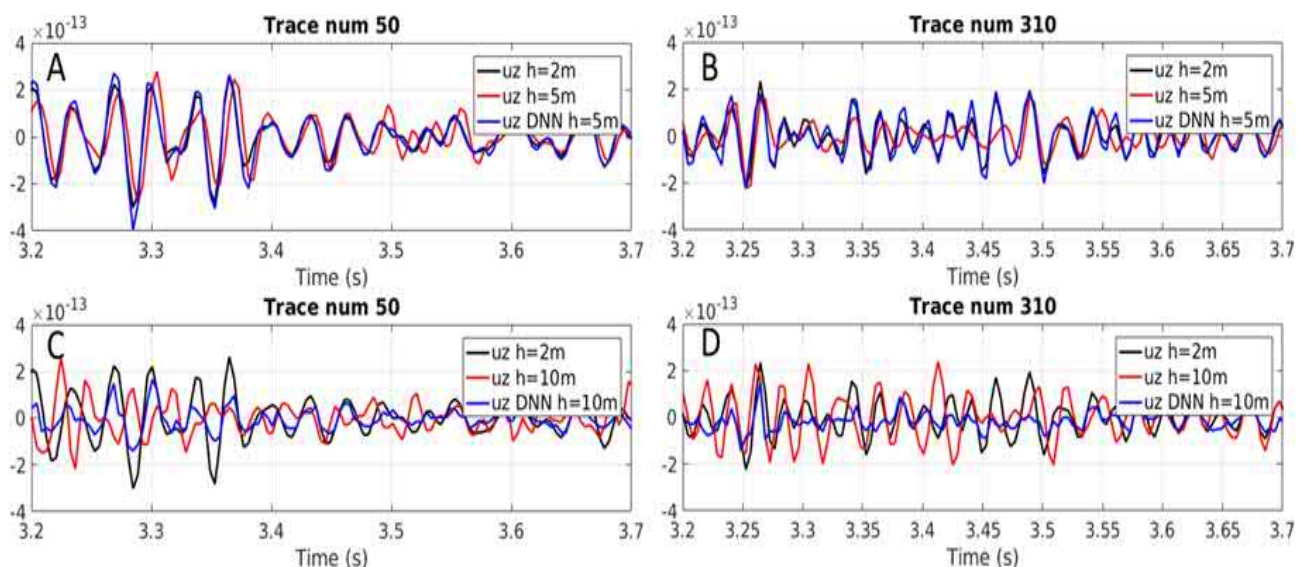


Рис. 5. Сейсмические трассы для разных положений приемников и соответствующий ИНС прогноз для случая 5м-данных (A, B) и 10м-данных (C, D). Черным изображены трассы на сетке 2.5м, красным – входные данные для ИНС и синим – ИНС прогноз

Благодарности

Д.М. Вишнеvский выполнил все эксперименты по численному моделированию волновых полей. В.В. Лисица подготовил обучающий набор для ИНС при поддержке Российского Научного Фонда грант № 21-71-20003. К.А. Гадылышина выполнила обучение NDM-net при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта №20-55-26003. К.Г. Гадылышин разработал архитектуру NDM-net при поддержке Российского Научного Фонда грант № 21-71-20002. Численные расчёты были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru). Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and GACR, project number 20-55-26003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhu, J., Ren, M., Liao, Z.: Wave propagation and diffraction through non-persistent rock joints: An analytical and numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 132, 104362 (2020)
2. Chen, G., Song, L., Liu, L.: 3d numerical simulation of elastic wave propagation in discrete fracture network rocks. *Pure and Applied Geophysics* 176(12), 5377–5390 (2019)
3. Lisitsa, V., Kolyukhin, D., Tcheverda, V.: Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 116, 86–95 (2019)
4. Virieux, J., Calandra, H., Plessix, R.E.: A review of the spectral, pseudo-spectral, finite-difference and finite-element modelling techniques for geophysical imaging. *Geophysical Prospecting* 59(5), 794–813 (2011). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.00967.x>
5. Levander, A.R.: Fourth-order finite-difference p-sv seismograms. *Geophysics* 53(11), 1425–1436 (1988)
6. Liu, Y.: Optimal staggered-grid finite-difference schemes based on least-squares for wave equation modelling. *Geophysical Journal International* 197(2), 1033–1047 (2014)
7. Kaser, M., Dumbser, M.: An arbitrary high-order discontinuous galerkin method for elastic waves on unstructured meshes - i. the two-dimensional isotropic case with external source terms. *Geophysical Journal International* 166(2), 855–877 (2006)
8. Baldassari, C., Barucq, H., Calandra, H., Diaz, J.: Numerical performances of a hybrid local-time stepping strategy applied to the reverse time migration. *Geophysical Prospecting* 59(5), 907–919 (2011). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.00975.x>
9. Lisitsa, V., Tcheverda, V., Botter, C.: Combination of the discontinuous galerkin method with finite differences for simulation of seismic wave propagation. *Journal of Computational Physics* 311, 142–157 (2016)
10. Xu, Z., Jiao, K., Cheng, X., Sun, D., King, R., Nichols, D., Vigh, D.: Time-dispersion filter for finite-difference modeling and reverse time migration, pp. 4448–4452 (2017)
11. Koene, E., Robertsson, J.: Removing numerical dispersion artifacts from reverse time migration and full-waveform inversion, pp. 4143–4147 (2017)
12. Guo, X., Li, W., Iorio, F.: Convolutional neural networks for steady flow approximation. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – KDD '16*, San Francisco, CA, USA. pp. 481–490 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/2939672.2939738>
13. Moseley, B., Nissen-Meyer, T., Markham, A.: Deep learning for fast simulation of seismic waves in complex media. *Solid Earth* 11, 1527–1549 (2020)
14. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*.

LNCS, vol. 9351, pp. 234–241. Springer (2015), <http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/Publications/2015/RFB15a>

15. Gadylshin, K., Silvestrov, I., Bakulin, A.: Inpainting of local wavefront attributes using artificial intelligence for enhancement of massive 3-d prestack seismic data. *Geophysical Journal International* 223, 1888–1898 (2020)

16. Kragh, E., Christie, P.: Seismic repeatability, normalized rms, and predictability. *The Leading Edge* 21(7), 640–647 (2002)

© *К. А. Гадильшина, К. Г. Гадильшин, В. В. Лисица, Д. М. Вишневский, 2021*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРЕН НА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЯМР ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Никита Александрович Голиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, старший научный сотрудник, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель кафедры геологии месторождений нефти и газа; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, доцент кафедры геоинформационных систем

Тимофей Александрович Якушенко

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент геолого-геофизического факультета, e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

В статье описаны результаты исследований петрофизических свойств и изучения образцов методом ядерно-магнитный резонанса (ЯМР). Измерения проведены на коллекции искусственных образцов с различающимся размером зерен. Описаны методика изготовления образцов, приведено сопоставление результатов измерения петрофизических свойств разными методами. Исследованы количественные связи между размером зерен песка, из которого изготовлены образцы, фильтрационно-емкостными свойствами и распределением времен релаксации ЯМР спектра образцов.

Ключевые слова: петрофизические свойства, размер зерен, ядерно-магнитный резонанс, время релаксации

STUDY OF THE INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON PETROPHYSICAL PROPERTIES AND NMR CHARACTERISTICS OF ARTIFICIAL SAMPLES

Nikita A. Golikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, Senior Lecturer, Department of Geology of Oil and Gas Fields; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, Associate Professor of the Department of Geographic Information Systems, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Timofey A. Yanushenko

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, Department of Geology and Geophysics, student e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of studies of petrophysical properties and the study of samples by the method of nuclear magnetic resonance (NMR). The measurements were carried out on a collection of artificial core samples with different grain sizes. The procedure for preparing the samples is described, and the comparison of the results of measuring the petrophysical properties by different methods is given. The quantitative relationships between the size of the sand grains from which the samples are made, the filtration-capacity properties and the distribution of the relaxation times of the NMR spectrum of the samples are investigated.

Keywords: petrophysical properties, grain size, nuclear magnetic resonance, relaxation time

Метод ЯМР-релаксометрии является относительно новым методом исследования структуры порового пространства коллекторов нефти и газа. Метод основан на зависимости времен релаксации ядер атомов водорода во внешнем магнитном поле от расстояния до поверхности пор. Результатом ЯМР-измерений является релаксационная кривая, из которой при помощи математических преобразований получают распределение времен релаксации [1,2]. Интерпретация данных ЯМР основана на представлении порового пространства в виде набора сфер различного диаметра, что принципиально не соответствует структуре гранулярных горных пород. Сложное строение скелета учитывается с помощью параметра «релаксивности», что требует отдельного измерения этой величины. Поэтому возникает задача установления связей между параметрами структуры зернистых горных пород (частности размером зерен) и результатами стандартной интерпретации релаксационной кривой ЯМР [3].

Для проведения исследований создана коллекция искусственных образцов (10 штук) из песка различной фракции (с диаметром песчинок от 1мм до 0,04мм) кондиционированных криогелем [4]. Для изготовления образцов отмытый и просушенный песок сначала рассеивали на наборе сит. Из каждой фракции отбирали порцию песка и утрямбовывали во влажном виде в специальные цилиндрические формы одинакового размера. Отмеренные таким образом порции просушивали и смешивали с 10% раствором криогеля ПВС-10. Количество криогеля рассчитывали, так, чтобы его объем составил 36% общего объема образца, что соответствует естественной пористости утрямбованного песка. Смесь тщательно утрямбовывали в формы и подвергали 5 –циклам заморозки- разморозки. Каждый цикл длился 24 часа, что гарантировало полное промерзание и оттаивания образцов. Затем образцы сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянного веса. При сушке из образца удаляется вода, входящая в состав криогеля (90% по объему) и образуется пустое поровое пространство.

Измерение фильтрационно-емкостных свойств проводилось по стандартным методикам

Таблица 1

Характеристика образцов

Образец	Размер сита	Фракция	Средний размер зерен, мм
Д1	1-0,630	Крупная фракция	0,815
Д2	0,630-0,315		0,4725
Д3	0,315-0,250		0,2825
Д4	0,250-0,200	Средняя фракция	0,225
Д5	0,200-0,160		0,18
Д6	0,160-0,125		0,1425
Д7	0,125-0,100	Мелкая фракция	0,1125
Д8	0,100-0,063		0,0815
Д9	0,063-0,050		0,0565

Пористость и проницаемость сухих образцов по гелию измерена газовольюметрическим методом на установке АР-608, позволяющей измерить оба параметра одновременно. Кроме того, измерена проницаемость по газу на установке Горояна (ГОСТ 26450.2-85) и пористость методом жидконасыщения (ГОСТ 26450.1-85), при этом образцы насыщали водой с минерализацией 30 г/л и затем проведены исследования на ЯМР спектрометре МСТ 025 при 100% насыщенности

Затем ЯМР исследования проводили повторно при остаточной водонасыщенности, которая создавалась методом центрифугирования

Результаты измерений петрофизических свойств представлены в табл. 2 и рис.1.

Как видно из приведенных данных, пористость и проницаемость при измерении разными методами различны. Пористость по жидконасыщению занижена по сравнению с прибором АР-608,

Таблица 2

Пористость и проницаемость образцов, измеренная разными методами

Образец	Фракция мм	АР-608		ГОСТ 26450 -85		ЯМР
		Кп, %	Кпр, Д	Кп, %	Кпр, Д	Кп, %
Д1	0.815	38.06	28.6	34.4	11.7	24.34
Д2	0.4725	38.83	19.1	36.6	17.3	30.94
Д3	0.2825	40.16	8.8	33.2	7.9	29.2
Д4	0.225	43.07	2.2	36.2	2.5	31.48
Д5	0.18	44.04	1.8	33.8	2.4	28.08
Д6	0.1425	45	2	35.4	2.5	27.29
Д7	0.1125	45.77	3.3	40.8	4.5	10.86
Д8	0.0815	42.55	0.9	37.6	1.1	4.76
Д9	0.0565	43.11	2	42.7	2.6	14.55

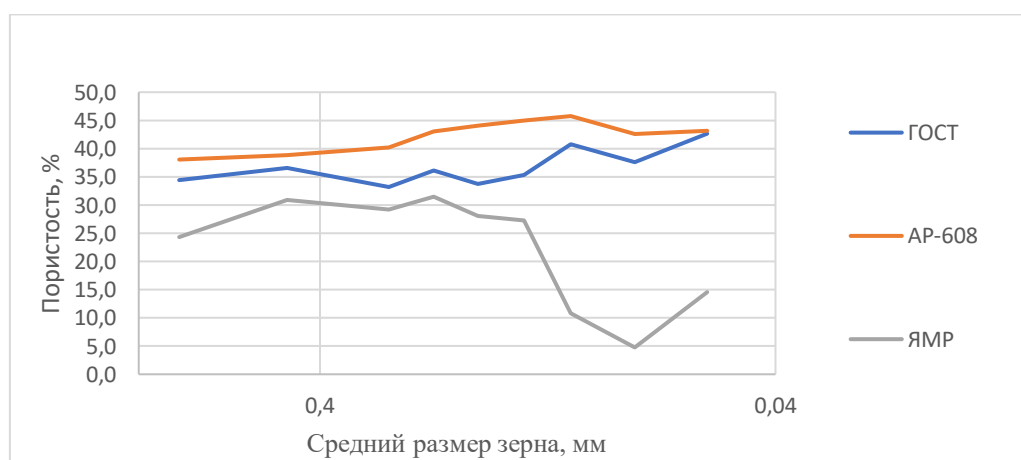


Рис.1. Пористость образцов, измеренная разными методами

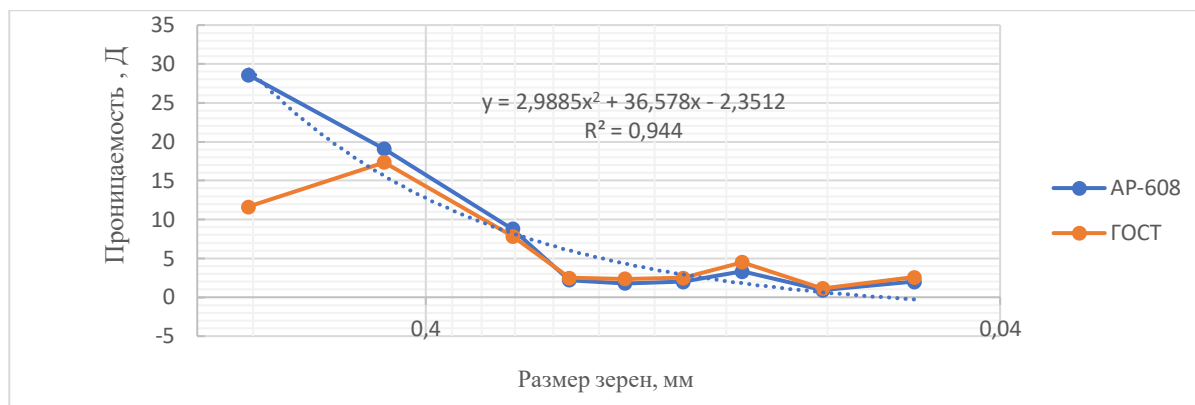


Рис. 2. Проницаемость образцов, измеренная разными методами

Проницаемость образцов, измеренная по ГОСТ26450.1-85 и порозиметром AP-608, отличаются незначительно, кроме образца Д1, который имеет очень большую проницаемость, выходящую за диапазон метода.

Проницаемость образцов закономерно уменьшается с уменьшением размера зерен по квадратичному закону с коэффициентом корреляции $R=0,97$, что согласуется теоретической зависимостью проницаемости от размера зерен Слихтера. При этом проницаемость образцов с размером зерен $< 0,225$ мм остается приблизительно постоянной. По-видимому, это связано с наличием в порах криогеля.

Структура порового пространства, наряду с пористостью и проницаемостью, определяет количество связанной воды, которая остается неподвижной в коллекторе при фильтрации через него воды и нефти (газа). Результаты измерения водонасыщенности приведены на рис. 3.

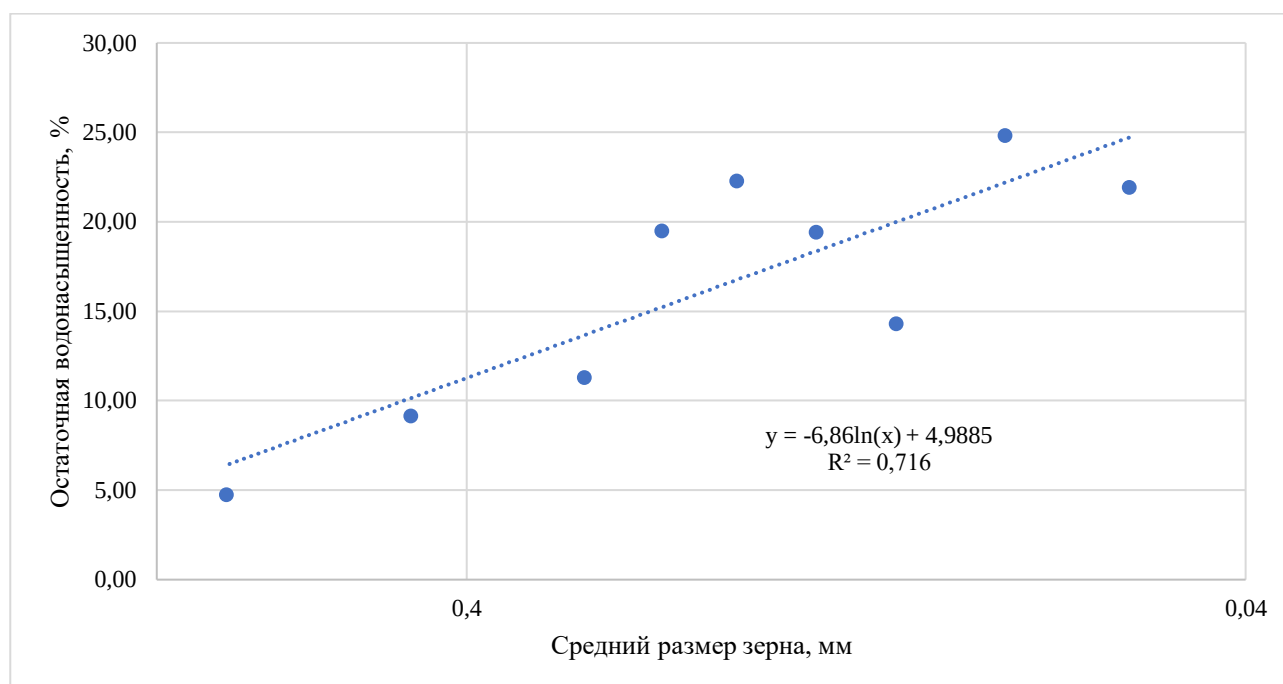


Рис. 3. Зависимость остаточной водонасыщенности от размера зерен

Остаточная водонасыщенность закономерно возрастает с уменьшением размера зерен по экспоненциальному закону. Однако, при уменьшении размера зерен меньше 0,225 мм, гладкая зависимость нарушается.

Распределение времен поперечной релаксации T_2 в зависимости от размера зерен показано на рис. 4.

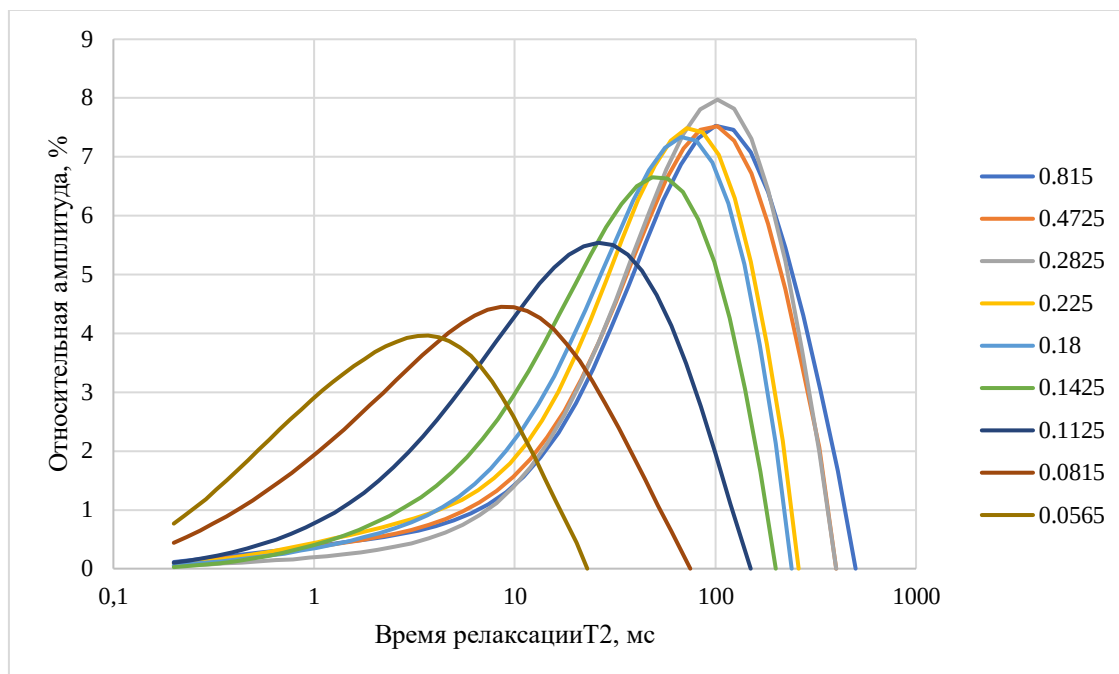


Рис. 4. Распределение времен поперечной релаксации T_2 в зависимости от размера зерен

Максимум распределения для крупнозернистых образцов совпадает с распределением времен для свободной воды. Влияние поверхности пор начинает проявляться при уменьшении размера зерен меньше 0.225 мм. С уменьшением размера зерен и, соответственно, размера пор время максимума релаксации уменьшается со 102 мс до 3.7 мс, рис.5.

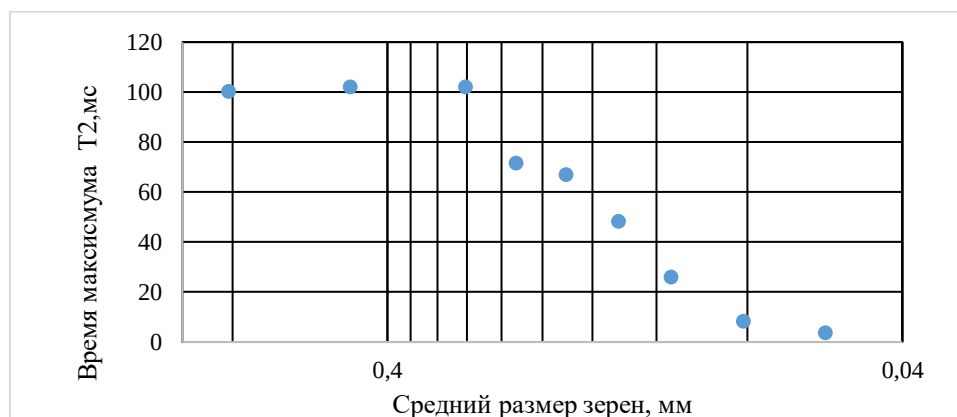


Рис. 5. Влияние размера зерен на максимум распределения времени релаксации T_2

Заключение

Проведены исследования влияния размера зерен на петрофизические и ЯМР характеристики искусственных образцов, изготовленных из зерен одинакового размера. Показано, что размер зерен сильно влияет на проницаемость и остаточную водонасыщенность образцов, получены количественные связи этих параметров с размерами зерен. Установлено, что распределение времен релаксации начинает «чувствовать» поверхность скелета начиная с размера зерен меньше 0.225 мм размера, что соответствует размеру пор ~ 0.045 мм. полученные данные могут служить основой для правильной количественной интерпретации данных ЯМР спектроскопии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксельрод С.М. Современные тенденции в геолого-технологических исследованиях, проводимых в процессе бурения скважин (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. – 2015. – №6. – С. 77-110
2. Белорай Я.Л., Кононенко И.Я. Использование ядерно-магнитных исследований для геоинформационного обеспечения строительства скважин // Каротажник. – 2006. – №1. – С. 53-65.
3. Мезин А.А., Шумскайте М.Й., Голиков Н.А., Бурухина А.И. Связь комплексной диэлектрической проницаемости нефти с ее физико-химическими свойствами и ЯМР-характеристиками // Геофизические технологии. – 2019. – № 4. – С. 24-34
4. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритоглинистых образцов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 10. С. 1911-1918.
5. Алтунина Л.К., Фуфаева М.С., Филатов Д.А., Сваровская Л.И., Ган-Эрдэнэ Т. Применение криогеля для стабилизации почв, подверженных дефляции. Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 83–88

REFERENCES

1. Aksel'rod S.M. Sovremennye tendencii v geologo-tekhnologicheskikh issledovaniyakh, provodimyyh v processe bureniya skvazhin (po materialam zarubezhnoj literatury) // Karotazhnik. – 2015. – №6. – S. 77-110
2. Beloraj YA. L., Kononenko I.YA. Ispol'zovanie yaderno-magnitnyh issledovaniy dlya geoinformacionnogo obespecheniya stroitel'stva skvazhin // Karotazhnik. – 2006. – №1. – S. 53-65.
3. Mezin A.A., SHumskajte M.J., Golikov N.A., Buruhina A.I. Svyaz' kompleksnoj dielektricheskoy pronicaemosti nefti s ee fiziko-himicheskimi svojstvami i YAMR-harakteristikami // Geofizicheskie tekhnologii. – 2019. – № 4. – S. 24-34
4. SHumskajte M.J., Glinskih V.N. Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti YAMR-harakteristik ot udel'noj poverhnosti i udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya peschano-alevritoglinistyyh obrazcov // Geologiya i geofizika. 2016. T. 57. № 10. S. 1911-1918.
5. Altunina L.K., Fufaeva M.S., Filatov D.A., Svarovskaya L.I., Gan-Erdene T. Primenenie kriogelya dlya stabilizacii pochv, podverzhennyh deflyacii. Kriosfera Zemli, 2013, t. XVII, № 3, S. 83–88.

© Н. А. Голиков, Т. А. Якушенко, 2021

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЭЙКОНАЛА НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

Серафим Игоревич Грубась

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, инженер, e-mail: serafimgrubas@gmail.com; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент.

Сергей Владимирович Яскевич

ИЗК СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель кафедры геофизики.

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, доцент кафедры геофизики.

В работе продемонстрирован алгоритм использования нейронной сети в процедурах обработки микросейсмических данных применительно к задаче локализации микросейсмических событий. Предложенный алгоритм подразумевает использование нейросетевого решения уравнения эйконала для вычисления времен пробега волн, формирующих первые вступления. В результате, нейросетевое решение сравнивается с наблюдаемыми временами прихода для решения обратной кинематической задачи определения координат положений событий. На синтетическом 3Д примере было показано, что средняя абсолютная ошибка несоответствия времен прихода составила менее 0.25 мс, а средняя ошибка локализации не превысила 4.5 метров.

Ключевые слова: уравнение эйконала, нейронная сеть, микросейсмика, локализация

LOCALIZATION OF MICROSEISMIC EVENTS USING PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORK SOLUTION TO THE EIKONAL EQUATION

Serafim I. Grubas

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Engineer, e-mail: serafimgrubas@gmail.com; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, student

Sergey V. Yaskevich

IEC SB RAS, 664033, Russia, Irkutsk, 3, 128 Lermontova St. 128, PhD, Senior Researcher, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Teacher

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Head of Lab, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Associate Professor.

The paper demonstrates an algorithm for using physics-informed neural networks in workflow of processing microseismic data regarding the problem of localization of microseismic events. The proposed algorithm involves the use of a physics-informed neural network solution to the eikonal equation to calculate the traveltimes of the first arrivals. As a result, the network solution is compared with the observed arrival times to solve the inverse kinematic problem to determine the coordinates of the event locations. Using a synthetic 3D example, it was shown that the average absolute error of the arrival time misfit was less than 0.25 ms, and the average localization error did not exceed 4.5 meters.

Keywords: eikonal equation, physics-informed neural network, microseismic, localization

Введение

Скважинный микросейсмический мониторинг это важная технология, направленная на наблюдение за слабыми сейсмическими событиями. Наиболее распространенный пример - оценка геометрии трещин гидроразрыва. Эффективность такого метода была продемонстрирована на многочисленных примерах [1], и было показано, что предполагаемые положения сейсмических событий предоставляют инженерам ценные данные для оценки качества работы. Текущее развитие метода частично связано с автоматизацией процедур обработки [2]. В нашей работе, мы предполагаем, что искусственная нейронная сеть (ИНС) будет способствовать ускорению общей обработки и ее применимости в реальном времени. Также мы полагаем, что применяемая ИНС будет работать лучше, если будет применяться на разных этапах обработки: детекция событий, пикировка времен прихода, калибровка скоростной модели, локализация событий. В этой статье мы показываем способ использования ИНС для расчета времен прихода при решении обратной задачи локализации микросейсмических событий.

Для расчета времен прихода сейсмических волн, решают уравнение эйконала, которое является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных (PDE). Существует несколько методов для решения этого уравнения, включая лучевое трассирование [3] и конечно-разностные методы решения [4, 5]. Также есть модификации конечно-разностных методов, в которых для большей точности используется факторизованное уравнение эйконала [6, 7]. Более того, в настоящее время и нейронные сети используются для решения PDE с использованием алгоритмов автоматического дифференцирования (AD), они называются physics-informed neural networks (PINN) [8]. PINN были успешно применены для решения факторизованного уравнения эйконала в прямых задачах [9, 10]. PINN представляют собой решение уравнения эйконала в виде гладкой функции, что может быть полезно для решения обратных задач, таких как сейсмическая томография [11] и вероятностная локализация землетрясений [12]. В нашей статье мы показываем, как PINN решение эйконала может быть использовано в обратной кинематической задаче для локализации микросейсмических событий.

Методы и теория

Уравнение эйконала - это нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, которое описывает времена пробега сейсмических волн в неоднородной скоростной модели:

$$\begin{aligned}\|\nabla_r \tau(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r)\|^2 &= v(\mathbf{x}_r)^{-2}, \\ \tau(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_s) &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\|\cdot\|^2$ – L_2 норма, $\tau(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r) = \tau(x_s, y_s, z_s, x_r, y_r, z_r)$ – время пробега сейсмической волны от источника $\mathbf{x}_s$ до приемника $\mathbf{x}_r$, $\nabla_r = (\partial/\partial x_r, \partial/\partial y_r, \partial/\partial z_r)$ – оператор градиента, $v(\mathbf{x}_r)$ – значение скорости в среде в точке $\mathbf{x}_r$. Здесь, τ это функция, которая определяет решение для всех возможных положений источников и приемников в скоростной модели, и нейронная сеть (PINN) попытается найти эту функцию. Мы будем называть функцию τ_θ в качестве PINN-решения уравнения 1, где θ – параметры нейронной сети. Кроме того, чтобы избежать ошибок, связанных с большой кривизной решения вокруг сингулярности в точке источника [6, 7], мы используем факторизацию, которая предполагает что искомое решение это отклонение τ'_θ от однородной модели $v = 1$:

$$\tau_\theta(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r) = \|\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_s\| \cdot \tau'_\theta(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r).\tag{2}$$

Факторизация также обеспечивает выполнение граничного условия $\tau_\theta(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_s) = 0$, поэтому для обучения PINN будет минимизироваться следующий функционал невязки, содержащий только уравнение:

$$L(\theta) = \frac{1}{N_s N_r} \sum_{i=0}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_r} \left[v(\mathbf{x}_r^j)^2 \|\nabla_r \tau(\mathbf{x}_s^i, \mathbf{x}_r^j)\|^2 - 1 \right]^2 \rightarrow \min_\theta,\tag{3}$$

где N_s – количество источников, N_r – количество приемников. После обучения PINN в известной скоростной модели, полученное решение $\tau_\theta(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r)$ будет использоваться в решении обратной кинематической задачи для локализации микросейсмических событий. Для этого будет минимизирована следующая невязка для каждого событий отдельно:

$$R(\mathbf{x}_s^i) = \frac{1}{N_r} \sum_{j=0}^{N_r} [\tau_\theta(\mathbf{x}_s^i, \mathbf{x}_r^j) - t_i(\mathbf{x}_r^j)]^2 \rightarrow \min_{\mathbf{x}_s^i}\tag{4}$$

где $t_i(\mathbf{x}_r^j)$ – наблюдаемое время прихода от i – го события до приемника $\mathbf{x}_r^j$. Преимущество использования PINN здесь заключается в том, что функцию $\tau_\theta(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_s)$ можно легко дифференцировать по $\mathbf{x}_s$.

Численный эксперимент и результаты

Мы протестировали предложенный подход на слоистой модели с четырьмя однородными слоями (рис. 1) со значениями скорости продольных волн [2.88, 2.75, 2.8, 2.4] км/с и границы слоев на глубинах [3.11, 3.16, 3.21] км. Предвари-

тельно, мы решаем уравнение 1, используя PINN в области $x \in [-0.6, 0.3]$ км, $y \in [-0.3, 0.4]$ км, $z \in [2.9, 3.4]$ км, при этом источники $\mathbf{x}_s$ и приемники $\mathbf{x}_r$ были равномерно распределены с шагами $[\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s] = [0.09, 0.07, 0.02]$ км и $[\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta z_r] = [0.045, 0.035, 0.01]$ км соответственно. В результате, общее количество точек для решения уравнения эйконала составляет $N_s \cdot N_r = 2541 \cdot 18081 \approx 46 \cdot 10^6$. Невязка была минимизирована с помощью адаптивного градиентного спуска Adam [13]. Кроме того, мы использовали улучшенную полносвязную нейронную архитектуру PINN [14], которая содержит 6 скрытых слоев, 100 единиц на каждом слое и локально адаптивный гиперболический тангенс [15] в качестве функции активации.

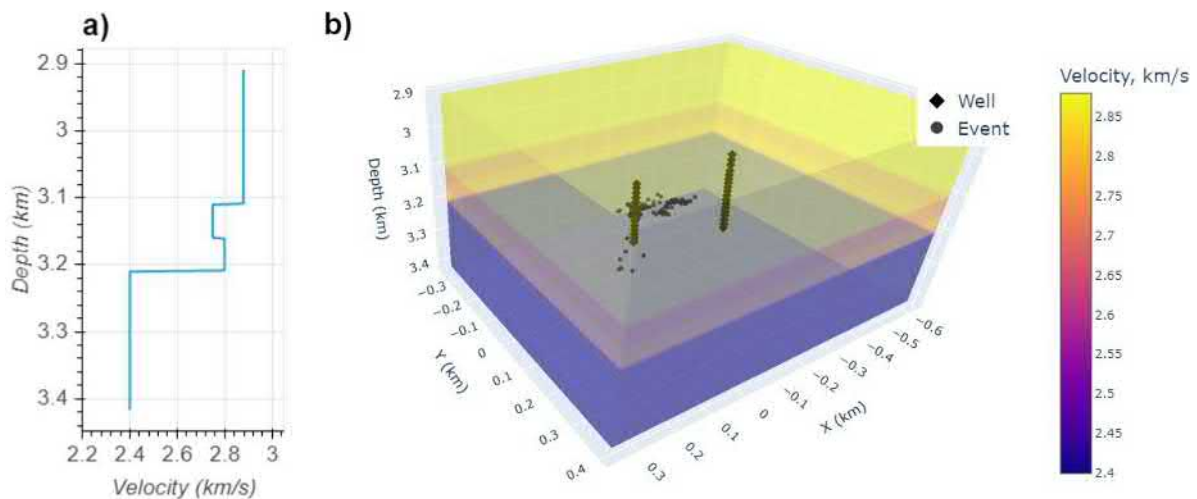


Рис. 1. Вертикально-слоистая скоростная модель и геометрия наблюдательных скважин и микросейсмических событий. **а** – вертикальный профиль скоростной модели, **б** – трехмерное представление модели и геометрии, где цвет отображает значения скорости, черные ромбики – местоположения приемников в наблюдательных скважинах, черные кружки соответствуют истинным местоположениям событий

Мы обучали PINN 15 эпох. Результирующее значение функционала невязки 3 (среднеквадратичная ошибка) составило около 10^{-4} с. Обученная PINN дает время первых вступлений и будет использоваться, как дифференцируемая функция для локализации микросейсмических событий.

Для подготовки синтетических данных $t_i(\mathbf{x}_r^j)$ мы использовали лучевое трассирование в слоистых изотропных средах. В этом случае, для вычисления времен прихода используется информация о типе волны, при этом предполагается, что мы работаем только с прямой волной. Алгоритм находит лучи, удовлетворяющие принципу Ферма. Подробно система наблюдений представлена на рисунке 2, она включает в себя две субвертикальные мониторинговые скважины, в том числе 14 и 18 приемников, длина апертуры приемников составляет примерно 170 и 270 м. Микросейсмическое облако включает 103 события, и боль-

шинство из них образует ограниченный объем с сублинейной геометрией. Скважины для мониторинга неравномерно удалены от облака микросейсмических событий, более короткая скважина находится на расстоянии 150 м, а более длинная скважина - примерно в 300 м. Чтобы определить местонахождение этих микросейсмических событий, мы минимизировали невязку 4 для каждого события, используя алгоритм Adam. Средняя абсолютная ошибка времен пробега PINN τ_θ и предначитанных t не превышает 0.25 мс, а средняя ошибка определения гипоцентров - менее 4.5 м. Геометрия микросейсмического облака (см. рис. 2) восстановлена корректно.

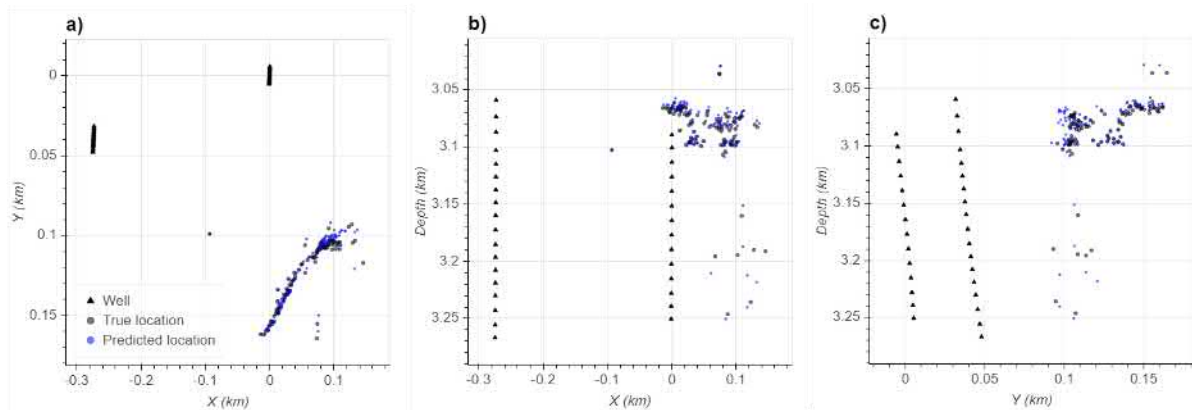


Рис. 2. Результаты локализации в разных проекциях: **а** - плоскость XY, **б** - плоскость XZ, **с** - плоскость YZ. Черные треугольники – местоположения приемников, черные кружки – реальные положения событий, синие кружки – результаты локализации с использованием решения PINN

Заключение

Мы показали пример использования нейронной сети в процедурах обработки микросейсмических данных. Мы выполнили локализацию микросейсмических событий с помощью обученной нейронной сети, которая являлась решением уравнения эйконала и использовалась для вычисления времени пробега. В результате, средняя абсолютная ошибка по невязке времен пробега составила менее 0.25 мс, а средняя ошибка локализации не превысила 4.5 метров.

Обсуждение и ограничения метода

Мы продемонстрировали, как нейронная сеть, представляющая решение уравнения эйконала, может быть использована для решения обратной кинематической задачи, когда известна скоростная модель. Однако в реальных случаях скоростная модель известна лишь частично. Тем не менее, предложенный подход может быть дополнен дополнительной нейронной сетью, которая выполняет коррекцию скоростной модели в соответствии с уравнением эйконала и наблюдаемыми временами прихода.

Кроме того, мы не учли одно возможное ограничение, связанное с приходом головных волн. Обычно, при обработке скважинных микросейсмических данных наблюдаемые волны считаются прямыми волнами, и для многих скоростных моделей эти волны образуют первые вступления. Редко наблюдаются приходы головных волн с гораздо меньшими амплитудами, чем прямые, что означает, что в некоторых случаях фаза головных волн будет полностью замаскирована шумом и их невозможно будет выделить, в то время как PINN всегда дает время прихода первых вступлений, т. е. включая и приходы головных волн. Можно видеть два примера из нашего численного эксперимента на рис. 3.а и рис. 3.б. Первое связано с обычным событием, когда головной волны нет, и времена пробега совпадают почти идеально. С другой стороны, второй рисунок показывает, как PINN пыталась подогнать приходы головных волн к наблюдаемым временам пробега прямых волн, что может вносить систематическое смещение в локализацию событий.

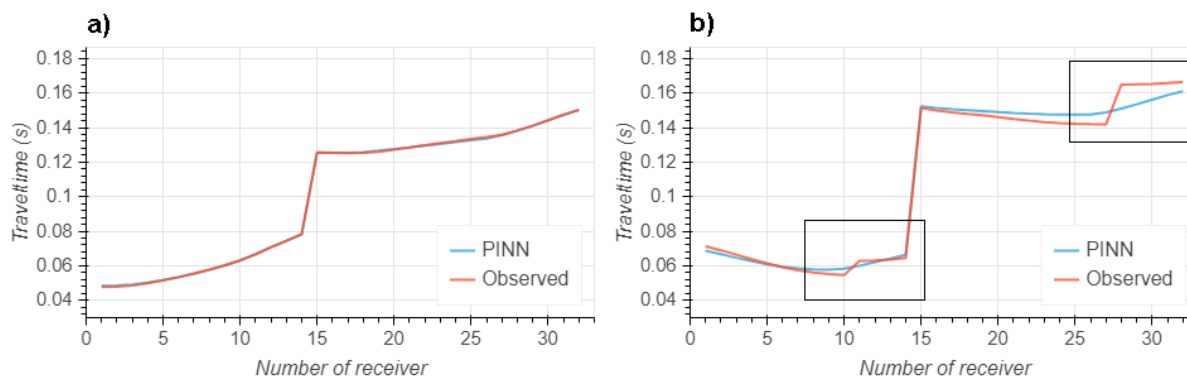


Рис. 3. Наблюдаемые времена прихода и рассчитанные PINN. **а** показывает времена прихода для события без головных волн, **б** показывает времена прихода, когда головная волна присутствует в первых вступлениях, черные прямоугольники представляют зоны с несоответствием.

Работа частично поддержана проектом фундаментальных исследований 0331-2019-0009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rutledge J. T., Phillips W. S. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas Hydraulic Stimulation of Natural Fractures // *Geophysics*. – 2003. – V. 68. – №. 2. – P. 441-452.
2. Hogarth L. J., Kolb C. M., Le Calvez J. H. Controlled-source velocity calibration for real-time downhole microseismic monitoring // *The Leading Edge*. – 2017. – V. 36. – №. 2. – P. 172-178.
3. Červený V., Klimeš L., Pšenčík I. Paraxial ray approximations in the computation of seismic wavefields in inhomogeneous media // *Geophysical Journal International*. – 1984. – V. 79. – №. 1. – P. 89-104.
4. Sethian J. A. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1996. – T. 93. – №. 4. – C. 1591-1595.

5. Zhao H. A fast sweeping method for eikonal equations // Mathematics of computation. – 2005. – V. 74. – №. 250. – P. 603-627.
6. Fomel S., Luo S., Zhao H. Fast sweeping method for the factored eikonal equation // Journal of Computational Physics. – 2009. – V. 228. – №. 17. – P. 6440-6455.
7. Treister E., Haber E. A fast marching algorithm for the factored eikonal equation // Journal of Computational physics. – 2016. – V. 324. – P. 210-225.
8. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – V. 378. – P. 686-707.
9. Smith J. D., Azizzadenesheli K., Ross Z. E. Eikonet: Solving the eikonal equation with deep neural networks // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2020.
10. Waheed U. et al. A holistic approach to computing first-arrival traveltimes using neural networks // arXiv preprint arXiv:2101.11840. – 2021.
11. Waheed U. et al. PINNtomo: Seismic tomography using physics-informed neural networks // arXiv preprint arXiv:2104.01588. – 2021.
12. Smith J. D. et al. HypoSVI: Hypocenter inversion with Stein variational inference and Physics Informed Neural Networks // arXiv. – 2021.
13. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.
14. Wang S., Teng Y., Perdikaris P. Understanding and mitigating gradient pathologies in physics-informed neural networks // arXiv preprint arXiv:2001.04536. – 2020.
15. Jagtap A. D., Kawaguchi K., Karniadakis G. Locally adaptive activation functions with slope recovery for deep and physics-informed neural networks // Proceedings of the Royal Society A. – 2020. – V. 476. – №. 2239. – P. 20200334.

© С. И. Грубасъ, С. В. Яскевич, А. А. Дучков, 2021

КОРРЕКТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ СРЕДЫ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Юлий Александрович Дашевский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, e-mail: dashyuly48@mail.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, профессор каф. геофизики.

Николай Николаевич Велькер

Новосибирский Технологический Центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. ак. Кутателадзе, 4а, ведущий исследователь, e-mail: Nikolay.Velker@bakerhughes.com

Алексей Владимирович Бондаренко

Новосибирский Технологический Центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. ак. Кутателадзе, 4а, к.ф.-м.н., научный сотрудник, e-mail: Alexey.Bondarenko@bakerhughes.com

Олег Борисович Боcharов

Новосибирский Технологический Центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. ак. Кутателадзе, 4а, к.ф.-м.н., зам. директора по научной работе, тел. (383) 232-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

В работе предложена и исследована новая постановка решения обратной задачи электромагнитного каротажа, основанная на описании геоэлектрического разреза параметром интегральной электрической проводимости. Представлен математический аппарат, позволяющий для цилиндрически-слоистой модели с радиально неоднородным непрерывным распределением электрических свойств параметризовать задачу функцией суммарной продольной проводимости.

На основе результатов гидродинамического моделирования для трех типов бурового раствора (нефтяной, пресный, соленый) исследованы вопросы эквивалентности сигналов индукционного зонда MPR для двух классов моделей: с непрерывным и кусочно-постоянным распределением проводимости. Предложен, физически обоснован и реализован алгоритм перехода от одного класса моделей к другому без потери свойства эквивалентности.

Показано что радиальные модели с различным распределением радиальной проводимости, но близкими кривыми интегральной проводимости эквивалентны по сигналам. Данный факт свидетельствует о целесообразности использовать при инверсии наряду с удельной проводимостью и параметр интегральной электрической проводимости.

Предложено использовать параметр интегральной электрической проводимости для конструирования функционалов, минимизация которых улучшает устойчивость алгоритмов и возможности определения функциональных параметров в моделях гидродинамической фильтрации.

Ключевые слова: индукционный каротаж, некорректные обратные задачи

CORRECT DETERMINATION OF INTEGRAL CONDUCTIVITY IN SOLVING INCORRECT INVERSE PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC LOGGING

Yuliy A. Dashevskiy

The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Academica Koptuga Ave, Dr. Sc., Chief Researcher, e-mail: dashyuly48@mail.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2, Pirogova str., Professor at Chair of Geophysics.

Nikolay N. Velker

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630090, Russia, Novosibirsk, 4a, Kutateladze str., Senior Scientist, e-mail: Nikolay.Velker@bakerhughes.com

Alexey V. Bondarenko

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630090, Russia, Novosibirsk, 4a, Kutateladze str., Ph.D., Scientist, e-mail: Alexey.Bondarenko@bakerhughes.com

Oleg B. Bocharov

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630090, Russia, Novosibirsk, 4a, Kutateladze str., Ph.D., Deputy Director for Science, phone: (383) 232-94-43, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

The paper suggests and investigates a problem statement of well-logging inverse problem that is based on the integral conductivity parameter to describe a geoelectric section.

Approach was introduced for a layered cylindrical model with radially heterogeneous continuous distribution of electric properties that parametrize the problem with a function of total longitudinal conductivity.

The results of hydrodynamic modeling for oil/fresh water- and brine-based drilling muds were used to study multiple propagation resistivity tool signal equivalency for two classes of models with continuous and piece-wise constant conductivity distribution. Physically based algorithm enabling one to convert one model class to the other, preserving the signal equivalency was proposed.

It was demonstrated that the radial models with different radial conductivity distribution and similar integral conductivity curves are equivalent. This fact lays a rationale of using the integral conductivity parameters along with conductivity while inversion.

The integral conductivity parameter can be used to build the functionals, whose minimization improves algorithm stability and enables determining functional parameters in hydrodynamic filtration models.

Keywords: induction logging, ill-conditioned inverse problems

При обсуждении проблемы неустойчивости решений обратных задач геоэлектрики [1] необходимо отметить, что неустойчивость возрастает с увеличением размерности задачи (сбывается так называемое «проклятие размерности») [2]. Пусть число параметров модели будет равно N и диапазон возможных изменений нормированных значений параметров ограничен: $0 \leq x_i \leq 1 (i = 1, \dots, N)$. Если предположить, что невязка аппроксимации заключена в элементарном объеме δV единичного N - мерного куба, то можно грубо оценить возможную вариацию δx_i параметров модели, соответствующую δV :

$$\delta x_i \sim \sqrt[N]{\delta V} \quad (1)$$

Пусть $\delta V=0.03$, тогда при $N = 5$ и 10 значения δx_i равны 0.5 и 0.7 , соответственно.

Параметризация геоэлектрического разреза на основе S трансформации

Арсенал методов параметризации геоэлектрического разреза включает в себя не только поточечное, но и интегральное описание пространственного распределения электропроводности горных пород. В методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) геоэлектрический разрез описывают параметром интегральной проводимости слоистой среды $S(z)$ [3,4]:

$$S(z) = \int_0^z \sigma(z) dz \quad (2)$$

Установлено что интегральная проводимость устойчиво определяется при решении обратной задачи МТЗ.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы исследовать возможность использовать для параметризации геоэлектрического разреза параметр интегральной проводимости слоистой среды.

Параметр интегральной проводимости в цилиндрически слоистой модели геоэлектрического разреза

Рассмотрим следующую задачу. Пусть на оси z цилиндрической системы координат r, φ, z , совпадающей с осью скважины радиусом a и проводимостью σ_1 , расположен вертикальный гармонический магнитный диполь с моментом M . На расстоянии L от диполя, на оси скважины, измеряют компоненту магнитного поля H_z . Область околоскважинного пространства $a < r < b$ занята средой с радиальным неоднородным распределением проводимости $\sigma(r)$. В области $r > b$, соответствующей неискаженной проникновением части пласта, электропроводность имеет постоянное значение σ_N .

Решение этой задачи известно в литературе [5]. Для компонент электрического поля E_φ и магнитного поля H_z внутри скважины справедливы следующие выражения:

$$E_\varphi = \frac{i\omega\mu M}{2\pi^2} \int_0^\infty F(m,r) \cos mzd m, \quad H_z = -\frac{i}{\omega\mu} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rE_\varphi). \quad (3)$$

Здесь:

$$F(m,r) = m_1 (K_1(m_1 r) - Q(m) I_1(m_1 r)), \quad (4)$$

$$Q(m) = \frac{aY(a)K_1(m_1a) + m_1K_0(m_1a)}{aY(a)I_1(m_1a) - m_1I_0(m_1a)} \quad (5)$$

K_1, K_0, I_1, I_0 , — модифицированные функции Бесселя

$$m_1^2 = m^2 - k_1^2, \quad k_1^2 = i\omega\mu\sigma_1. \quad (6)$$

В выражении (4) функция $Y(a)$ — это решение уравнения Риккати [7]:

$$Y'(r) + rY^2(r) = \frac{m^2 - k^2(r)}{r}, \quad a \leq r \leq b \quad (7)$$

при начальном условии $Y(b) = -i\omega\mu \frac{m_N K_0(m_N b)}{b K_1(m_N b)}$.

Здесь $k^2(r) = i\omega\mu\sigma(r), k_N^2 = i\omega\mu\sigma_N$.

Покажем, что геоэлектрическую среду в рассматриваемой задаче можно параметризовать не только с помощью функции $\sigma(r)$, но и использовать для описания разреза его интегральную проводимость $S(r)$, заданную на интервале $[0, r]$ следующим образом: $S(r) = \int_0^r \sigma(r)dr$.

С этой целью запишем известное уравнение для функции $F(m, r)$ [5]:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rF) \right] - (m^2 - k^2)F = 0 \quad (8)$$

Введем вместо функции F новую функцию v :

$$F(r) = \int_0^r v(\xi) d\xi \quad (9)$$

Подставим выражение (9) в уравнение (8) и используем тождество:

$$\frac{d}{dr} \left[S(r) \int_0^r v(\xi) d\xi \right] = S'(r) \int_0^r v(\xi) d\xi + S(r)v(r) \quad (10)$$

В результате получим уравнение для функции v , в котором электрические свойства геоэлектрического разреза входят только своим параметром интегральной проводимости $S(r)$:

$$\begin{aligned}
& v(r)r - \int_0^r v(\xi)d\xi + v'(r)r^2 - m^2r^2 \int_0^r v(\xi)d\xi + \\
& + i\omega\mu r^2 \frac{d}{dr} \left[S(r) \int_0^r v(\xi)d\xi \right] - i\omega\mu r^2 S(r)v(r) = 0
\end{aligned} \tag{11}$$

Таким образом, для описания электромагнитного поля в цилиндрически-слоистой модели с радиально неоднородным распределением σ разрез можно описывать как функцией $\sigma(r)$, так и интегральным параметром $S(r)$.

Построение цилиндрически слоистой модели зоны проникновения

Непрерывное радиальное распределение проводимости в прискважинной зоне зависит от проводимостей буровой жидкости и горной породы, а также от их гидродинамических свойств, что усложняет алгоритм восстановления параметров пласта по каротажным измерениям. Стандартным способом решения данной проблемы является замена непрерывной модели на более простую эквивалентную радиально-слоистую модель с конечным числом пластов.

Из физических соображений следует, что существует множество подобных моделей с различным количеством радиальных слоев. Основываясь на принципе Оккама и «проклятии размерности», важно построить эквивалентную модель с минимальным числом радиальных пластов.

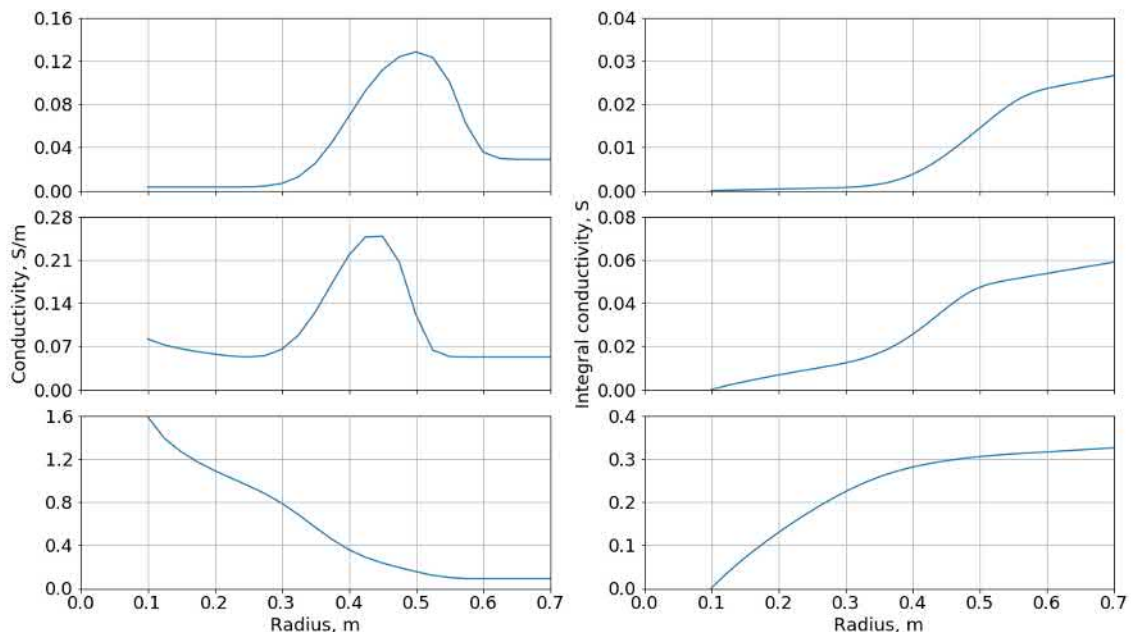


Рис 1. Радиальное распределение удельной электрической проводимости $\sigma(r)$ (а, с, е) и интегральной проводимости $S(r)$ (b, d, f) в зоне проникновения для трех типов основ бурового раствора: нефтяная (а, b); пресная (с, d); соленая (е, f). Радиус скважины 0.1 м

Рассмотрим построение эквивалентных радиально слоистых моделей зоны проникновения для практически интересных случаев использования соленого (0.02–0.20 Ом·м), пресного бурового раствора (0.5–3.0 Ом·м) и бурового раствора на нефтяной основе (> 10 Ом·м). Параметры соответствующих моделей приведены в таблице. Радиальное распределение удельной электрической проводимости и интегральной проводимости в зоне проникновения, полученное с помощью гидродинамического моделирования в [8], приведено на рис. 1.

Параметры модели среды: радиус скважины, проводимость бурового раствора и формации.

Основа бурового раствора	Радиус скважины, м	Проводимость бурового раствора, См/м	Проводимость формации, См/м
Нефтяная	0.1 м	0.0034	0.0289
Пресная		0.0818	0.0525
Солёная		1.590	0.0916

Было проведено численное моделирование для индукционного зонда MPR [8] на частоте 400 kHz в описанных моделях. Численные эксперименты показывают, что ширина пласта в эквивалентной слоистой модели не должна превышать 0.1 от толщины скин-слоя. На основе описанного подхода был программно реализован алгоритм построения эквивалентной модели.

На рис. 2 показано наложение непрерывных и кусочно-постоянных распределений проводимости и соответствующее качество аппроксимации профиля интегральной проводимости слоистой моделью.

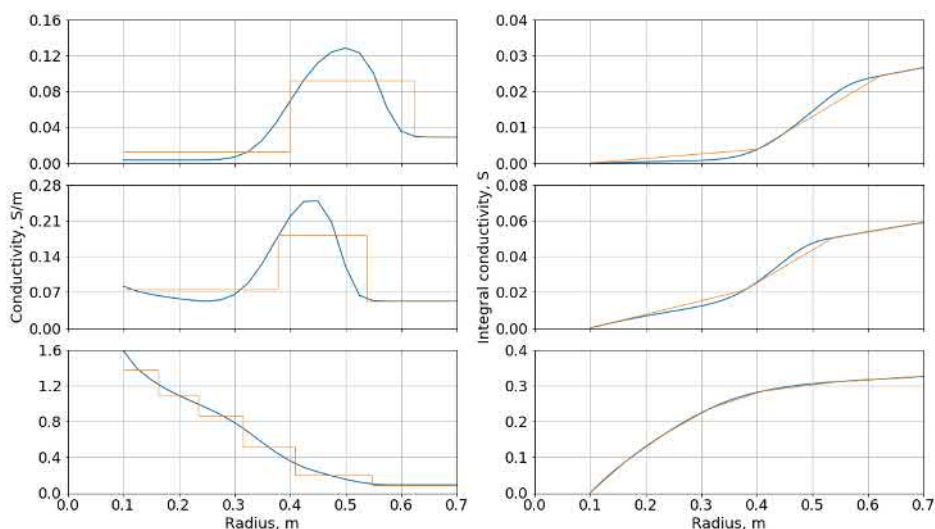


Рис. 2. Радиальное распределение удельной электрической проводимости $\sigma(r)$ и (a, c, e) и интегральной проводимости $S(r)$ (b, d, f) в зоне проникновения для трех типов основ бурового раствора: нефтяная (a,b); пресная (c,d); соленая (e,f) Синей линией изображены непрерывные распределения, оранжевой линией – их аппроксимации слоистой моделью

Сравнение качества аппроксимаций непрерывного распределения проводимости и интегральной проводимости в исходной и в эквивалентной слоистой моделях показывает, что относительная ошибка аппроксимации [9] интегральной проводимости приблизительно в 5 раз меньше, чем для распределения проводимости.

В результате расчета сигналов в данных моделях установлено, что различие между сигналами не превышает половины ошибки измерения, что подтверждает корректность замены непрерывного распределения проводимости его кусочно-постоянным приближением.

Возможность использования интегральной электрической проводимости разреза для улучшения устойчивости решения обратных задач многофазной гидродинамической фильтрации

Для анализа схем разработки месторождений углеводородов необходимо знать параметры гидродинамической фильтрационной модели, применимые к данному объекту. Большая сложность в использовании моделей двухфазной фильтрации состоит в наличии функциональных параметров в уравнениях – функций, зависящих от насыщенности порового пространства жидкостями. Эти функции (относительные фазовые проницаемости и функция капиллярного давления Леверетта) сильно зависят от взаимодействия флюидов и породы [10]. Их определение по лабораторным экспериментам на кернах вряд ли можно считать подходящим, поскольку крайне сложно сохранить свойства керна неизменными при его переносе из скважины в лабораторию. С другой стороны, при бурении скважин нарушается естественное состояние пластов, содержащих углеводороды. В частности, происходит проникновение буровой жидкости в прискважинную зону с образованием так называемой зоны внедрения, которая может влиять на геофизические измерения. Поэтому в этой области целесообразно решать совместно задачи электродинамики и многофазной фильтрации. По данным значениям насыщенности порового пространства фильтратом бурового раствора, концентрации соли в буровом растворе и пластовой воде формула Арчи позволяет получить достаточно точную аппроксимацию электрического сопротивления [7]. Таким образом устанавливается связь между результатами диаграмм электромагнитного каротажа и распределением флюидов. По решению прямой гидродинамической задачи в окрестности скважины мы можем определить распределение удельного электросопротивления. Как показывает практика, использование для решения обратной задачи электросопротивления приводит к неустойчивым алгоритмам. Утверждение о предпочтительности использования интегральной электрической проводимости $S(r)$ позволяет нам сконструировать более устойчивые алгоритмы определения функциональных параметров в моделях гидродинамической фильтрации.

Выводы и результаты

1. Предложена и исследована новая постановка решения обратной задачи электромагнитного каротажа, основанная на описании геоэлектрического разреза параметром интегральной проводимости среды.

2. Представлен математический аппарат, позволяющий для цилиндрически-слоистой модели с радиально неоднородным непрерывным распределением электрических свойств параметризовать задачу функцией суммарной продольной проводимости.

3. Использованы результаты гидродинамического моделирования для трех типов бурового раствора (нефтяной, пресный, соленый); на этой основе исследованы вопросы эквивалентности сигналов индукционного зонда MPR для двух классов моделей: с непрерывным и кусочно-постоянным распределением проводимости. Предложен, физически обоснован и реализован алгоритм перехода от одного класса моделей к другому без потери свойства эквивалентности.

4. Показано что радиальные модели с различным распределением радиальной проводимости, но близкими кривыми интегральной проводимости эквивалентны (имеют близкие сигналы при индукционном каротаже). Данный факт свидетельствует о предпочтительности использования интегральной электрической проводимости в инверсии.

5. Использование параметра интегральной электрической проводимости позволяет конструировать функционалы, минимизация которых улучшает устойчивость алгоритмов и возможности определения функциональных параметров в моделях гидродинамической фильтрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М: Наука, 1974, 222 с.
2. Martínez, J. and Fernández-Muñiz Z. The curse of dimensionality in inverse problems. J. Comput. Appl. Math., 2020, vol. 369, 1 May.
3. Дмитриев В.И. Обратные задачи геофизики: Монография. - М: МАКС Пресс, 2012, 340 с. ISBN 978-5-317-04151-9
4. Губатенко В. П. Эквивалентные геоэлектрические разрезы в методе становления электромагнитного поля // Изв. Сарат. унта. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-2-119-126>
5. Дмитриев В.И. Осесимметрическое электромагнитное поле в цилиндрической слоистой среде // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1972, № 11. С. 56-61.
6. Егоров А.И. Уравнения Риккати. -М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.- ISBN5-9221-0159-5.
7. I. Eltsov, Yu. Antonov et al. Invaded zone evolution reconstructed from logging data. SEG San Antonio 2011 Annual Meeting.
8. Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы. Москва: Мир, 1964.
9. Wang, T., Chemali, R., Hart, E., Cairns, P., 2007. Real-time formation imaging, dip, and azimuth while drilling from compensated deep Directional Resistivity, Presented at the SPWLA 48th Annual Logging Symposium, Austin, Texas, 3-6 June. SPWLA-2007-NNN

REFERENCES

1. Tihonov A.N., Arsenin V.YA. Metody resheniya nekorrektnykh zadach. M: Nauka, 1974, 222 s.
2. Martínez, J. and Fernández-Muñiz Z. The curse of dimensionality in inverse problems. J. Comput. Appl. Math., 2020, vol. 369, 1 May.

3. Dmitriev V.I. Obratnye zadachi geofiziki: Monografiya. - M: MAKS Press, 2012, 340 s. ISBN 978-5-317-04151-9
4. Gubatenko V. P. Ekvivalentnye geoelektricheskie razrezy v metode stanovleniya elektromagnitnogo polya // Izv. Sarat. unta. Nov. ser. Ser. Nauki o Zemle. 2020. T. 20, vyp. 2. S. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-2-119-126>.
5. Dmitriev V.I. Osesimmetricheskoe elektromagnitnoe pole v cilindricheskoj sloistoj srede // Izv. AN SSSR, Fizika Zemli, 1972, № 11. S. 56-61.
6. Egorov A.I. Uravneniya Rikkati. -M.: FIZMATLIT, 2001. 320 s.- ISBN5-9221-0159-5.
7. I. Eltsov, Yu. Antonov et al. Invaded zone evolution reconstructed from logging data. SEG San Antonio 2011 Annual Meeting.
8. Kollinz, R. Techenie zhidkostej cherez poristye materialy. Moskva: Mir, 1964.
9. Wang, T., Chemali, R., Hart, E., Cairns, P., 2007. Real-time formation imaging, dip, and azimuth while drilling from compensated deep Directional Resistivity, Presented at the SPWLA 48th Annual Logging Symposium, Austin, Texas, 3-6 June. SPWLA-2007-NNN

© Ю. А. Дашевский, Н. Н. Велькер, А. В. Бондаренко, О. Б. Бочаров, 2021

ИНДУКТИВНАЯ И ОСТАТОЧНАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ ПОРОД ЗАРЕЧЕНСКОЙ И НИКОЛЬСКОЙ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ (ВОСТОЧНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ)

Пётр Георгиевич Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет (НГУ), 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, доцент

Даяна Юрьевна Сайлымбы

Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, студент, e-mail: dayana.saylymby@mail.ru

Николай Эдуардович Михальцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., e-mail: MikhaltsovNE@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет (НГУ), 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2

Александра Викторовна Левичева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Определена остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость и ее анизотропия, а также фактор Q образцов горных пород Зареченской и Никольской магнитных аномалий, расположенных в районе Селенгинской депрессии на восточном побережье оз. Байкал. Знание магнитных свойств массивов горных пород, являющихся источниками этих аномалий, необходимо для оценки магнитоупругих коэффициентов, которые могут быть отличны для остаточной и индуктивной намагниченности. Это, в свою очередь, позволит в дальнейшем повысить достоверность интерпретации результатов выполняемого здесь тектономагнитного мониторинга.

Ключевые слова: индуктивная намагниченность, остаточная намагниченность, анизотропия магнитной восприимчивости, тектономагнитный мониторинг, Зареченская и Никольская магнитные аномалии, озеро Байкал

INDUCTIVE AND REMANENT MAGNETIZATION OF ROCKS OF ZARECHENSKAYA AND NIKOLSKAYA MAGNETIC ANOMALIES (EASTERN COAST OF OZ. BAIKAL)

Petr G. Dyadkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Head of laboratory, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University (NSU), 630090, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, associate professor

Dayana Yu. Saylymby

Novosibirsk State Technical University, Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marx ave., 20, Student, e-mail: dayana.saylymby@mail.ru

Nikolay E. Mikhaltsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher, e-mail: MikhaltsovNE@ipgg.sbras.ru
Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Pirogova Str. 2.

Alexandra V. Levicheva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

The remanent magnetization, magnetic susceptibility and its anisotropy, as well as the Q factor of the samples of rocks, from the Zarechenskaya and Nikolskaya magnetic anomalies have been determined. These anomalies locate near the Selenginskaya depression on the eastern coast of Lake Baikal. Knowledge of the magnetic properties of rock massifs that are the sources of these anomalies is necessary to assess the magnetoelastic coefficients, which may be different for remanent and inductive magnetization. This, in turn, will make it possible to further increase the reliability of the interpretation of the results of tectomagnetic monitoring performed here.

Keywords: inductive magnetization, remanent magnetization, anisotropy of magnetic susceptibility, tectonomagnetic monitoring, Zarechenskaya and Nikolskaya magnetic anomalies, Lake Baikal

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки значений магнитоупругих коэффициентов для массивов горных пород, являющихся источниками Зареченской и Никольской магнитных аномалий (рис. 1), в районе которых проводятся многолетние тектономагнитные исследования ИНГГ СО РАН [1,2]. Ввиду того, что магнитоупругие коэффициенты имеют разные значения для индуктивной и остаточной намагниченностей, важным является определение каждой из этих намагниченностей и их соотношения (фактора Q).

Знание величин остаточной и индуктивной намагниченностей и планируемое в дальнейшем определение магнитоупругих коэффициентов для каждой из этих намагниченностей необходимо для обеспечения достоверной интерпретации регистрируемых в районе этих аномалий тектономагнитных эффектов, связанных с геодинамическими процессами и процессами подготовки землетрясений.

Основным средством достижения поставленной цели являлись лабораторные измерения магнитных свойств горных пород.

Магнитная восприимчивость – это коэффициент пропорциональности между величиной магнитного поля и намагниченностью вещества. Восприимчивость магнитных веществ зависит от напряженности, растет с увеличением размера зерен, падает с ростом дефектности зерен. Величина магнитной восприимчивости варьирует в разных типах пород [3].

Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) – зависимость величины магнитной восприимчивости от направления приложенного магнитного поля.

Индуктивная намагниченность — намагниченность, вызванная действием внешнего магнитного поля и исчезающая после его снятия.

Остаточная намагниченность – намагниченность, которая формируется при образовании породы и не исчезает при снятии внешнего поля.

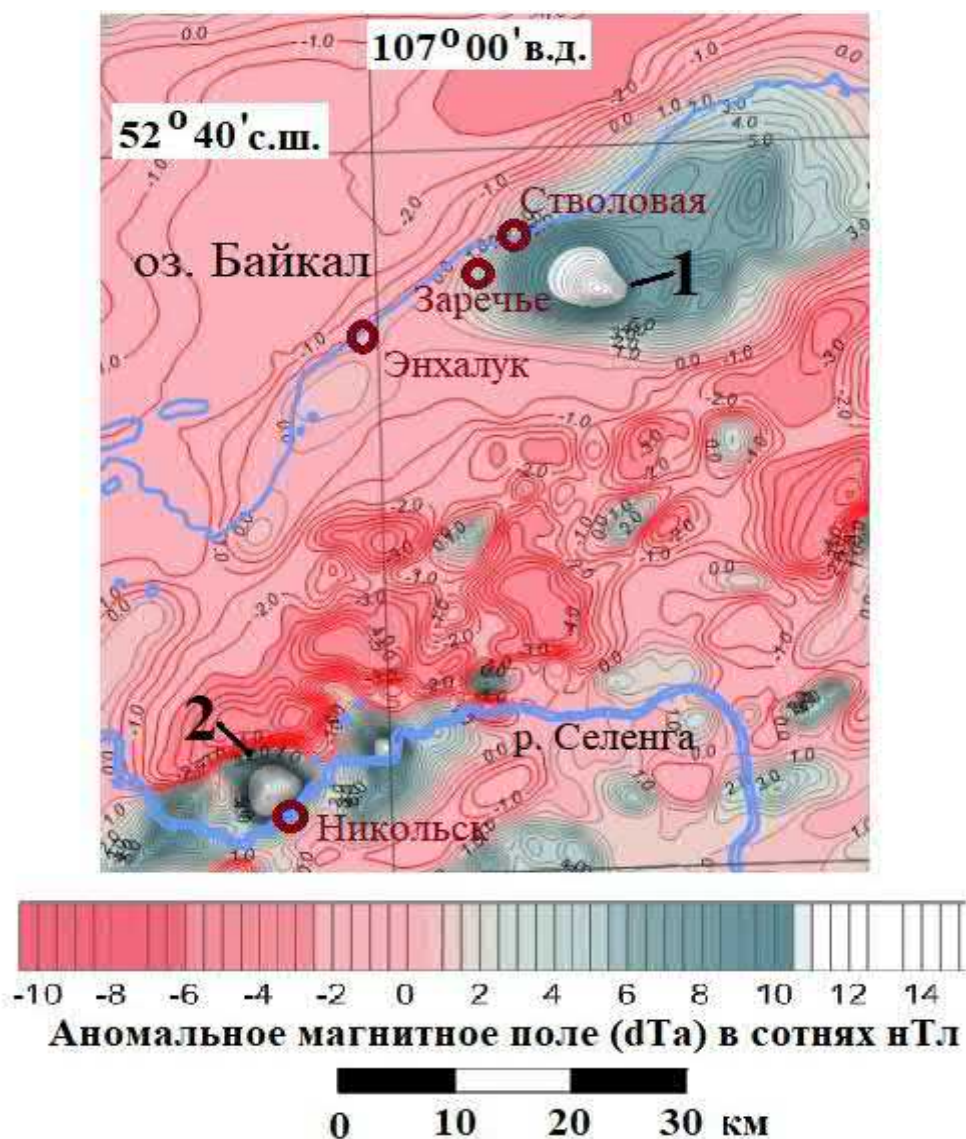


Рис. 1. Зареченская (1) и Никольская (2) магнитные аномалии на карте аномального магнитного поля (dTa), составленной по данным аэромагнитной съемки масштаба 1: 200 000

Для исследования были использованы образцы, отобранные на Зареченской и на Никольской магнитных аномалиях, в районе пунктов тектономагнитных наблюдений. Источником Зареченской магнитной аномалии является повышенная намагниченность обширного и, вероятно, глубоко залегающего массива горных пород архейского возраста, сложенного в основном гнейсогранитами [4].

Аномалиеобразующие породы Никольской магнитной аномалии сложены, в основном, граносиенитами и гранодиоритами.

Измерения зависимости магнитной восприимчивости и ее анизотропии проводились на приборе Kappabridges MFK1-FA, в лаборатории геодинамики и палеомагнетизма ИНГГ СО РАН. Принцип работы этой аппаратуры связан с измерением изменений индуктивности, обусловленных помещением в катушку образца. Для измерений требуется образец кубической формы с размерами ребра до 20 мм.

Таблица 1

Значения общей магнитной восприимчивости κ , степени анизотропии P_j и фактора формы эллипсоида T .

Место	№	Образцы	$\kappa \cdot 10^{-3}$	Standard err . [%]	P_j	T
Никольск	1	NIKKAR.1	16.63	0.0080	1.038	0.778
	2	NIKKAR.2	21.23	0.0148	1.044	0.752
	3	NIKKAR.3	18.44	0.0038	1.033	0.805
	4	NIKKSV.1	12.71	0.0126	1.061	0.016
	5	NIKKSV.2	14.94	0.0320	1.076	-0.390
Заречье	1	2017.1	15.43	0.0645	1.170	-0.303
	2	2017.2	29.49	0.1154	1.219	0.377
	3	ZARCK20.1	6.614	0.0216	1.094	0.195
	4	ZARCK20.2	9.15	0.0512	1.114	0.704
	5	ZARCK20.3	13.04	0.0112	1.104	0.424

При анализе эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости использовались параметры P_j (корректированная степень анизотропии) и T (параметр формы эллипсоида).

В результате проведенных измерений было получено, что большинство исследованных образцов обладают средней степенью анизотропии магнитной восприимчивости $1.03 < P_j < 1.2$.

Значения параметра T , характеризующего форму эллипсоида АМВ [5], в большинстве значения варьируют от -0.3 до 0.8, при этом примерно в 80% случаев эллипсоид обладает вытянутой формой ($T > 0$), в 20% случаев – сплюснутой ($T < 0$).

Как правило, вытянутая форма эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости в магматических телах интерпретируется как результат движения магмы, а сплюснутая – как следствие статических процессов: сжатия при охлаждении тела или кристаллизации “in situ” [6].

Для измерения естественной остаточной намагниченности применялся ротационный магнитометр JR-6А, предназначенный для измерения трех компонент остаточной намагниченности горных пород. Измерения проводились в лаборатории естественных геофизических полей ИНГГ СО РАН. При

вращении образца с постоянной скоростью внутри пары катушек Гельмгольца в катушках наводится ЭДС, пропорциональная величине и направлению вектора остаточной намагниченности. Для измерений требуется образец кубической формы с размерами ребра 20 мм. Измерения проводятся при комнатной температуре. Процесс измерения полностью управляется компьютером.

Таблица 2

Значения средней остаточной $\bar{I}_r$ и индуктивной I_i намагниченностей, фактора Кенингсбергера Q и оценка ошибки.

Место	№	Образцы	$\bar{I}_r$ A/m	I_i A/m	Q	$\frac{I_{r2} - I_{r1}}{I_r} * 100\%$
Никольск	1	NIKKAR.1	0.398	0.798	0.499	8
	2	NIKKAR.2	0.780	1.020	0.765	1.3
	3	NIKKAR.3	1.003	0.885	1.133	3.3
	4	NIKCSV.1	0.649	0.610	1.063	0.1
	5	NIKCSV.2	0.838	0.717	1.168	2.3
Заречье	1	2017.1	1.469	0.741	1.983	0.1
	2	2017.2	2.257	1.415	1.595	1.9
	3	ZARCK20.1	0.168	0.317	0.529	6.5
	4	ZARCK20.2	0.576	0.439	1.312	2.7
	5	ZARCK20.3	1.113	0.626	1.778	4.1

Для каждого образца измерялись компоненты X, Y и Z естественной остаточной намагниченности. Также рассчитывалась величина модуля вектора естественной остаточной намагниченности.

Анализ результатов измерений позволяет отметить, что максимальной естественной остаточной намагниченностью обладали образцы 2017.1, 2017.2 и ZARCK20.3. Зареченской аномалии. Для всех образцов направления вектора остаточной намагниченности различаются, что, вероятно, связано, по нашему мнению, с существенно неравномерным распределением магнитных минералов в образцах. Чтобы определить в какой степени это может быть связано с ошибками измерений, для всех образцов были выполнены повторные измерения остаточной намагниченности. Расхождения между первым и вторым измерениями показаны в процентах в последнем столбце таблицы 2. Максимальное отличие в величине остаточной намагниченности составило 8 %, а для большей части образцов оно не превысило 3 %, что указывает на высокую степень достоверности полученных значений остаточной намагниченности.

Для определения фактора Кенингсбергера Q на основе данных об измеренных значениях магнитной восприимчивости были рассчитаны значения

индуктивной намагниченности по формуле $I = k * H$ [3], где H - напряженность магнитного поля, которая для данного региона равняется 48 А/м.

Более низкими значениями Q характеризуются образцы NIKKAR.1, NIKKAR.2, что говорит о преобладании индуктивной намагниченности над остаточной для гранодиоритов Никольской аномалии.

Для граносиенитов Никольской аномалии характерно равенство остаточной и индуктивной намагниченностей.

Гнейсограниты Зареченской аномалии характеризуются преобладанием (в среднем ~ в 1.5 раза) величины остаточной намагниченности над индуктивной.

Таким образом, определена остаточная и индуктивная намагниченности, магнитная восприимчивость и ее анизотропия, а также фактор Q образцов горных пород Зареченской и Никольской магнитных аномалий, расположенных в районе Селенгинской депрессии на восточном побережье оз. Байкал. Это позволит повысить достоверность интерпретации регистрируемых здесь тектономагнитных аномалий.

Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ ИНГГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дядьков П.Г., Мандельбаум М.М., Татьков Г.И., Ларионов В.А., Жирова Н.В., Михеев О.А., Низамутдинов Р.С., Чебаков Г.И. Особенности развития сейсмотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика, 1999. – Т. 40, № 3. – С. 346-359.
2. Дядьков П.Г., Романенко Ю.М., Дучкова А.А., Козлова М.П., Кулешов Д.А., Цибизов Л.В. О критериях выделения областей подготовки сильных байкальских землетрясений на основе анализа сейсмического режима и результатов тектономагнитного мониторинга // ГИАБ. – 2017. – №12. – спец. выпуск 36. – С. 11-18.
3. Трухин В. И. Введение в магнетизм горных пород. 1973.
4. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Прибайкальская, лист N-48-XXXVI, Недра, М., 1965.
5. Jelinek, V.Characterization of the magnetic fabrics of rocks. Tectonophysics. 1981. – 79, T 63-T 67.
6. O'Driscoll B., Ferre E.C., Stevenson S.T.E., Magee C. The significance of magnetic fabric in layered mafic-ultramafic intrusions. 2015. Chapter 7 in: Charlier B. et al., eds. Layered intrusions. Springer. – 2015. – P. 295-329.

REFERENCES

1. Dyadkov P. G., Mandelbaum M. M., Tatkov G. I., Larionov V. A., Zhirova N. V., Mikheev O. A., Nizamutdinov R. S., Chebakov G. I. Osobennosti razvitiya seismotektonicheskogo processa I processov podgotovki zemletryaseni v central'noi chasti Baikal'skoi riftovoi zonu po rezul'tatam tektonomagnitnuh issledovaniy // Geologiya I Geofizika. – 1999. – Т. 40. – № 3. – S. 346-359.
2. Dyadkov P. G., Romanenko Yu. M., Duchkova A. A., Kozlova M. P., Kuleshov D. A., Tsibizov L. V. O kriteriyah vudeleniya oblastei podgotovki sil'nuh baikal'skih zemletryaseni na osnove analiza seismicheskogo rezhima I rezul'nanov tektonomagnitnogog monitoringa // GIAB. – 2017. –№12. – spec. vupysk 36. – S. 11-18.
3. Trukhin V. I. Vvedenie v magnetism gornuh porod. 1973.

4. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya Pribaikal'skaya, list N-48-XXXVI, Nedra, M., 1965.
5. Elinek V., Characteristics of magnetic fabrics rock . Tectonophysics. –1981. –79, T 63-T 67.
6. O'Driscoll B., Ferre E. S., Stevenson S. T. E., Magee K. The significance of magnetic fabric in layered mafic-ultramafic intrusions. 2015. Chapter 7 in: Charlier B. et al., eds. Layered intrusions. Springer. –2015. – P. 295-329.

© П. Г. Дядьков, Д. Ю. Сайлымбы, Н. Э. Михальцов, А. В. Левичева, 2021

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Алексей Викторович Еделев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., старший научный сотрудник, тел. +7(383) 363-91-94, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru.

Ольга Петровна Саева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., старший научный сотрудник, тел. +7(383) 363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru.

Николай Викторович Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.т.н., старший научный сотрудник, тел. +7(383) 363-91-94, e-mail: YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru.

В статье показаны результаты анализа поверхностных водоёмов и водотоков в зоне влияния Норильского промышленного района. Сопоставлены данные по территориям в сильной мере подверженным техногенному воздействию и условно-фоновым областям. Проведены сравнения полученных значений с опубликованной научной информацией по исследуемому региону.

Ключевые слова: Арктика, Норильск, микроэлементы, поверхностные воды

HYDROCHEMICAL COMPOSITION OF SURFACE WATER BODIES IN THE AREA OF IMPACT OF THE NORILSK INDUSTRIAL REGION

Aleksey V. Edelev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, tel. +7(383) 363-91-94, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

Olga P. Saeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, tel. +7(383) 363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

Nikolay V. Yurkevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, tel. +7(383) 363-91-94, e-mail: YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

The article shows the results of the analysis of surface water reservoirs and streams in the zone of influence of the Norilsk industrial region. Comparison of data on territories heavily exposed to technogenic impact and conditionally background areas. Comparisons of the obtained values with published scientific information on the studied region are made.

Keywords: Arctic, Norilsk, trace elements, surface waters

Введение

Арктика всегда была интересна Российскому государству, и во времена Российской империи, когда активно открывались и исследовались её огромные и малонаселенные территории [1], и во времена Советского Союза, когда на Севере разведывались крупнейшие месторождения полезных ископаемых [2], строились промышленные предприятия и целые города [3]. В настоящее время долгосрочное экономическое развитие Российской Федерации в существенной мере связано с рациональным использованием Арктической зоны в качестве ресурсной базы [4]. Сопутствующим условием является повышение уровня социально-экономического развития территории и улучшение качества жизни и защищенности местного населения [5, 6].

В результате хозяйственной деятельности происходит негативное воздействие на окружающую среду [7]. В условиях Арктических территорий это требует особенного внимания в связи с их существенными отличиями от других регионов страны. В первую очередь, различия обусловлены тем, что экосистемы арктических территорий легко уязвимы при внешнем воздействии [8]. Также свою лепту вносит крайне затрудненная транспортная доступность большей части территории российской Арктики [9], что приводит к проблемам с вывозом разнообразных отходов производства. Суровые природные условия приводят к быстрому износу техники и инфраструктуры [10], что вызывает повышенное количество отходов и увеличение вероятности техногенных аварий. На северных территориях расположены богатые месторождения меди, платины, палладия, никеля, железа, фосфора, золота, алмазов, титана, тантала, ниобия, флюоритов, хрома, марганца, слюды, молибдена, вольфрама, ванадия, углеводородов, что приводит к увеличению фоновых содержаний этих веществ в соответствующих регионах [11, 12].

Цель данной работы оценить экологическое состояние поверхностных водных объектов вблизи Норильского промышленного района на основании химического состава.

Объекты и методы исследований

Летом 2020 года была проведена масштабная экспедиция Сибирского отделения Российской академии наук при поддержке АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания» с целью комплексного изучения состояния окружающей среды Норильского промышленного района. Во время экспедиции сотрудниками ИНГГ СО РАН были исследованы воды безымянных водоёмов и водотоков вблизи ТЭЦ-3 г.Норильска, рек Болгохтох, Ямная, Купец, Амбарная, Далдыкан, Норильская, озер Мелкое и Лама. В результате проведенных полевых работ на техногенно загрязнённых и условно фоновых территориях было выбрано показательных двенадцать проб поверхностных вод. Схема отбора проб представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема пробоотбора поверхностных вод.
Числами обозначены номера проб.

Отбор проб проводили с глубины 10–30 см от поверхности воды в соответствии с действующими стандартами [13, 14]. После отбора пробы консервировались и охлаждались до температуры 4°C.

Химический состав воды был исследован в лаборатории физико-химических методов исследований ЗСФ ИНГГ СО РАН, г. Тюмень (номер аттестата об аккредитации: RA.RU.21AJ28) и в ООО «Химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (номер аттестата об аккредитации: RA.RU.516895) на элементный состав методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [15].

Результаты и обсуждение

Основываясь на полученных данных (таблица) можно сделать заключение, что в основном представленные воды имеют нейтральную среду, только в небольшом безымянном водоёме вблизи ТЭЦ-3 находятся кислые воды. У естественных водных объектов минерализация находится в пределах до 2 г/л, у техногенных – 3.7-4.5 г/л.

Воды, дальше расположенные от промышленного центра, относятся к гидрокарбонатно-кальциевой группе, ближе – к сульфатно-кальциевой. Отчетливо наблюдается зависимость с уменьшением концентраций всех элементов, в том числе характерных для этого региона (кобальт, никель, медь, цинк [17]) с удаленностью от промышленного района (наиболее удаленные – реки Болгохтох, Ямная, озера Мелкое и Лама). Высокие концентрации сульфат-ионов в водах наиболее близких к промышленным предприятиям (объекты возле ТЭЦ-3, там же расположенные р-й Надеждинский и река Далдыкан, река Купец, текущая внутри городской черты) связаны с техногенными выбросами предприятий, что отмечалось и ранее [18]. Концентрации железа превышают предельно допустимые практически во всех представленных объектах. Характерны высокие средние концентрации меди, цинка, кобальта и никеля, существенно выделяющие местные водотоки среди других арктических рек [19]

Результаты анализов проб воды, мг/л

Пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ПДК [16]
УЭП, мСм/м	18	17	32	38	30	40	420	290	160	14	5.4	7.9	-
М	150	150	300	400	300	420	4540	3690	1990	120	67	90	-
pH	7.9	8.1	8.2	7.6	8.0	7.6	2.6	7.0	8.0	8.0	6.6	7.5	-
HCO ₃ ⁻	83	73	113	55	66	67	<6.1	266	107	46	31	42	-
CO ₃ ²⁻	<6.0	6.0	8.4	<6.0	<6.0	<6.0	<6.0	<6.0	9.6	<6.0	<6.0	<6.0	-
NO ₃ ⁻	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.65	<0.5	<0.5	0.89	4.7	<0.5	1.0	<0.5	40
SO ₄ ²⁻	18	12	77	240	140	220	3000	2400	1300	30	9.8	21	100
Cl ⁻	2.3	6.8	2.4	4.8	0.99	4.9	13	8.5	28	2.2	2.7	3.7	300
Ca	20.5	23.7	40.3	57.3	36.5	58.3	260	548	340	18.7	6.59	8.54	180
Mg	7.55	5.06	10.8	13.3	9.65	13.2	135	96.6	22.9	3.55	1.26	1.72	40
Na	4.84	6.05	5.92	9.80	2.87	14.7	114	30.2	29.4	2.93	2.72	3.00	120
Si	1.21	2.71	2.67	4.24	2.58	4.74	44.8	6.65	5.84	1.97	2.12	2.46	-
K	0.77	0.34	0.38	1.64	0.40	1.29	2.25	3.22	5.40	0.17	0.17	0.070	50
Mn	0.014	0.0015	0.0053	0.21	0.0015	0.24	6.90	1.20	0.025	0.015	0.0037	0.0015	0.01
Fe	0.13	0.13	0.29	0.50	0.25	0.48	373	2.55	1.64	0.103	0.058	0.040	0.1
Al	0.0071	0.0022	0.0068	0.020	0.0014	0.0040	78.3	0.0049	0.0042	0.0077	0.044	0.0046	0.04
Co	0.0001	0.0001	0.0001	0.0100	0.0001	0.019	3.79	0.038	0.0021	0.0001	0.0001	0.0001	0.01
Ni	0.0032	0.0012	0.0051	0.31	0.026	0.59	61.5	4.20	0.38	0.0005	0.0005	0.0005	0.01
Cu	0.0041	0.0022	0.0023	0.0054	0.0023	0.0078	32.1	0.052	0.021	0.0017	0.0017	0.0005	0.001
Zn	0.0057	0.043	0.0013	0.0020	0.0072	0.23	3.01	0.022	0.0102	0.0005	0.0053	0.0005	0.01

Примечание. М – минерализация. «-» – нет данных;

Места отбора проб: 1 – река Ямная; 2 – река Болгохтох; 3 – река Амбарная выше впадения реки Далдыкан; 4 – река Далдыкан ниже по течению места впадения ручья Надеждинского на ~1 км; 5 – река Далдыкан выше впадения ручья Надеждинского; 6 – Ручей Надеждинский; 7 – водоем вблизи пром. предприятия; 8 – небольшой водоток вблизи пром. предприятия; 9 – река Купец; 10 – река Норильская; 11 – озеро Мелкое; 12 – озеро Лама.

Следует отметить, что в обсуждаемом регионе ввиду длительного интенсивного развития промышленности уже давно отмечаются существенные загрязнения водных объектов, что подтверждается данными с 1980 по 2003 гг. по Норило-Пясинской системе [20] и ряде небольших рек и озер в данном районе исследованными в 2016 г [21]. В то же время в регионе высок естественный фон по ряду элементов характерных для Норильской минерагенической зоны (Cu, Fe, Ni и др.).

Заключение

По данным анализа поверхностных водоёмов и водотоков прослеживается характерная особенность региона, заключающаяся в существенно повышенных

концентрациях железа, меди, никеля, сульфат-ионов в водных объектах, не подверженных прямому техногенному воздействию, что объясняется соответствующим геохимическим фоном для данных веществ. В то же время водотоки и водоёмы, расположенные в непосредственной близости к промышленным объектам, характеризуются концентрациями веществ, превышающими нормативные значения.

Авторы выражают глубокую благодарность к.г.-м.н. И. С. Ивановой (ТФ ИНГГ СО РАН) за помощь при отборе проб. Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания» и программы ФНИ (проект № 0266-2019-0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляев Д. П. История открытия и освоения Арктики. – М.: Паулсен, 2019. – 280 с.
2. Конторович А. Э. Нефть и газ российской Арктики: история освоения в XX веке, ресурсы, стратегия на XXI век // Наука из первых рук. – 2015. – № 61 (1). – С. 46–65.
3. Матвишин Д. А. Зарубежный и отечественный опыт экономического освоения арктических территорий // Арктика и Север. – 2017. – № 26. – С. 24–37.
4. Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года: Указ Президента Российской Федерации № 164 от 5 марта 2020 года // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 10. – С. 4282–4291.
5. Кондратов Н. А. Освоение Арктики: стратегические интересы России // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 1. – С. 120–126.
6. Государственная программа Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации": (ред. от 31.03.2020) [Электронный ресурс]. – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс»
7. Промышленная экология: учебное пособие / В. А. Зайцев. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 382 с.
8. Седова Н. Б., Кочемасова Е. Ю. Экологические проблемы Арктики и их социально-экономические последствия // ЭКО. – 2017. – № 5. – С. 160–171.
9. Серова Н. А., Серова В. А. Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики // Арктика и Север. – 2019. – № 36. – С. 42–56.
10. Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Максимова Е. М., Семенов С. В. Повышение износостойкости деталей землеройной техники, эксплуатирующихся в условиях холодного климата // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 12. – С. 543–547.
11. Алексеев И. Н., Динкелакер Н. В., Орипова А. А., Семьина Г. А., Морозов А. А., Абакумов Е. В. Оценка экотоксикологического состояния почв Полярного Урала и южного Ямала // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96. – № 10. – С. 543–547.
12. Еделев А. В., Юркевич Н. В., Саева О. П., Юркевич Н. В. Критерии оценки экологического состояния окружающей среды на подвергшейся техногенному воздействию арктической территории с учётом особенностей регионального фона // ГЕО-Сибирь-2020. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. материалов XVI Международного научного конгресса, Новосибирск, 24-30 апреля 2020 г. – 2020. – С. 401–409.
13. ГОСТ 17.1.5.05-85. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков // Контроль качества воды: Сб. ГОСТов. – М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2010. – С. 305–316.

14. ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартиформ, 2013. – 35 с.
15. ГОСТ Р 56219–2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – М.: Стандартиформ, 2015. – 36 с.
16. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [Электронный ресурс]: Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020). – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
17. Севастьянов Д. В., Исаченко Т. Е., Гук Е. Н. Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2014. – № 3. – С. 82–94.
18. Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В. Эколого-геохимическая оценка поверхностных вод болотной гидрографической сети Приенисейского Заполярья // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2005. – № 5. – С. 131–143.
19. Брызгалов В. А., Иванова И. М. Антропогенная трансформация гидролого-экологического состояния рек Российской Арктики // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36. – № 3. – С. 277–288.
20. Румянцева Е. В. Анализ многолетней изменчивости водных ресурсов Норило-Пясинской озерно-речной системы в условиях антропогенного воздействия: автореф. дис. канд. геогр. наук. – Санкт-Петербург, 2012. – 24 с.
21. Базова М. М., Кошевой Д. В. Оценка современного состояния качества вод Норильского промышленного района // Арктика: экология и экономика. – 2017. – № 3. – С. 49–60.

REFERENCES

1. Belyaev D. P. Istoriya otkrytiya i osvoeniya Arktiki. – М.: Paulsen, 2019. – 280 s.
2. Kontorovich A. E. Neft' i gaz Rossijskoj Arktiki: istoriya osvoeniya v ХН veke, resursy, strategiya na XXI vek // Nauka iz pervyh ruk. – 2015. – № 61 (1). – S. 46–65.
3. Matviishin D. A. Zarubezhnyj i otechestvennyj opyt ekonomicheskogo osvoeniya arkticheskikh territorij // Arktika i Sever. – 2017. – № 26. – S. 24–37.
4. Ob Osnovah gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2035 goda: Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii № 164 ot 5 marta 2020 goda // Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii. – 2020. – № 10. – S. 4282–4291.
5. Kondratov N. A. Osvoenie Arktiki: strategicheskie interesy Rossii // Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. – 2014. – № 1. – S. 120–126.
6. Gosudarstvennaya programma Rossijskoj Federacii "Social'no-ekonomicheskoe razvitie Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii": (red. ot 31.03.2020) [Elektronnyj resurs]. – Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus»
7. Promyshlennaya ekologiya: uchebnoe posobie / V. A. Zajcev. — М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. – 382 s.
8. Sedova N. B., Kochemasova E. YU. Ekologicheskie problemy Arktiki i ih social'no-ekonomicheskije posledstviya // EKO. – 2017. – № 5. – S. 160–171.
9. Serova N. A., Serova V. A. Osnovnye tendencii razvitiya transportnoj infrastruktury Rossijskoj Arktiki // Arktika i Sever. – 2019. – № 36. – S. 42–56.
10. Golikov N. I., Saraev YU. N., Maksimova E. M., Semenov S. V. Povyshenie iznosostojkosti detalej zemlerojnoj tekhniki, ekspluatiruyushchihsya v usloviyah holodnogo klimata // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2018. – Т. 14. – № 12. – S. 543–547.
11. Alekseev I. N., Dinkelaker N. V., Oripova A. A., Sem'ina G. A., Morozov A. A., Abakumov E. V. Ocenka ekotoksilogicheskogo sostoyaniya pochv Polyarnogo Urala i yuzhnogo YAmala // Gigiena i sanitariya. – 2017. – Т. 96. – № 10. – S. 543–547.

12. Edelev A. V., YUrkevich N. V., Saeva O. P., YUrkevich N. V. Kriterii ocenki ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchej sredy na podvergshejsya tekhnogennomu vozdeystviyu arkticheskoy territorii s uchyotom osobennostej regional'nogo fona // GEO-Sibir'-2020. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya: sb. materialov XVI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 24-30 aprelya 2020 g. – 2020. – S. 401–409.
13. GOST 17.1.5.05-85. Ohrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob poverhnostnyh i morskikh vod, l'da i atmosfernih osadkov // Kontrol' kachestva vody: Sb. GOSTov. - M.: FGUP "STANDARTINFORM", 2010. – S. 305–316.
14. GOST 31861–2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. – M.: Standartinform, 2013. – 35 s.
15. GOST R 56219–2014. Voda. Opredelenie sodержaniya 62 elementov metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. – M.: Standartinform, 2015. – 36 s.
16. «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya» [Elektronnyj resurs]: Prikaz Ministerstva sel'skogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 13.12.2016 № 552 (red. ot 10.03.2020). – Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
17. Sevast'yanov D. V., Isachenko T. E., Guk E. N. Noril'skij region: ot prirodnoj specifiky k praktike osvoeniya // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2014. – № 3. – S. 82–94.
18. Efremova T. T., Efremov S. P., Melent'eva N. V. Ekologo-geohimicheskaya ocenka poverhnostnyh vod bolotnoj gidrograficheskoy seti Prienisejskogo Zapolyar'ya // Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya. – 2005. – №. 5. – S. 131–143.
19. Bryzgalo V. A., Ivanova I. M. Antropogennaya transformaciya gidrologo-ekologicheskogo sostoyaniya rek Rossijskoj Arktiki // Vodnye resursy. – 2009. – T. 36. – № 3. – S. 277–288.
20. Rummyanceva E. V. Analiz mnogoletnej izmenchivosti vodnyh resursov Norilo-Pyasinskoj ozerno-rechnoj sistemy v usloviyah antropogennogo vozdeystviya: avtoref. dis. kand. geogr. nauk. – Sankt-Peterburg, 2012. – 24 s.
21. Bazova M. M., Koshevoj D. V. Ocenka sovremennogo sostoyaniya kachestva vod Noril'skogo promyshlennogo rajona // Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2017. – № 3. – S. 49–60.

© A. B. Еделев, О. П. Саева, Н. В. Юркевич, 2021

ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ВЕЩЕСТВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Юрий Григорьевич Карин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)330-49-55, e-mail: KarinYG@ipgg.sbras.ru

Наталья Викторовна Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., заведующий лабораторией, тел. (383)330-49-55, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Приводятся методические рекомендации для обработки данных электротомографии. Учет априорной информации, в частности результатов исследования шурфов, можно произвести за счет проведения ограниченной инверсии данных ЭТ, при этом ограничивать можно или сопротивление некоторых слоев модели или положение границ некоторых слоев [1]. В используемом ПО для обработки данных электротомографии Res2dinv [2] возможно задать границу предполагаемого слоя или ограничить сопротивление участка модели (вводить локальные неоднородности с заданным сопротивлением). Но зафиксировать сопротивление конкретного слоя имеющимися программными средствами затруднительно. Предлагаемый подход позволяет учитывать параметры модели, построенной по данным шурфовки, с помощью предварительной одномерной инверсии данных электротомографии в программе Ip2win [1], с последующим экспортом полученных предполагаемых границ слоев в ПО Res2dinv для проведения ограниченной двумерной инверсии.

Ключевые слова: электротомография, экология, хвостохранилища

AN APPROACH TO PROCESSING ELECTROTOMOGRAPHY DATA FOR ESTIMATING THE VOLUMES OF SUBSTANCES IN TAILINGS

Yuri Grigorievich Karin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, tel. (383) 330-49-55, e-mail: KarinYG@ipgg.sbras.ru

Natalia Victorovna Yurkevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Head of laboratory, tel. (383) 330-49-55, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Methodical recommendations for processing the data of electrotomography are given. Taking into account a priori information, in particular the results of the study of pits, can be carried out by carrying out a limited inversion of the ET data, while it is possible to limit either the resistance of some layers of the model or the position of the boundaries of some layers [1]. In the software used for processing electrical tomography data Res2dinv [2], it is possible to set the boundary of the assumed layer or to limit the resistance of the model section (to introduce local inhomogeneities with a given resistance). But it is difficult to fix the resistance of a particular layer with the available software tools. The proposed approach makes it possible to take into account the parameters of the model built

from the pitting data using a preliminary one-dimensional inversion of the electrical tomography data in the Ip2win [1] program, followed by the export of the obtained assumed layer boundaries to the Res2dinv software for carrying out a limited two-dimensional inversion.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography, Ecology, Tailings

В некоторых случаях автоматическая двумерная инверсия дает хороший результат, согласующийся с данными бурения или шурфовки [3,4]. Но бывают ситуации, когда полученная в результате инверсии модель не соответствует априорной информации. На примере результатов исследования комсомольского хвостохранилища рассмотрим случай несоответствия получаемой в результате инверсии модели априорным данным. В частности различные электросопротивления верхней части разреза в местах постановки шурфов совсем не соответствуют визуально одинаковым пескам в трех шурфах, но и по геохимическим данным практически нет отличий между слоем песка в разных шурфах.

В результате геохимического опробования шурфов была определена стартовая модель участка хвостохранилища рис.1.

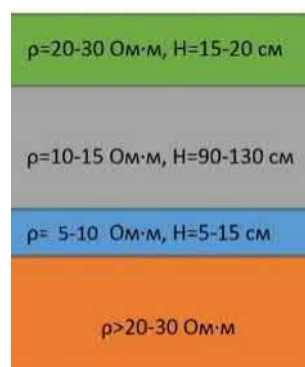


Рис. 1. Стартовая модель

На рис. 2 показаны геоэлектрический разрез полученный в результате двумерной инверсии в программе Res2dinv, результат одномерной инверсии этих же данных в программе Ip2Win и результат ограниченной двумерной инверсии с учетом предполагаемых границ, полученных в результате одномерной инверсии. Черными линиями показаны границы, полученные в результате одномерной инверсии. Получившиеся модели коррелируют с заданной стартовой моделью и априорной информацией по шурфам. В частности диапазон сопротивлений для подстилающих материнских пород 25-30 Ом·м, для песков 12-20 Ом·м, а для глин до 10 Ом·м. Мощности слоев близки к мощностям по данным шурфовки.

Для проверки предложенного подхода к обработке данных электротомографии было проведено математическое моделирование. Рассматривалась ситуация, когда изучаемый разрез осложнен двумерной неоднородностью, контрастирующей по УЭС с вмещающей средой.

На рисунке 3а показана стартовая модель и результат решения прямой задачи рис.3б. Модель схожа по строению с моделью Комсомольского хвостохранилища, слой с УЭС 15 Ом·м соответствует слою пиритных песков, тонкий более проводящий слой с УЭС 5 Ом·м аналогичен гидроизоляционному слою глин, материнские породы изображены в модели слоем с УЭС 40 Ом·м. Аномалия в виде прямоугольника на глубине 0,2 м имитирует линзу песка, с сопротивлением 40 Ом·м. Цель данного эксперимента проверить работоспособность методики при наличии выраженных двумерных неоднородностей в верхней части изучаемого разреза.

Задача состоит в восстановлении границ слоев и их сопротивлении максимально близкими к стартовой модели. Стоит отметить что важно не только восстановить границы слоев, но и сопротивление, поскольку именно УЭС используется как критерий для расчета объемов веществ хвостохранилища.

Для начала проведем двумерную инверсию в программе Res2Dinv, в результате получается геоэлектрический разрез, показанный на рисунке 3 В. Геометрия аномалии, соответствующей приповерхностному объекту с УЭС 40 Ом·м, восстанавливается достаточно уверенно, но сопротивление ее занижено.

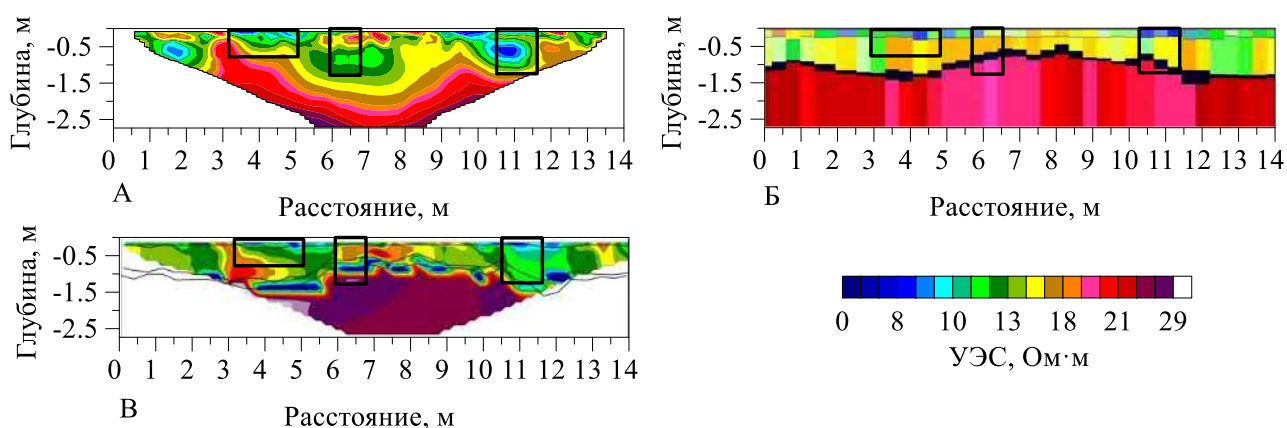


Рис. 2. Геоэлектрический разрез полученный в результате двумерной инверсии в программе Res2dinv (сверху), результат одномерной инверсии этих же данных в программе Ip2Win (в центре) и результат ограниченной двумерной нверсии с учетом предполагаемых границ, полученных в результате одномерной инверсии (снизу).

Черными прямоугольниками показаны места постановки шурфов.

При этом 5-оммный горизонт на глубине 1,08 -1,2 м вообще не выделяется. Мощность первого проводящего слоя (УЭС 11-22 Ом·м) составляет 1,2 м, а под приповерхностным объектом инверсия занижает границу между высокоомным основанием (40 Ом·м) и проводящим слоем под неоднородностью до 1,7 м.

Предположим у нас есть данные по шурфам, которые были сделаны на отметках 2,4, 7,2 и 12 м по профилю, таким образом, что приповерхностный высокоомный объект не был задет ни одним шурфом. Из данных шурфовки мы

узнали, что на глубинах 1,2 метра находится нижняя граница слоя с УЭС 5 Ом·м. Загружаем кривые зондирования в программу одномерной инверсии Ip2win, но не все, а с отметки 6 по 8,7 м профиля.

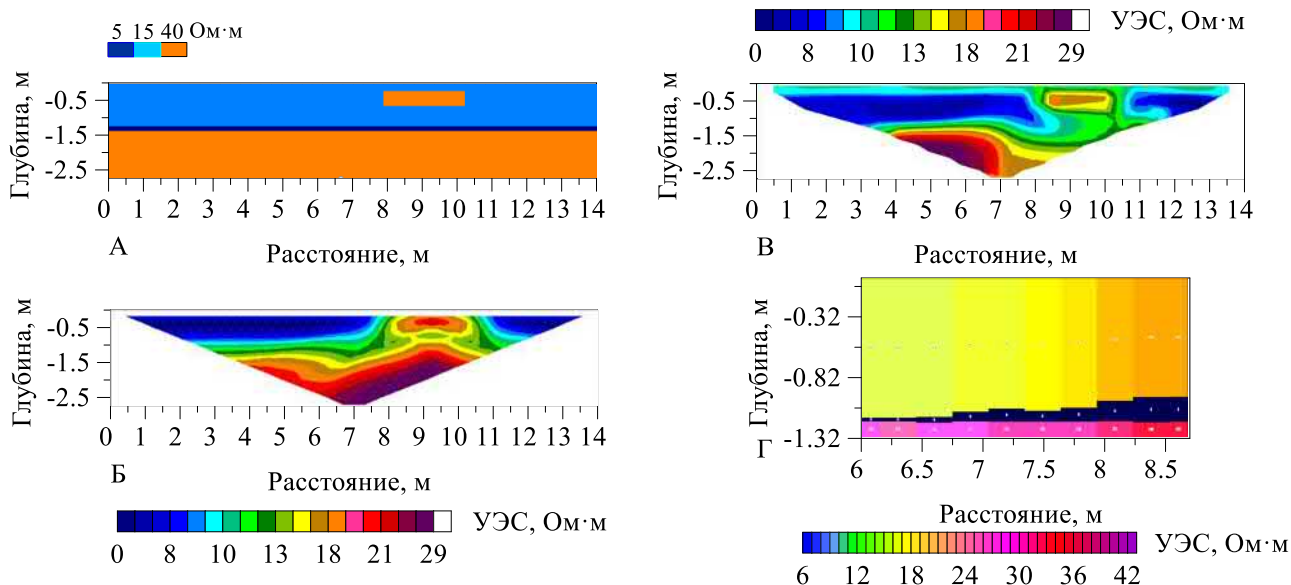


Рис. 3. Модель среды (А), результаты решения прямой (Б) и обратных задач (В-Г).

На рисунке 3Г результат одномерной инверсии выбранных кривых зондирования, при фиксации сопротивления слоя в 5 Ом·м и глубины его подошвы на отметке 1,2 м.

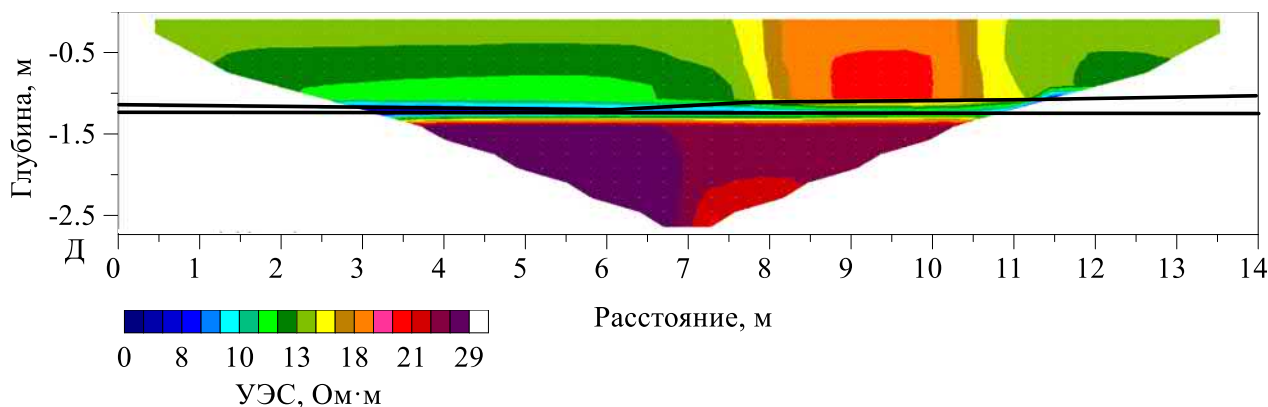


Рис. 4. Геоэлектрическая модель с учетом границ полученных в результате одномерной инверсии.

Кривые зондирования для одномерной инверсии были взяты в том числе и с того отрезка профиля, где присутствует приповерхностный 40-оммный объект. Невязка в результате проведения одномерной инверсии составила менее 3% для всех кривых. Верхняя граница слоя получилась не горизонтальной, но тем не

менее загрузим координаты границ в программу двумерной инверсии Res2dinv. На рисунке 4 показан результат двумерной инверсии с учетом полученных ранее границ. Сопротивление первого слоя варьируется в диапазоне 12,6-15,4 Ом·м, прослеживается 5-оммный слой на протяжении всего профиля, при этом геометрия приповерхностного объекта восстановилась не так удачно, как при инверсии без учета границ. Но тем не менее полученная модель ближе к стартовой модели, чем результат двумерной инверсии, проведенной без учета границ. Потому что мощность и сопротивление слоев ближе к стартовой модели. Предлагаемый подход позволяет получить геоэлектрический разрез, коррелирующий с априорной информацией.

Исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-05-00336.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Loke, M.H., 2000. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, a Practical Guide to 2D and 3D Surveys. (Penang, Malaysia).
2. Shevnin V.A., Modin I.N., IPI2win - 1D interpretation of VES profile [Электронный ресурс] URL: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
3. Bortnikova S. et al. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia) // Applied Geochemistry. – 2018. – Т. 93. – С.145-157.
4. Yurkevich N. V., Abrosimova N. A., Bortnikova S. B., Karin Y. G., Saeva O. P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2017. – V. 99. – I. 9-10. – P. 1328-1345.

REFERENCES

1. Loke, M.H., 2000. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, a Practical Guide to 2D and 3D Surveys. (Penang, Malaysia).
2. Shevnin V.A., Modin I.N., IPI2win - 1D interpretation of VES profile [Elektronnyj resurs] URL: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
3. Bortnikova S. et al. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia) //Applied Geochemistry. – 2018. – Т. 93. – S. 145-157.
4. Yurkevich N. V., Abrosimova N. A., Bortnikova S. B., Karin Y. G., Saeva O. P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2017. – V. 99. – I. 9-10. – P. 1328-1345.

© Ю. Г. Карин, Н. В. Юркевич, 2021

ИНДУКЦИОННО ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЕЕ СВЯЗЬ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ ЛЬДА

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, д.г.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, тел. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Быстро протекающая вызванная поляризация в мерзлых породах проявляется как нарушение монотонности индукционных переходных характеристик. Ее учет в методе переходных процессов проводится с помощью модели Пелтона для удельного электрического сопротивления. Найденная таким образом постоянная времени τ_{IS} определяет скорость установления напряжения при возбуждении среды источником тока. Пересчет τ_{IS} в постоянную времени τ_{VS} , характеризующую скорость установления тока при возбуждении среды источником напряжения, дает основания предполагать, что быстро протекающая поляризация мерзлых пород контролируется диэлектрической релаксацией льда.

Ключевые слова: мерзлые породы, вызванная поляризация, метод переходных процессов, лед, диэлектрическая релаксация

INDUCTIVE SOURCE INDUCED POLARIZATION OF FROZEN ROCKS AND ITS RELATIONSHIP WITH DIELECTRIC RELAXATION OF ICE

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 3, Akademika Koptuga Ave, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Prof., Chief Scientist, tel. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Fast decaying induced polarization in frozen rocks manifest itself as a not monotone induction transients. To account for induced polarization in the transient electromagnetic method, one usually uses the Pelton resistivity model. The relaxation time τ_{IS} , as found using the Pelton model, determines the decay rate of induced polarization voltage response to a current source. Conversion from τ_{IS} to the time constant τ_{VS} specifying the decay rate of the polarization current response to a voltage source, suggests that fast decaying induced polarization in frozen rocks is controlled by the dielectric relaxation of ice.

Keywords: frozen rocks, induced polarization, transient electromagnetic method, ice, dielectric relaxation

Введение

При проведении работ методом переходных процессов в районах распространения многолетнемерзлых пород часто наблюдаются сигналы с нарушением монотонности спада ЭДС, включая изменение полярности. Как выяснилось, эти эффекты представляют собой проявление быстро протекающей вызванной поляризации (БВП) мерзлых пород [1, 2]. Что касается самого явления БВП в мерзлых

породах, его природа до сих пор остается невыясненной и является предметом дискуссий.

Инверсия индукционных переходных характеристик с учетом БВП

Для учета вызванной поляризации в методе переходных процессов используется комплексное, зависящее от частоты удельное электрическое сопротивление $\rho(\omega)$, описываемое формулой Пелтона [3]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad (1)$$

либо комплексная удельная электропроводность $\sigma(\omega) = 1/\rho(\omega)$:

$$\sigma(\omega) = \frac{1}{\rho(\omega)} = \sigma_0 \left[1 + \frac{m(j\omega\tau)^c}{1 + (j\omega\tau)^c(1-m)} \right]. \quad (2)$$

В приведенных выше выражениях ρ_0 и σ_0 , соответственно, удельное электрическое сопротивление и, удельная электропроводность на постоянном токе; $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; m – поляризуемость, c – показатель степени; τ – время релаксации, с. Диапазон значений параметра m – от нуля до единицы, τ – от нуля до бесконечности. Параметр c может изменяться в пределах от 1 (одно время релаксации) до 0 (бесконечно широкое равномерное распределение времен релаксации).

Интерпретация индукционных переходных характеристик производится путем отыскания параметров, входящих в выражение (1) или (2), при которых наблюдается оптимальное соответствие модельных и экспериментальных данных.

Согласно результатам инверсии, основанной на модели Пелтона, мерзлые породы описываются характерным набором поляризационных параметров [2]. Поляризуемость заключена в диапазоне от 0.1 до 0.85, при этом большая часть значений m попадает в интервал 0.2 – 0.5; постоянная времени τ изменяется от 35 до 250 мкс при среднем значении 50 – 100 мкс. В отличие от m и τ показатель степени c изменяется в пределах от 0.8 до 1 и в большинстве случаев близок к единице. Это свидетельствует об узком диапазоне распределения времен релаксации (дебаевская модель). Пересчет поляризуемости в относительную низкочастотную диэлектрическую проницаемость дает значения порядка десятков – первых сотен тысяч [2].

Как показано в [4], параметр τ , найденный в результате инверсии индукционных переходных характеристик на основе модели Пелтона, дает постоянную времени, определяющую скорость, с которой устанавливается напряжение ВП при воздействии на образец или геологическую среду *источником тока*. Обозначим эту постоянную времени как τ_{IS} . Поскольку обычно при изучении

вызванной поляризации образцов используется именно источник тока, поляризационные параметры образцов, измеренные в лаборатории, соответствуют тем, которые определены по индукционным переходным характеристикам, и их правомерно использовать для петрофизической и геологической интерпретации данных МПП.

Иногда, например при изучении диэлектриков, воздействие на образец осуществляется источником напряжения, а измеряемой величиной является поляризационный ток, протекающий через образец. Процесс установления тока характеризуется постоянной времени τ_{VS} , которая связана с τ_{IS} соотношением [4]:

$$\tau_{VS} = \tau_{IS} (1 - m)^{1/c}.$$

В большинстве случаев при интерпретации данных методов ВП и МПП необходимость пересчета τ_{IS} в τ_{VS} не возникает, поскольку – как отмечено выше – обычно для возбуждения процессов ВП используют источник тока. Однако применительно к мерзлым породам такой пересчет приводит к важным выводам о возможной природе быстро протекающей вызванной поляризации.

Пересчет τ_{IS} в τ_{VS} показывает, что вызванная поляризация в мерзлых породах контролируется диэлектрической релаксацией льда

В статье [5] обсуждаются результаты поисков таликов методом переходных процессов в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Индукционные переходные характеристики, измеренные вдоль речного и озерного маршрутов, на ранних временах подвержены сильному влиянию быстро устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации.

На рис. 1а приведена гистограмма распределения постоянной времени τ_{IS} для речного, а на рис. 1б – озерного маршрутов; кроме этого, для каждого из маршрутов указано среднее значение постоянной времени, а также среднеквадратичная ошибка среднего. Как можно видеть, в обоих случаях можно принять, что среднее значение τ_{IS} равно 80 мкс.

Гистограммы распределения τ_{VS} показаны на рис. 1в, г. Как видно, они отличаются от соответствующих гистограмм для τ_{IS} : значения τ_{VS} характеризуются меньшим разбросом, при среднем значении τ_{VS} 46 – 50 мкс.

Гистограммы и параметры распределения τ_{VS} наводят на мысль, что быстро протекающая вызванная поляризация в мерзлых породах контролируется диэлектрической релаксацией льда. Это предположение основано на следующих фактах.

При изучении диэлектрической релаксации льда воздействие на образец осуществляется с помощью источника напряжения, а измеряемым откликом является ток [6]. Соответственно, в литературе, где рассматривается диэлектрическая релаксация льда, приводятся значения именно τ_{VS} .

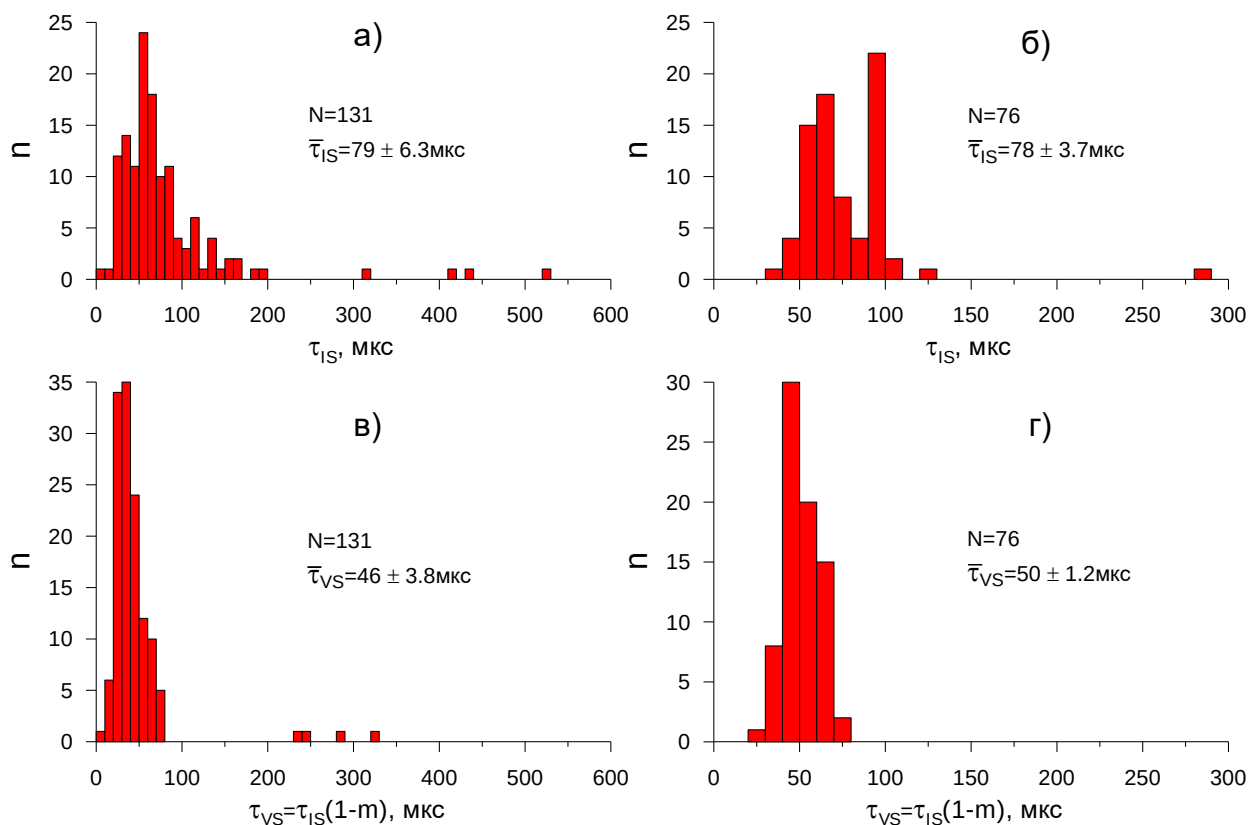


Рис. 1. Гистограммы распределения: τ_{IS} для речного (а) и озерного (б) маршрутов; τ_{VS} для речного (в) и озерного (г) маршрутов. N – общее число зондирований на маршруте.

Согласно результатам лабораторных измерений [6] постоянная времени $\tau_{VS} = 40 - 50$ мкс наблюдается при температуре льда в диапазоне от -7 до -9 °С. Такая же или близкая к ней температура характерна для верхней части геологического разреза (ВЧР) северных регионов.

Быстро протекающая индукционно вызванная поляризация в мерзлых породах и диэлектрическая релаксация льда описываются дебаевской моделью: в обоих случаях $c=1$.

В работе [2] рассматривается моделирование частотной дисперсии мерзлых пород с учетом вклада, вносимого диэлектрической релаксацией включений льда. Как показали результаты моделирования, в этом случае время релаксации и показатель степени, характеризующие вызванную поляризацию мерзлой породы, согласуются с результатами измерений. Однако эффективная низкочастотная диэлектрическая проницаемость оказывается на несколько порядков меньше по сравнению с измеренной.

Таким образом, разработка модели, объясняющей, каким образом диэлектрическая релаксация включений льда контролирует БВП мерзлых пород, является актуальной проблемой. В настоящее время можно высказать лишь некоторые предположения общего характера. На рис. 2а в схематическом виде показан

находящейся при положительной температуре элемент горной породы, включающий пору, заполненную водным раствором электролита. При воздействии внешнего электрического поля E ионы перемещаются, т. е. через пору протекает ток, пропорциональный объемной проводимости и изменяющийся синхронно с приложенным электрическим полем, т. е. элемент породы является неполяризуемым [Kozhevnikov, Antonov, 2012].

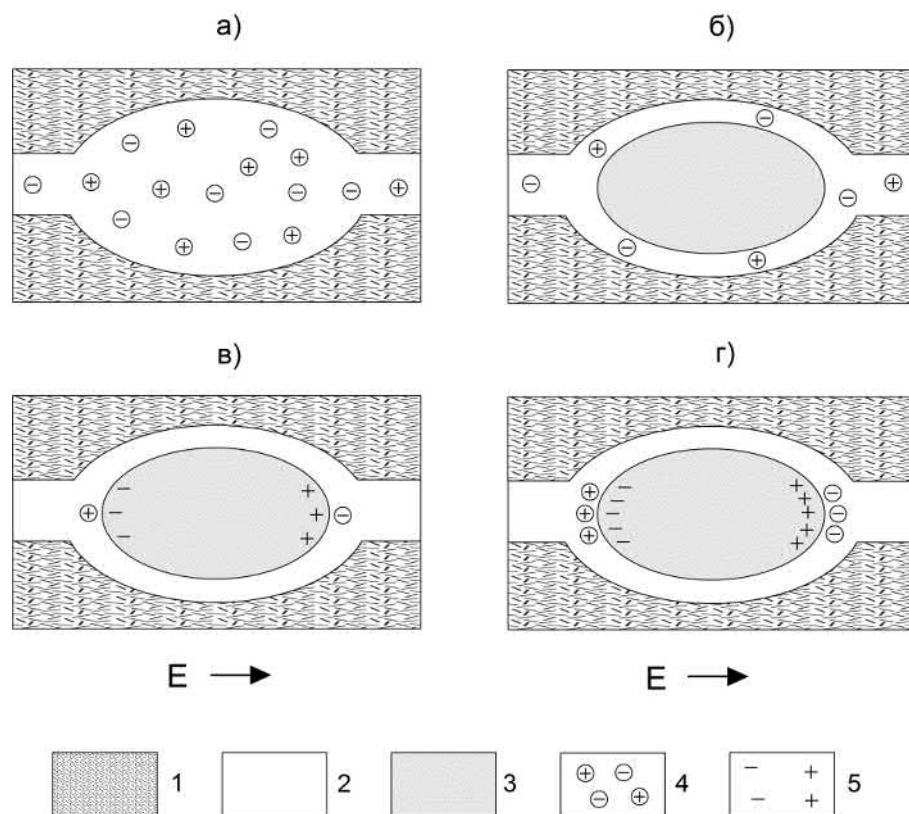


Рис. 2. Элемент объема водонасыщенной породы или грунта при положительной (а) и отрицательной (б – г) температурах. 1 – минеральная матрица; 2 – поровая вода; 3 – лед; 4 – ионы электролита в поровом растворе; 5 – связанные заряды на поверхности ледяного включения в ранней (в) и поздней (г) стадиях поляризации льда под действием электрического поля E .

При понижении температуры большая часть поровой воды превращается в лед, остается только небольшое количество незамерзшей воды в виде пленки в тонком слое между стенками поры и поверхностью ледяного включения (Рис. 2б). Отметим два важных момента. Во-первых, поперечное сечение и эффективная проводимость поры уменьшаются. Во-вторых, пора оказывается заполненной льдом, скорость установления диэлектрической поляризации которого характеризуется постоянной времени порядка 30 – 50 мкс.

Рассмотрим, что происходит при воздействии на элемент породы электрического поля в виде ступени: $E(t) = E_0 \mathbf{1}(t)$, где $\mathbf{1}(t)$ – единичная функция Хевисайда, E_0 – амплитуда ступени.

Под действием электрического поля лед начинает поляризоваться, и на поверхности ледяного включения появляются заряды (Рис. 2в), плотность которых с течением времени возрастает (Рис. 2 г). Связанные заряды, появляющиеся на поверхности ледяного включения, притягивают ионы электролита, которые затрудняют поступление ионов в тонкий слой незамерзшей воды, окружающий включение. В результате там, где на поверхности ледяного включения появляются положительные связанные заряды, накапливаются анионы, а там, где отрицательные связанные заряды – катионы.

С течением времени поверхностная плотность связанных зарядов на «торцах» ледяного включения возрастает, что приводит к повышению эффективности барьеров, или мембран, препятствующих направленному движению ионов под действием приложенного электрического поля. Для образования барьера ионам достаточно сместиться на расстояние, по порядку величины сравнимое с толщиной пленки незамерзшей воды (1 – 10 нм). Это происходит быстро, поэтому коэффициент «пропускания» k ионов, контролируемый связанными зарядами на поверхности ледяного включения, можно записать в виде: $k(t) = k_0 e^{-t/\tau}$, где τ – постоянная времени диэлектрической релаксации льда, k_0 – начальное (при $t=0$) значение k .

Для установления вызванной электрической поляризации по экспоненте с постоянной времени τ необходимо, чтобы суммарный заряд ионов, накапливающихся перед барьером, изменялся синхронно с $k(t)$. Для того, чтобы выяснить, выполняется ли это условие, а также для ответа на другие вопросы, связанные с оценкой модели в целом, необходимы специальные исследования, включая лабораторные эксперименты.

Заключительные замечания

Приведенные выше рассуждения являются попыткой дать схематическую и заведомо дискуссионную картину того, каким образом диэлектрическая релаксация льда может влиять на ионную проводимость мерзлых пород. Хотя имеются основания предполагать, что такое влияние имеет место, его механизм остается невыясненным.

На вероятное существование такого механизма, или модели, указывают следующие факты.

Быстро протекающая вызванная поляризация мерзлых пород и грунтов соответствует дебаевской ($c=1$) модели релаксации с постоянной времени $\tau \approx 40$ мкс.

Моделью с теми же параметрами описывается диэлектрическая релаксация поликристаллического льда, который является неотъемлемым компонентом мерзлых пород.

Диэлектрическая релаксация льда сама по себе не объясняет наблюдаемые значения поляризуемости и/или низкочастотной диэлектрической проницаемости мерзлых пористых сред. Поэтому представляется актуальной разработка модели, объясняющей, как диэлектрическая релаксация льда управляет потоками

ионов, перемещающихся в поровом пространстве под действием приложенного электрического поля.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331–2019-0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // Geophysical Prospecting, Vol. 54 – 2006 – P. 383-397.
2. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: A synthesis of results and models // Journal of Applied Geophysics, Vol. 82 – 2012 – P. 171-183.
3. Pelton W., Ward S., Hallof P., Sill W., Nelson P. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics, Vol. 43 – 1978 – P. 588-609.
4. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration // Geophysical Prospecting, Vol. 66 – 2018 – P. 422-431.
5. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effects // Russian Geology and Geophysics Vol. 55- 2014 –P. 1452–1460.
6. Auty R.P., Cole R.H. Dielectric Properties of Ice and Solid D₂O // The Journal of Chemical Physics, Vol. 20 – 1952 – P. 1309-1314.

© Н. О. Кожевников, 2021

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТОЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОПУТНОЙ ВОДЫ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Яна Владимировна Кожевникова

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

Александр Александрович Власов

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

Виктор Сергеевич Пермяков

ООО «Газпром добыча Надым» филиал Инженерно-технический центр, 629730, Россия, г. Надым, ул. Полярная, 1/1, начальник лаборатории контроля показателей разработки месторождений, e-mail: Permiakov.VS@nadym-dobycha.gazprom.ru

В статье описано программное обеспечение, позволяющее по электрическому сопротивлению и температуре попутной воды рассчитывать её минерализацию.

Ключевые слова: минерализация, обводнение скважин, программное обеспечение

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR THE FLOW METER OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF ASSOCIATED WATER OF GAS WELLS

Yana V. Kozhevnikova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Laboratory Assistant, e-mail: KozhevnikovaYV@ipgg.sbras.ru

Alexander A. Vlasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: KozhevnikovaYV@ipgg.sbras.ru

Viktor S. Permyakov

LLC «Gazprom mining Nadym» Branch Engineering and Technical Center, 1/1, Polar St., Nadym, 629730, Russia, Head of the Laboratory for Monitoring Field Development Indicators, e-mail: Permiakov.VS@nadym-dobycha.gazprom.ru

The article describes the software that allows the electrical resistance and temperature of associated water to calculate its mineralization.

Key words: mineralization, watering of wells, software

Введение

Накопление пластовой жидкости на забое скважины серьезно осложняет технологический процесс добычи газа. Поскольку контроль степени обводнённости в настоящее время ведется в основном геохимическими методами (гидрохимическим контролем) с ручным отбором проб [1], разработка косвенного метода, опирающегося на свойство электропроводности минерализованной воды, позволяющего диагностировать степень обводнения скважины дистанционно с помощью онлайн мониторинга посредством разработанного в ИННГ СО РАН аппаратурно-программного комплекса, имеет большое научное и практическое значение. Непрерывный мониторинг, который будет производиться с помощью данного комплекса, позволит контролировать процесс поступления жидкости из скважины в реальном времени без необходимости отбора проб на устье скважины или при газодинамических исследованиях.

Гидрохимический контроль (ГХК) основывается на существенном различии состава и минерализации конденсационной, пластовой и техногенной воды и определении их долевого присутствия в отобранной пробе. Пластовая вода (NaCl) диагностируется по концентрации натрия; техногенная вода в основном представлена растворами хлорида кальция (CaCl_2), поэтому диагностируется по концентрации кальция; конденсационные воды имеют минерализацию менее 1,0 г/л. Основной показатель - минерализация попутной воды – отражает суммарное содержание растворённых ионов. Поэтому, исключив применение на скважине техногенных растворов по значению минерализации можно определить долю пластовой воды.

Аппаратурно-программный комплекс «Измеритель УЭС жидкостей»

Для сокращения времени проведения гидрохимического контроля за составом воды, выносимой из газовых скважин был создан аппаратурно-программный комплекс, позволяющий дистанционно и моментально получать информацию о минерализации жидкости и оценивать степень обводнения скважин.

Аппаратурно-программный комплекс представляет собой контактную кондуктометрическую ячейку (датчик), периодически измеряющий электрическое сопротивление и температуру жидкости и передающий данные программному обеспечению RegistratorTDS для расчёта удельного электрического сопротивления (по калибровочной зависимости полученной в лабораторных условиях) и минерализации.

Исходные и результирующие данные представляются в виде графиков зависимости общей минерализации от времени.

Датчик устанавливается в технологическую линию обвязки добывающей скважины (рис. 1).



Рис. 1. Место установки в эксплуатационную линию одной из скважин месторождения Медвежье

Описание программы

Программный комплекс предназначен для обработки данных, поступающих с датчиков и сохранения их предварительно в файл компьютера, а потом в базу данных, которая развёрнута на сервере в ИНГГ СО РАН. Пересылка данных с компьютера на сервер осуществляется с помощью программы FileControl.

RegistratorTDS и FileControl поддерживается для операционных систем Windows XP и выше, так как подавляющее число пользователей данной программы используют компьютер на базе операционной системы Windows. Чтобы программа работала корректно, требуется предварительная установка драйверов для работы с датчиками.

Структура программного обеспечения

Для реализации поставленной задачи было решено разделить программный комплекс на четыре модуля (рис. 2). Первые два модуля – приложения RegistratorGraphicalTDS и RegistratorConsoleTDS реализованы в одном решении (RegistratorTDS), поэтому в дальнейшем будут рассматриваться вместе. Третий и четвертый модуль – консольная программа FileControl и сервер Webservice представляют собой web-сервис WebRegistratorTDS. Приложение RegistratorTDS является основной частью программного комплекса.

Первый модуль – консольная версия приложения RegistratorTDS, применяется для фиксирования в автоматическом режиме длительных измерений температуры, сопротивления, минерализации попутной воды в отдельной скважине в полевых условиях с учетом возможного отключения электропитания от

установки. Второй модуль – графическая версия приложения RegistratorTDS (Рис.), так же, как и консольная версия, позволяет наблюдать за перечисленными выше физико-химическими свойствами жидкости в скважине, но непосредственно во время испытаний. Третий и четвертый модули – сервис WebRegistratoTDS (Рис.), позволяют пользователю через сайт с регистрацией отслеживать статистику физико-химических данных по разным скважинам за определенный период времени.

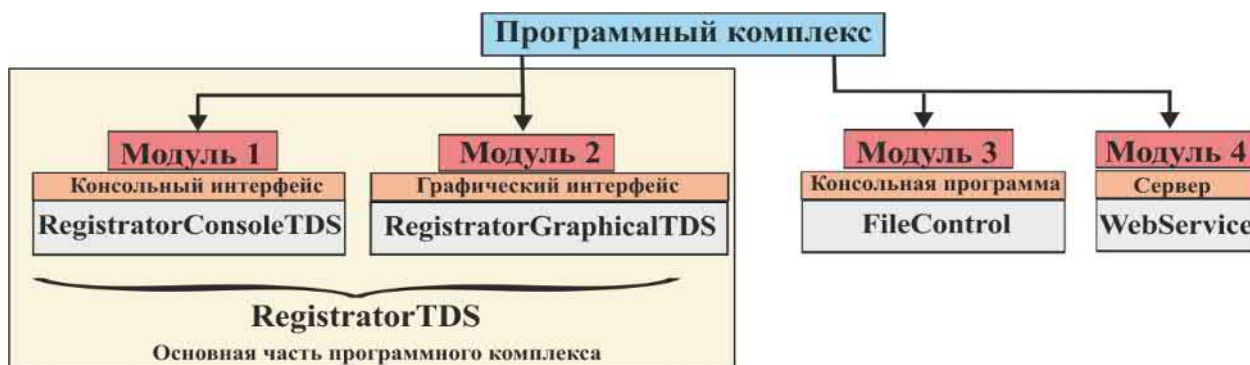


Рис. 2. Архитектурное решение проекта



Рис. 3. Графический интерфейс приложения RegistratorTDS

Приложение RegistratorTDS работает непосредственно с датчиками и сохраняет данные, полученные от них в выходные файлы fileout.txt консольного и графического интерфейсов. Принцип построения приложения RegistratorTDS состоит в написании программного ядра, к которому обращается два независимых пользовательских интерфейса: консольный и графический. Оформление приложения RegistratorTDS в виде ядра позволяет решить проблему дублирования

кода и изменять внутреннюю структуру программы, не затрагивая ее внешнего поведения.

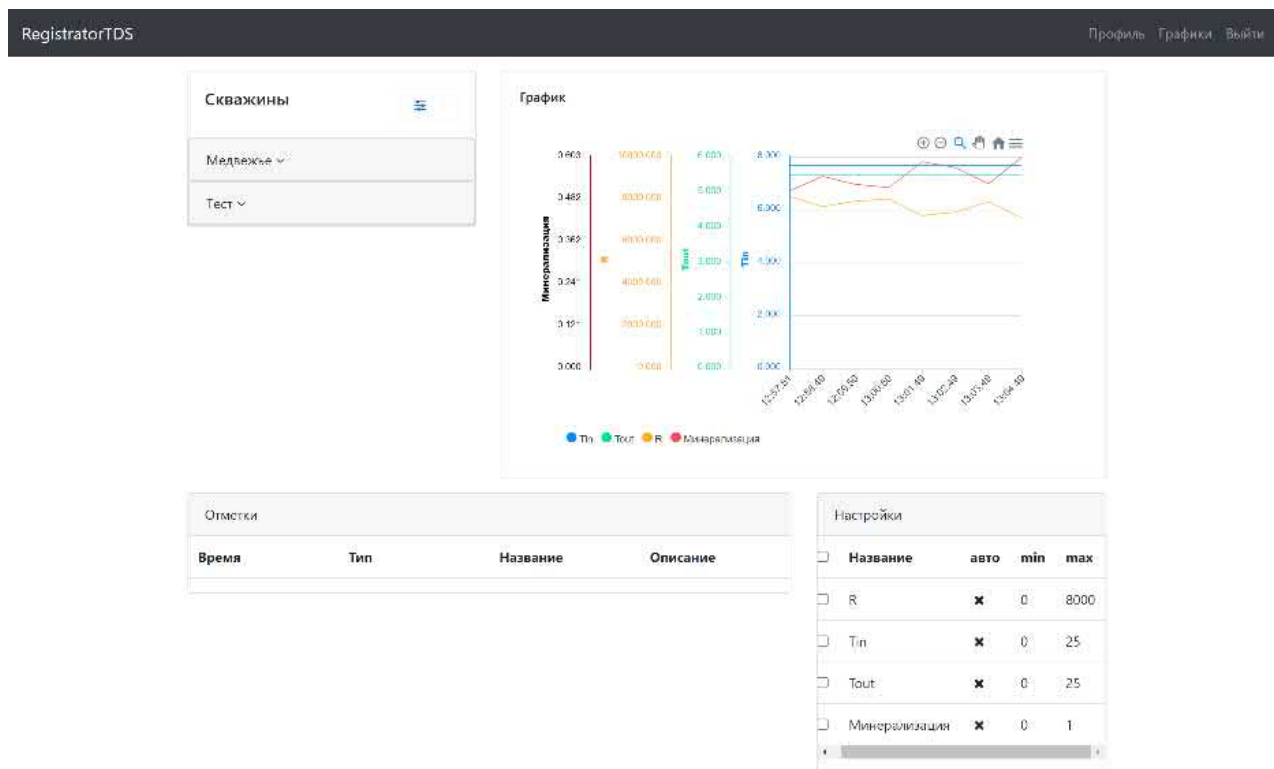


Рис. 4. WebRegistratorTDS

Веб-сервис состоит из двух частей:

- консольной программы FileControl, установленной на компьютер, используемый вместе с оборудованием, которая следит за поступлением данных в выходной файл fileout.txt, созданный при выборе графической версии приложения RegistratorTDS;

- сервера Webservice, на адрес которого FileControl отправляет данные по различным скважинам. При запросе пользователя данные по интересующим скважинам загружаются и отображаются на мониторе компьютера в виде графиков.

Программа FileControl вместе с приложением Registrator TDS устанавливается на каждый компьютер k , подключенный к датчикам газовой линии скважины n месторождения m (рис. 5). FileControl каждого компьютера читает данные из каждого выходного файла и отправляет их на фиксированный адрес в сети интернет вместе с названием скважины и названием месторождения. (Схема передачи обработанных данных по скважинам месторождений на сервер ИННГ СО РАН, рис 6).

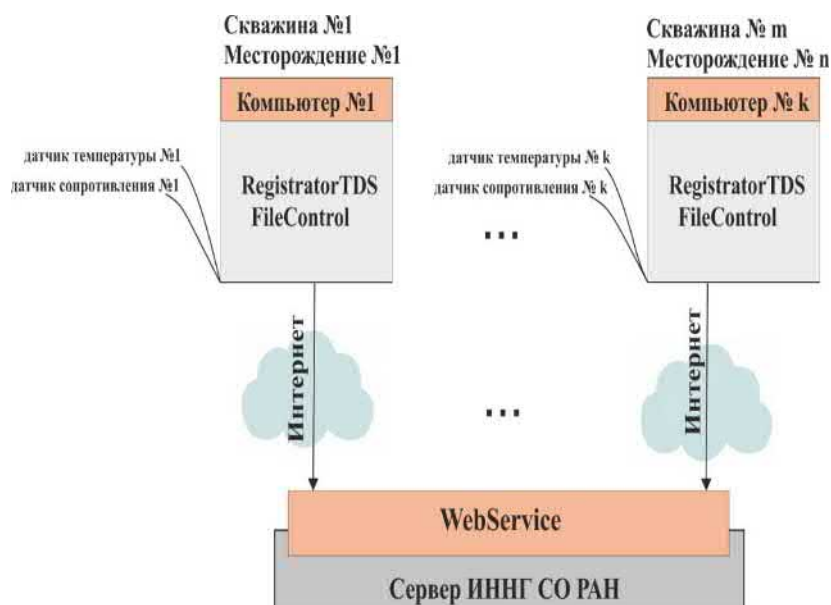


Рис. 5. Архитектурное решение проекта

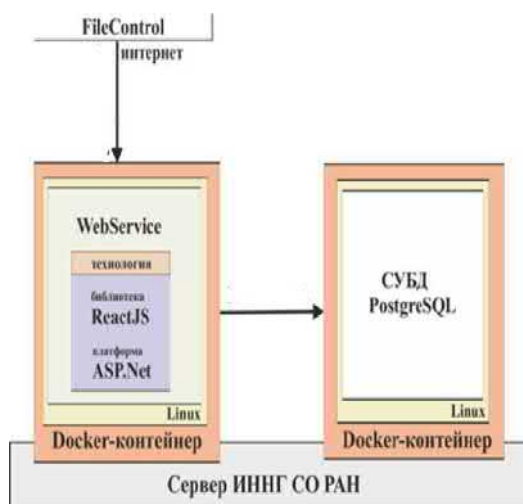


Рис. 6. Схема передачи обработанных данных по скважинам месторождений на сервер ИИНГ СО РАН

Результаты, полученные на испытаниях, проводимых на месторождении «Медвежье»

Экземпляр аппаратно-программного комплекса «Измеритель УЭС жидкостей» был испытан в лабораторных условиях и на месторождении «Медвежье». Программное обеспечение работает исправно. В результате испытаний было установлено, что расчётная минерализация составляет 0,32 г/л (мода) и диагностируется как конденсационная вода (рис. 7), что подтверждается данными гидрохимического анализа – минерализация 0,22 г/л, вода конденсационная.



Рис. 7. Данные полевых испытаний на скважине Медвежьего НГКМ

Заключение

По результатам лабораторных и полевых испытаний разработано, отлажено и доказана работоспособность программного обеспечения для измерителя УЭС жидкости в обвязке газовой скважины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пермяков В.С., Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Манштейн А.К., Карин Ю.Г., Киселев М.Н., Ильин А.В. Оптимизация схемы гидрохимического контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т. – 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 201-208.

REFERENCES

1. Permyakov V. S., Yurkevich N. V., Yeltsov I. N., Manshtein A. K., Karin Yu. G., Kiselev M. N., Ilyin A.V. Optimizatciya shemu gidrohimicheskogo kontrolya za obvodneniem gazovuh I gazokondensatnuh skvazhin // Interekspo GEO-Sibir': XV Mezhdunar. Nauch. Kongr. (g. Novosibirsk, 24-26, aprelya 2019 g.): Mezhdunar. Nauch. Konf. "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya I tehnologii poiska, razvedki I razrabotki mestorozhdenii poleznuh iskopamuh. Ekonomika. Geoekologia": Sbornik materialov v 9 t.. - 2019. - T. 2. - №. 3. - S. 201-208.

© Я. В. Кожевникова, А. А. Власов, В. С. Пермяков, 2021

О ВОЗМОЖНОСТИ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Иван Васильевич Коковкин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-геофизик, тел. +7 (913) 921-74-85, e-mail: titanoks1@yandex.ru

Павел Владимирович Громыко

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. +7 (993) 022-35-30, e-mail: gromykov@mail.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. +7 (913) 914-92-68, e-mail: fater.gs@gmail.com

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, д.г.-м.н., директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, тел. +7 (383) 333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Инженерные здания и сооружения являются объектами повышенной ответственности. При определенных условиях здания и сооружения подвержены негативным воздействиям, вызванным влиянием на них различных естественных (активация разломов, землетрясения, размытие, промерзание и т.п.) и техногенных факторов. Ввиду этого, при эксплуатации необходимо как контроль технического состояния объекта, так и действующих на него динамических воздействий, возможно несущих опасность как для конструкции в целом, так и для ее частей. Основой для развития метода контроля являются результаты исследования, посвященного изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В данной работе показаны первые результаты регистрации и анализа полученных сейсмических материалов с сейсмостанций вблизи Новосибирской ГЭС и на удалении от нее порядка 16 км. Из зарегистрированных сейсмических колебаний выделены сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия от работающего оборудования Новосибирской ГЭС. Показана возможность отслеживания изменения режимов работы гидроагрегатов на достаточном удалении от самого объекта. Показано преобразование полученного сигнала методом вычитания помех для улучшения соотношения сигнал/шум.

Ключевые слова: Новосибирская ГЭС, техногенные воздействия, сейсмический мониторинг, обратная частота, лопастная частота, коэффициент корреляции, гидроагрегат

POSSIBILITIES OF REMOTE MONITORING OF THE NOVOSIBIRSK HPP HYDRAULIC UNITS OPERATION ACCORDING TO SEISMOLOGICAL OBSERVATIONS

Ivan V. Kokovkin

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., geophysicist, tel.: +7 (913)921-74-85, e-mail: titanoks1@yandex.ru

Pavel V. Gromyko

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., researcher, tel.: +7 (993)022-35-30, e-mail: gromykovp@mail.ru

Alexey A. Bryksin

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., senior researcher, tel.: +7 (913)914-92-68, e-mail: fater.gs@gmail.com

Victor S. Seleznev

Seismological Department of FRC GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Dr. Sc., director GS SB RAS, tel.: +7 (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Engineering buildings and structures are objects of increased responsibility. Under certain conditions, buildings and structures are subjects to negative impacts caused by various environmental factors (activation of faults, earthquakes, erosion, freezing, etc.) and technological factors. During operation, it is necessary to control the technical condition of the object and the existing dynamic effects, possibly danger, for the structure and for its parts. The basis for the development of the control method is the results of research devoted to the study of the dynamic effects arising in the dams and the structures hydroelectric power station. This paper shows the results of the analysis of the obtained seismic materials from seismic stations near the Novosibirsk hydroelectric power station and at a distance of about 16 km from it. From the recorded seismic vibrations, signals were identified, the sources of which are the technogenic effects of the operating equipment of the Novosibirsk hydroelectric power station. The possibility of tracking changes in operating modes of hydraulic units at a great distance from the object itself is shown. Shown is the transformation of the received signal by the noise subtraction method to improve the signal-to-noise ratio.

Keywords: Novosibirsk hydroelectric power station, technogenic impacts, seismic monitoring, turnover frequency, blade frequency, correlation coefficient, hydraulic unit

Данная работа посвящена развитию метода инженерно-сейсмического мониторинга, разработанного в ФИЦ ЕГС РАН [1], и основана на результатах исследований по изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В ряде работ [2-5] показана возможность мониторинга технического состояния сооружения ГЭС, основанная на слежении за изменением его собственных частот, и показан способ осуществления дистанционного контроля над вибрационным состоянием промышленного оборудования по данным, полученным с сейсмических станций, удаленных от гидроэлектростанций на несколько километров.

В данном исследовании показан подход для отслеживания работы промышленного оборудования Новосибирской гидроэлектростанции (далее НГЭС) на гораздо большем удалении.

Для анализа были использованы трехкомпонентные сейсмические записи, полученные на сеймостанции «Ключи» (далее Ключи), которая расположена в посёлке Каменушка, в 16 км от гидроэлектростанции НГЭС. Для регистрации сигнала использован регистратор «Байкал-8» и сейсмоприемник «GD-4.5», установленный на десятиметровую трубу скважины со следующей ориентацией осей: Z – вертикально, N – север и E – восток. Полученные данные сопоставлялись с результатами регистрации сейсмической станции НГЭС (NHES) Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН, расположенной вблизи от Новосибирской ГЭС (500 м). Станция «NHES» оснащена трехкомпонентным широкополосным высокочувствительным сейсмометром «Guralp CMG-3ESPСD». Ориентация осей соответствует станции Ключи. Схема расположения сеймостанций и НГЭС представлена на рис. 1.

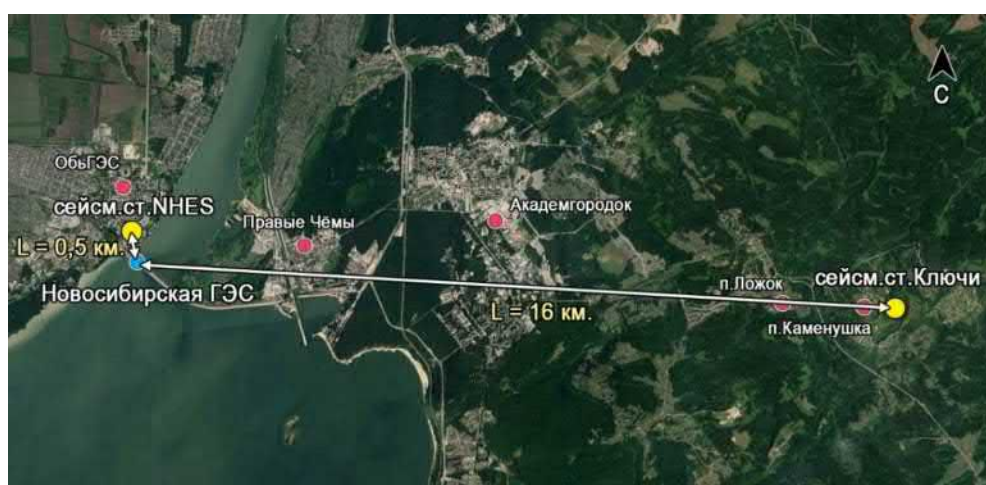


Рис. 1. Схема расположения сеймостанций

В качестве изучаемого сигнала рассматривались колебания на лопастной частоте семи гидроагрегатов НГЭС мощностью 70 МВт, включающих в себя вертикальные поворотно-лопастные турбины ПЛ 30-В-800 и гидрогенераторы СВ 1343/140-96 УХЛ4. Формально лопастная частота рассчитывается как произведение количества лопастей на рабочем колесе турбины на оборотную частоту вращения ротора. Обратная частота является результатом деления частоты переменного тока в сети (50 Гц), на число полюсов гидрогенератора (48 единиц), и составляет порядка 1.04 Гц. При учете, что турбина включает в себя пять лопастей, лопастная частота равна 5.21 Гц.

Для обработки зарегистрированных данных использовано программное обеспечение «Spectrum», разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данное программное обеспечение позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы, позволяя определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A_{\omega}(t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (1)$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 250$ с, шаг окна 50 сек).

На рис. 2 представлены спектры сигналов, зарегистрированных на сеймостанциях НГЭС и Ключи. Из рисунка видно, что в спектрах присутствует монохроматический сигнал с частотой 5.2 Гц. На станции НГЭС, ввиду её малой удаленности, исследуемый сигнал имеет наиболее высокие значения. Также в спектре видны кратные для оборотной (1.04 Гц) частоты.

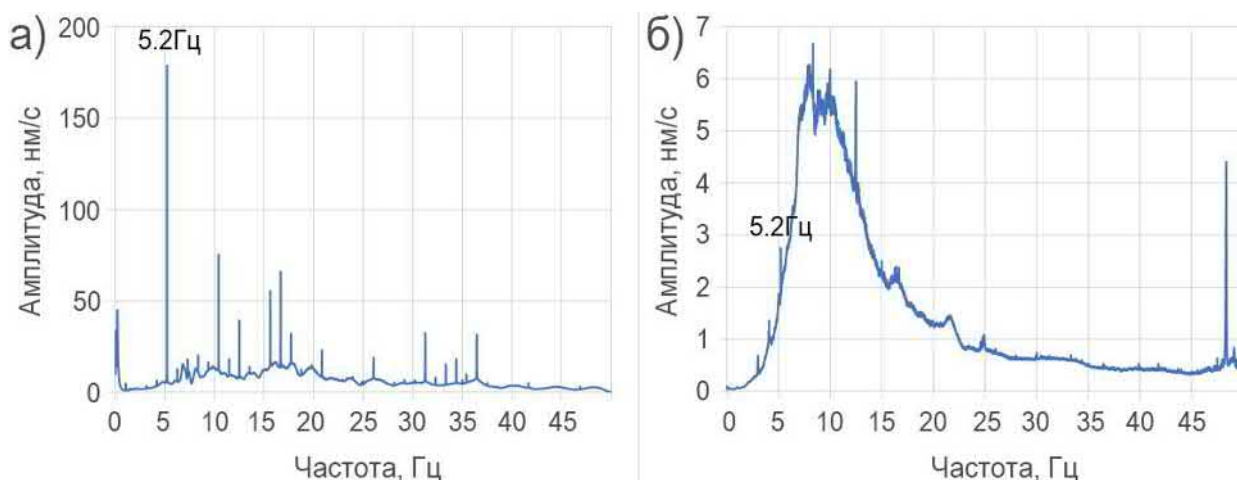


Рис. 2. Графики усредненного спектра сейсмической записи зарегистрированной на (а) сеймостанции НГЭС и на (б) сеймостанции Ключи. Z-компонента

На текущем спектре с записи удаленной станции Ключи исследуемая частота сигнала проявлялась только на вертикальной компоненте и имела сравнительно низкие значения. Для сопоставления данных, зарегистрированных удаленной и приближенной к Новосибирской ГЭС сеймостанциями, был выбран период с 15 по 22 января 2021 года. В данный период на текущих спектрограммах записей наблюдались скачкообразные изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, вызванные изменением работы оборудования на НГЭС (рис. 3).

На рис. 4 представлены графики изменения амплитуд Z-компоненты колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные с записей сеймостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый), в период с 15 по 22 января 2021 г. Наблюдается хорошая корреляция между сигналами с двух станций, несмотря на отличие по амплитуде более чем в 40 раз. Следовательно, можно сделать вывод, что даже на расстоянии 16 км возможно отслеживать режимы работы оборудования на ГЭС.

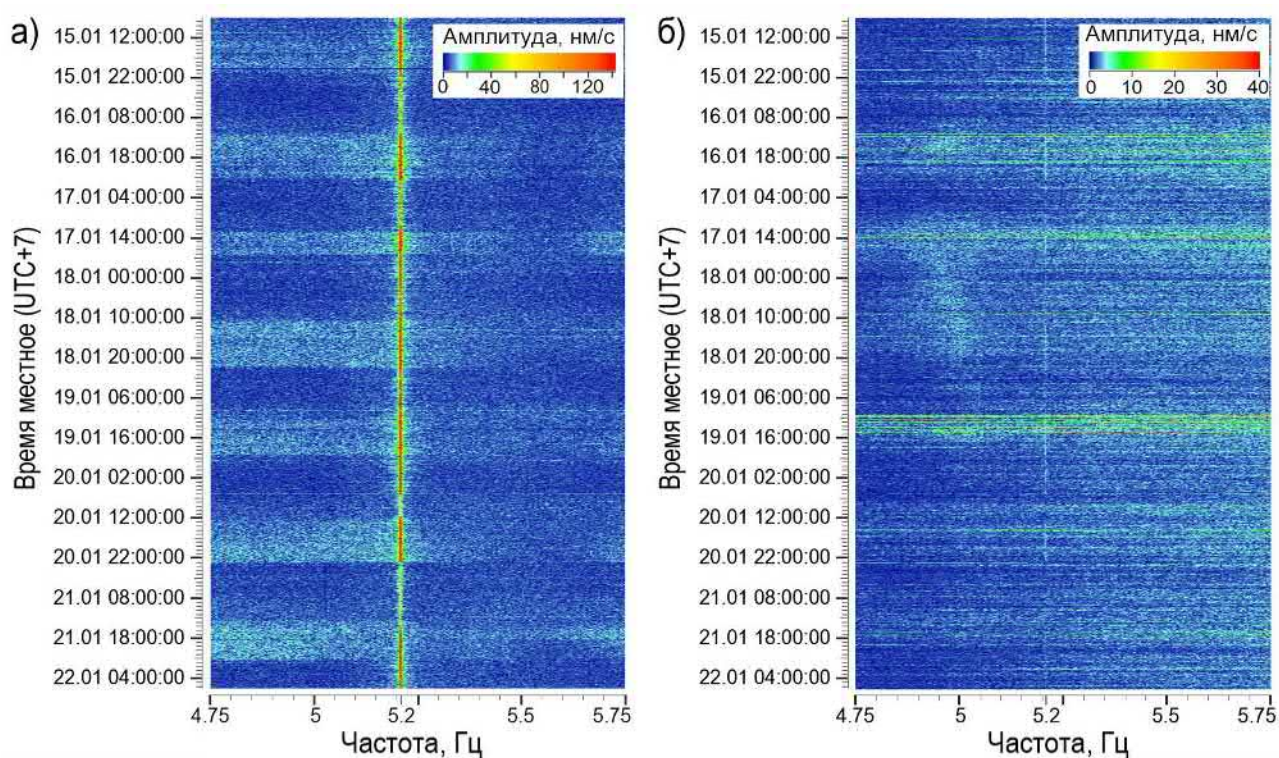


Рис. 3. Спектрограммы сигналов по сейсмостанции НГЭС (а) и сейсмостанции Ключи (б) с 15 по 22.01.2021 г в вырезке с 4.75 до 5.75 Гц. Z-компонента



Рис. 4. Графики изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

Была проведена оценка схожести полученных сигналов. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона, определяемый следующими параметрами:

Пусть $(X_1, \dots, X_n), (Y_1, \dots, Y_n)$ – набор значений двух факторов на выборке объёма n .

Выборочный коэффициент корреляции (т.е. коэффициент корреляции, определяемый по выборке) равен:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$.

Применив формулу (2) к данным, отображенным на рис. 4, было получено значение $r=0.7859$. Результат не дает однозначной связи между двумя рядами данных. Это может быть связано как с неоднородностью среды между двумя точками наблюдения, так и с возникающими помехами техногенного и естественного происхождения.

Следующим шагом была предпринята попытка отфильтровать основной сигнал от существующих фоновых помех.

Известно, что колебания, несущие информацию о работе оборудования, имеют высокую добротность и сосредоточены в области частоты 5.2 Гц. Исходя из этого было сделано следующее предположение: если вычесть из амплитуды колебаний на частоте исследуемого сигнала (5.2 Гц), амплитуду соседнего фона (например, амплитуду колебаний на частоте 5.1 Гц, которая содержит информацию только о локальных микросейсмах), возможно улучшить соотношение сигнал/помеха.

На рис. 5 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц с 15 по 22 января 2021 г. Синим цветом представлены графики изменения значения колебаний, зарегистрированных на станции НГЭС, оранжевым – на станции Ключи. Полученное значение коэффициента корреляции (2) возросло до значения $r=0.83846$. Получен результат, подкрепляющий вышеописанную гипотезу.

С другой стороны, если рассматривать не весь временной интервал, а в среднем сутки, то коэффициенты меняются. На рис. 6 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц за 16 и 17 января 2021 г. Видно, что полученные значения коэффициентов несколько различаются: в период за 16 января 2021 г значение $r=0.92091$, а за 17 января 2021 г значение $r=0.82336$.

Возможно, что полученные коэффициенты корреляции зависят от колебаний на оборотной частоте 1.04 Гц, которая ведет себя нелинейно относительно колебаний на лопастной частоте. На рис. 7 изображены графики изменения амплитуд колебаний на лопастной (а) и оборотной частоте (б). На графиках хорошо видно, что максимальное значение коэффициента $r=0.92091$ было получено в то время, когда колебания на оборотной частоте почти не менялись (интервал 1). А более низкие значения $r=0.82336$ отвечают моменту резкого роста амплитуд на оборотной частоте (интервал 2).

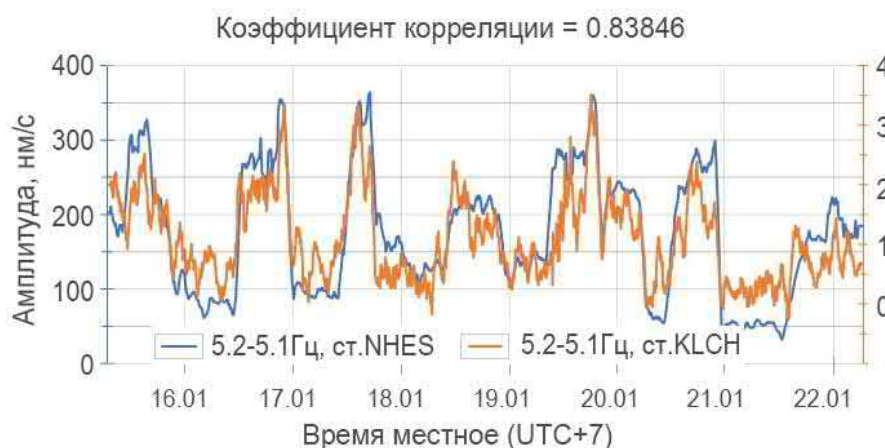


Рис. 5. График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

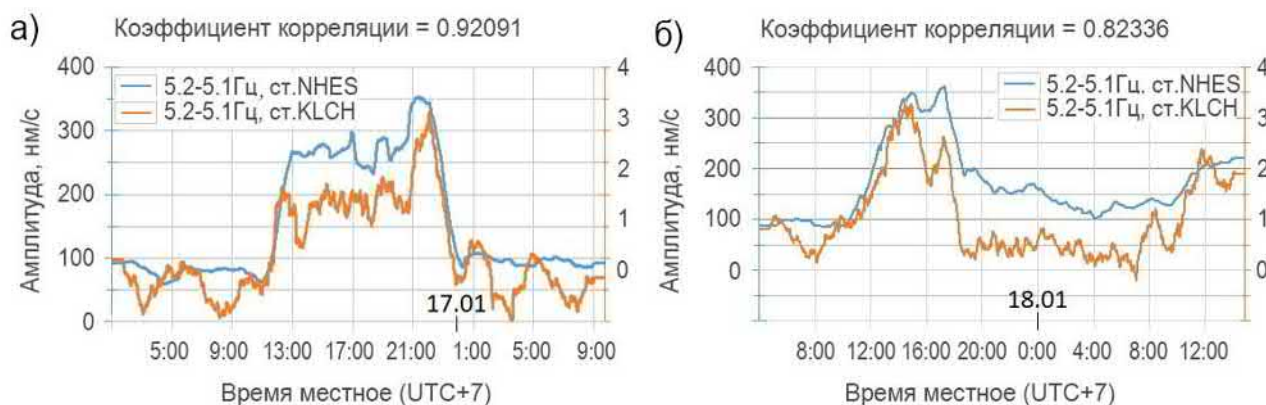


Рис. 6. График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) 16(а) и 17(б) января 2021 г. Z-компонента

Заключение

В результате проведенного исследования показана возможность отслеживания режимов работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС на удалении 16 км от источника, несмотря на достаточный уровень помех.

Показан способ математического преобразования сейсмической записи для улучшения соотношения сигнал/помеха, основанный на разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на выделенной частоте относительно фона. Данный способ требует как доработки, так и дополнительной апробации, ввиду полученных различных значений коэффициентов корреляции в различные временные промежутки.

Для дальнейшего анализа необходима информация о работе оборудования с гидроэлектростанции.

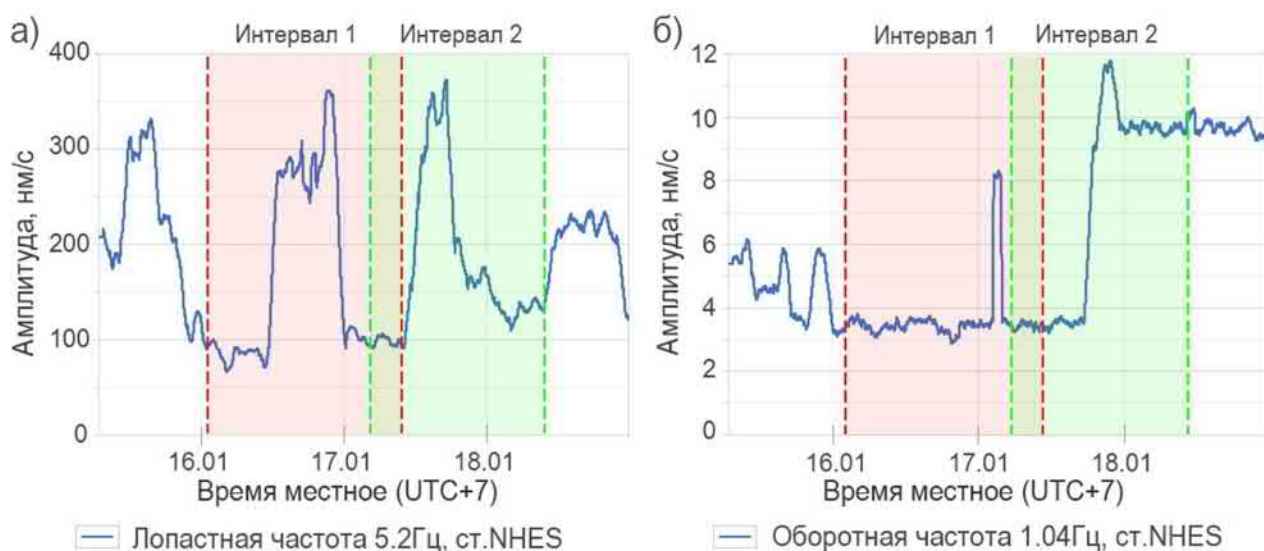


Рис. 7. График изменения амплитуд колебаний на лопастной 5.2 Гц (а) и оборотной частоте 1.04 Гц (б), полученные на сейсмостанции НГЭС. Z-компонента

Авторы выражают благодарность коллегам из Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН за содействие и предоставленные материалы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: Патент на изобретение РФ, № 2461847 // Бюл. № 26. 20.09.2012.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А., Ting-Yu H., Argyianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. 2019. – Т. 1. № 1. – С. 23-34.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Кречетов Д.В. О мониторинге технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по изменениям ее собственных частот // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Приложение на CD-диске: доклады и выступления на секциях конференции: [Электронный ресурс]. 2017. – С. 55-60.
4. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. Методика дистанционного контроля над состоянием оборудования и сооружений гидроэлектростанций по данным сейсмических наблюдений // Гидроэлектростанции в XXI веке. Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. – 2016. – С. 80-87.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. О мониторинге оборудования и сооружений крупных ГЭС на основе данных сейсмических наблюдений //

REFERENCES

1. Seleznev V.S., Liseykin A.V., Bryksin A.A. Sposob nepreryvnogo monitoringa fizicheskogo sostoyaniya zdaniy i/ili sooruzheniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya: Patent na izobreteniya RF. № 2461847 // Byul. № 26. 20.09.2012
2. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A., Ting-Yu H., Arygianni V. Osobennosti monitoringa sobstvennykh chastot plotin gidroelektrostantsiy (na primere Chirkeyskey GES) // Rossiyskiy seysmologicheskiy zhurnal. 2019. – T. 1. № 1. – S. 23-34.
3. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Krechetov D.V. O monitoringe tekhnicheskogo sostoyaniya plotiny Sayano-Shushenskoy GES po izmeneniyam eye sobstvennykh chastot // Gidroenergetika. Gidrotekhnika. Novyye razrabotki i tekhnologii. Prilozheniye na CD-diske: doklady i vystupleniya na sektsiyakh konferentsii: [Elektronnyy resurs]. 2017. – S. 55-60.
4. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Gromyko P.V., Krechetov D.V. Metodika distantzionnogo kontrolya nad sostoyaniyem oborudovaniya i sooruzheniy gidroelektrostantsiy po dannym seysmicheskikh nablyudeniyy // Gidroelektrostantsii v XXI veke. Sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. spetsialistov, aspirantov i studentov. – 2016. – S. 80-87.
5. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Gromyko P.V., Krechetov D.V. O monitoringe oborudovaniya i sooruzheniy krupnykh GES na osnove dannyykh seysmicheskikh nablyudeniyy // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannyykh. Materialy XI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. – 2016. – S. 181-185.

© И. В. Коковкин, П. В. Громыко, А. А. Брыксин, В.С. Селезнев, 2021

МИНЕРАЛЬНЫЕ ПИТЬЕВЫЕ СТОЛОВЫЕ ВОДЫ АЛТАЯ: ХАРАКТЕРИСТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Анна Андреевна Коханенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства». Россия, Томская область, г. Северск 636035, ул. Мира, 4; младший научный сотрудник, тел. (3822)515-029, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Наталья Геннадьевна Сидорина

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства». Россия, Томская область, г. Северск 636035, ул. Мира, 4; Руководитель ИЛ природных лечебных ресурсов, тел. (3822) 515-029, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Елена Анатольевна Король

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства». Россия, Томская область, г. Северск 636035, ул. Мира, 4; младший научный сотрудник, тел. (3822)515-029, e-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Дана характеристика подземных пресных вод Республики Алтай. Проведена типизация этих вод. Показаны особенности физико-химического состава природных столовых вод Горного Алтая и перспективы их использования.

Ключевые слова: Республика Алтай, питьевые воды, источники, бутилированные воды

MINERAL DRINKING TABLE WATER OF ALTAI: CHARACTERISTICS AND PROSPECTS OF USE

Anna A. Kokhanenko

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; junior researcher. Phone / fax: (382 2) 515-029. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Natal G. Sidorina

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; junior researcher. Phone / fax: (382 2) 515-029. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

Elena A. Korol

Federal State Budgetary Institution "Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency". Russia, Tomsk region, Seversk 636035, st. Mira, 4; junior researcher. Phone / fax: (382 2) 515-029. E-mail: sidorinang@med.tomsk.ru

The characteristics of fresh underground waters of the Altai Republic are given. The typification of these waters has been carried out. The features of the physical and chemical composition of natural table waters of Gorny Altai and the prospects for their use are shown.

Keywords: Altai Republic, drinking water, springs, bottled water

Проблема обеспечения населения чистой питьевой водой имеет большое социальное значение и играет важную роль в сохранении здоровья людей. Решением проблемы станет увеличение объёмов розлива минеральных природных столовых вод, добываемых в экологически чистых районах и соответствующих критериям, предъявляемым к питьевым водам без предварительной подготовки.

В работе использованы данные собственных исследований слабоминерализованных вод Республики Алтай. Степень изученности ресурсов подземных вод региона приведена на основе фондовых материалов Территориального центра «Алтайгеомониторинг» [1].

Республика Алтай представляет собой горную страну с достаточно сложным геологическим строением - интенсивная разломная тектоника и неотектоника, пестрый вещественный состав геологических образований, разнообразная металлогения. Подземные воды Горного Алтая приурочены к водоносным зонам и комплексам с трещинными, трещинно-жильными, трещинно-карстовыми скоплениями вод в терригенных, карбонатных, осадочно-вулканогенных, метаморфических и интрузивных породах разнообразного состава и широкого диапазона – от мезозойского до протерозойского возраста. В межгорных артезианских бассейнах подземные воды локализуются в четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложениях.

Гидрохимический состав подземных вод палеозойских и протерозойских пород в основном гидрокарбонатный кальциевый, реже со смешанным катионным составом [2]. Воды пресные с минерализацией 0,02-1,2 г/дм³. Подземные воды артезианских бассейнов характеризуются от гидрокарбонатного кальциевого до сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного натриевого и кальциево-магниевого состава с минерализацией 0,5-5,4 г/дм³.

Микроэлементный состав подземных вод определяется в основном гидрогеохимическими особенностями территории. Это находит отражение в повышенных региональных концентрациях ряда элементов: железо, марганец, алюминий, свинец, барий, серебро, редкие металлы, ртуть, селен, медь, цинк.

Кроме эксплуатируемых водозаборов функционируют около 700 скважин, каптирующих водные объекты широкого возрастного диапазона от четвертичного до протерозойского возраста. Около четверти всех изученных водных объектов (скважины, родники) представляют интерес с точки зрения физиологической полноценности вод и их оптимального гидрохимического состава [3]. Несмотря на малую минерализацию, подземные пресные воды представляют собой достаточно сложные многокомпонентные гидрогеохимические системы. В данных водах в различных концентрациях обнаруживаются около 80 химических элементов, содержание которых нормируется в зависимости от их биохимической значимости [4].

Всемирной организацией здравоохранения установлено, что употребление питьевой воды с низкой минерализацией способствует вымыванию солей из организма [5]. Исследователи ВОЗ рекомендуют в питьевых целях употреблять воду с минерализацией 250-500 мг/дм³ (для гидрокарбонатных вод). Также установлены необходимые минимальные содержания в питьевой воде магния (10 мг/дм³) и кальция (20 мг/дм³). Оптимальными концентрациями являются для магния 20-30 мг/дм³, а для кальция 40-80 мг/дм³.

При проведении курортологического обследования отдельных территорий Республики Алтай были исследованы подземные воды скважин и источников в пределах Чемальского, Майминского Усть-Коксинского, Турочакского, Онгудайского районов и др. (таблица).

Характеристика пресных вод Горного Алтая
(по данным опробований ТНИИКиФ 2004-2020 гг.)

Водопроявление	М, г/дм ³ ----- рН	Химическая формула	Тип воды
Майминский район			
Источник б/о «Алтай Резорт»	0,36	(HCO ₃ +CO ₃) 97 Cl 2 SO ₄ 1	Гидрокарбонатный кальцевый
	8,3	Ca 85 Mg 9 (Na+K) 6	
Источник «Северный»	0,36	HCO ₃ 95 Cl 5	Гидрокарбонатный кальцевый
	7,6	Ca 73 Mg 19 (Na+K) 8	
Источник «Союзгинский» п. Союзга	0,54	HCO ₃ 84 Cl 8 SO ₄ 8	Гидрокарбонатный кальцевый
	7,4	Ca 76 Mg 16 (Na+K) 8	
Источник, д. Карасук	0,49	HCO ₃ 91 Cl 6 SO ₄ 3	Гидрокарбонатный кальцевый
	7,94	Ca 80 (Na+K) 10 Mg 10	
Скважина № 339 Д с. Майма	0,67	HCO ₃ 73 Cl 19 SO ₄ 8	Гидрокарбонатный магниево-кальцевый
	7,8	Ca 56 Mg 30 (Na+K) 14	
Чемальский район			
Скважина №2 г/к «Марьин остров»	0,5	(HCO ₃ +CO ₃) 82 SO ₄ 14 Cl 4	Гидрокарбонатный магниево-кальцевый
	8,0	Ca 61 Mg 27 (Na+K) 12	
Онгудайский район			
Источник с. Онгудай	0,37	(HCO ₃ +CO ₃) 76 SO ₄ 19 Cl 5	Гидрокарбонатный натриево-кальцевый
	8,6	Ca 67 (Na+K) 21 Mg 12	
Родник с. Хабаровка	0,46	HCO ₃ 86 Cl 8 SO ₄ 6	Гидрокарбонатный магниевый
	8,3	Mg 22 (Na+K) 15 Ca 63	
Усть-Канский район			
Источник с. Каракол	0,41	(HCO ₃ + CO ₃) 91 Cl 5 SO ₄ 4	Гидрокарбонатный кальцевый
	8,4	Ca 70 (Na+K) 17 Mg 13	
Усть-Коксинский			
Источник «Асонов ключ» п. Теректа	0,44	HCO ₃ 87 SO ₄ 9 Cl 4	Гидрокарбонатный натриево-кальцевый
	8,0	Ca 58 (Na+K) 25 Mg 17	
Чойский район			
Источник урочище Чарбой	0,35	HCO ₃ 71 SO ₄ 27 Cl 2	Сульфатно-гидро-кар- бонатный нат-риево- кальцевый
	7,67	Ca 59 (Na+K) 31 Mg 10	
Шебалинский район			
Родник д. Верх-Апшуяхта	0,44	(HCO ₃ + CO ₃) 89 Cl 7 SO ₄ 4	Гидрокарбонат- ныйнатриево-магни- ево-кальцевый
	8.1	Ca 48 Mg 27 (Na+K) 25	

Результаты исследований подземных вод Республики Алтай показывают наличие пресных вод с минерализацией от 0,35 мг/дм³ до 0,54 мг/дм³. По составу в основном это гидрокарбонатные кальциевые, гидрокарбонатные магниевые, гидрокарбонатные натриево-кальциевые воды и др. Содержание магния в водах составляет от 7,8 до 30,0 мг/дм³, а кальция – 51,0-92,0. Таким образом, подземные питьевые воды данного региона вполне соответствуют оптимальному гидрохимическому составу по минерализации и содержанию общей жёсткости.

Стремление к здоровому образу жизни, а так же низкое качество питьевой воды из систем централизованного водоснабжения, привело к тому, что всё большее число людей предпочитают употреблять питьевую воду, разлитую в бутылки. Основные требования к качеству упакованных вод регламентируются Техническим регламентом ЕАЭС 044/2017 «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» [6]. В данном документе четко разграничены такие виды вод, как «природная» и «обработанная». В частности, к «природным» может быть отнесена вода, добытая из конкретного источника (скважины), к ней допустимо применять только способы обработки (очистки), которые не изменяют содержание и соотношение катионов, анионов и биологически активных компонентов. Кроме того только природную питьевую воду допустимо использовать при производстве воды для детского питания. Также согласно этому документу питьевая вода должна быть безопасна для потребления человеком по микробиологическим, токсикологическим и радиологическим показателям.

Таким образом, Республика Алтай обладает достаточным запасом пресных вод, которые при благополучном состоянии могут использоваться для розлива минеральных питьевых столовых вод. Известно, что употребление бутилированных натуральных столовых вод оказывает благоприятное общепфизиологическое действие, повышает иммунные функции организма и стабилизирует водно-солевой баланс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кац В.Е. Хозяйственно-питьевые воды Республики Алтай и проблемы их изучения // Геоэкология Алтае-Саянской горной страны. – 2004. – Вып. 1. – С. 123–125.
2. Ролдугин В.В., Кац В.Е., Кочеева Н.А. Система мониторинга подземных вод Республики Алтай. Становление, проблемы, результаты. // Астраханский вестник экологического образования. – 2018. - № 1 (43). - С. 60-69.
3. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004 – 677 с.
4. Джабарова Н.К., Кац В.Е., Коханенко А.А., Сидорина Н.Г., Тронова Т.М. Курортно-рекреационный потенциал Горного Алтая: изученность и перспективы освоения. // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2019. - № 3 (54). - С. 50-65.
5. Руководство по обеспечению качества питьевой воды. ВОЗ. – Женева. - 2004.
6. Технический регламент Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 044/2017 «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду».

REFERENCES

1. Kac V.E. Hozyajstvenno-pit'evye vody Respubliki Altaj i problemy ih izucheniya // *Geoekologiya Altae-Sayanskoj gornoj strany*. – 2004. – Vyp. 1. – S. 123–125.
2. Roldugin V.V., Kac V.E., Kocheeva N.A. Sistema monitoringa podzemnyh vod Respubliki Altaj. Stanovlenie, problemy, rezul'taty. // *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. – 2018. - № 1 (43). - S. 60-69.
3. Krajnov S.R., Ryzhenko B.N., SHvec V.M. Geohimiya podzemnyh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty. M.: Nauka, 2004 – 677 s.
4. Dzhabarova N.K., Kac V.E., Kohanenko A.A., Sidorina N.G., Tronova T.M. Kurortno-rekreacionnyj potencial Gornogo Altaya: izuchennost' i perspektivy osvoeniya. // *Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. – 2019. - № 3 (54). - S. 50-65.
5. Rukovodstvo po obespecheniyu kachestva pit'evoj vody. VOZ. – ZHeneva. - 2004.
6. Tekhnicheskij reglament Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza TR EAES 044/2017 «O bezopasnosti upakovannoj pit'evoj vody, vklyuchaya prirodnyuyu mineral'nuyu vodu».

© *A. A. Коханенко, Н. Г. Сидорина, Е. А. Король, 2021*

ОЦЕНКА РАССТОЯНИЯ ДО ГРАНИЦЫ ПЛАСТА ПО ДАННЫМ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Дмитрий Юрьевич Кушнир

Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 4а, научный сотрудник, e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Николай Николаевич Велькер

Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 4а, ведущий научный сотрудник, e-mail: Nikolay.Velker@bakerhughes.com

Дарья Владимировна Андорная

Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 4а, научный сотрудник, тел. +7(383)373-17-50 (доб. 4039), e-mail: Darya.Andornaya@bakerhughes.com

Юрий Евгеньевич Антонов

Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 4а, научный сотрудник, e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

Оценка расстояния до ближайшей границы пласта во время бурения упрощает проводку наклонно-направленных скважин. Для оценки этого расстояния предлагается подход поточечной инверсии данных индукционного каротажа на основе двухслойной геоэлектрической модели пласта с использованием нейронных сетей. Параметры модели определяются с помощью каскада нейронных сетей по набору измерений прибора. Первая сеть вычисляет удельное сопротивление слоя, содержащего точку записи прибора. Последующие сети принимают в качестве входных данных набор измерений прибора и параметры модели, определенные с помощью предыдущих сетей. Все сети обучаются на одной и той же синтетической базе данных. База данных состоит из множества пар, содержащих вектор параметров модели и вектор соответствующих зашумленных измерений прибора. Результаты предлагаемого подхода близки к результатам общего алгоритма инверсии, основанного на методе наиболее вероятной комбинации параметров. В то же время предлагаемый подход работает на несколько порядков быстрее.

Ключевые слова: нейронные сети, нелинейная аппроксимация, инверсия данных индукционного каротажа, двухслойная геоэлектрическая модель пласта, расстояние до границы пласта

NEURAL NETWORK INVERSION OF RESISTIVITY DATA FOR DETERMINATION OF DISTANCE TO A BED BOUNDARY

Dmitry Yu. Kushnir

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, Russia, 630090, Novosibirsk, 4A Kutateladze St., Scientist, e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Nikolay N. Velker

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, Russia, 630090, Novosibirsk, 4A Kutateladze St., Leading Scientist, e-mail: Nikolay.Velker@bakerhughes.com

Darya V. Andornaya

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, Russia, 630090, Novosibirsk, 4A Kutateladze St.,
Scientist, e-mail: Darya.Andornaya@bakerhughes.com

Yuriy E. Antonov

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, Russia, 630090, Novosibirsk, 4A Kutateladze St.,
PhD, Scientist, e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

Accurate real-time estimation of a distance to the nearest bed boundary simplifies the steering of directional wells. For estimation of that distance, we propose an approach of pointwise inversion of resistivity data using neural networks based on two-layer resistivity formation model. The model parameters are determined from the tool responses using a cascade of neural networks. The first network calculates the resistivity of the layer containing the tool measure point. The subsequent networks take as input the tool responses and the model parameters determined with the previous networks. All networks are trained on the same synthetic database. The samples of that database consist of the pairs of model parameters and corresponding noisy tool responses. The results of the proposed approach are close to the results of the general inversion algorithm based on the method of the most-probable parameter combination. At the same time, the performance of the proposed inversion is several orders faster.

Keywords: neural networks, nonlinear approximation, inversion of resistivity data, two-layer resistivity model, distance to bed boundary

Introduction. Detecting and imaging of bed boundaries is one of the main challenges of reservoir navigation. Propagation resistivity tools provide early detection capabilities and sufficient depth of investigation for proactive geosteering decisions. Fast and accurate calculation of distances to bed boundaries in real time helps quickly estimate the position of the tool relative to the target zone and make wellpath adjustments.

Azimuthal propagation resistivity tool, in addition to coaxial coils, has a transmitter-receiver pair where the transmitter is aligned with the axis of the drill collar and the receiver is perpendicular to it. This arrangement has sensitivity both to resistivity contrast and direction of a bed boundary. Distance to the nearest bed boundary can be directly estimated using three to four tool responses including the azimuthal measurement in the way that is described in the paper [1]. Traditional processing based on multi-parametric user-guided inversion with gradient convergence algorithm [2] performs rigorous scanning of the parameter space to match the modeled and the measured data but takes more time.

Recently, artificial neural networks (ANN) and machine learning have been increasingly used to solve various computational geophysics problems. In particular, approximation of resistivity tool responses by neural networks for 1D multi-layer and 2D models are described in the works [3-5]. In several publications, ANNs are applied directly for inversion of resistivity measurements [6]. However, the authors note that the inverted models are often inaccurate compared to the reference model.

We propose an ANN-based approach to estimate the parameters of two-layer resistivity model of the environment from the resistivity tool responses. The set of neural networks trained to estimate the parameters uses the responses of the tool as input.

Neural networks are applied sequentially taking into account the previous estimated parameters of the model and forming a cascade ANN block. Such a scheme makes it possible to increase the accuracy of inversion and reduce the equivalence of the model parameters.

Tool Description. To test the proposed approach, we perform an inversion of deep azimuthal propagation (DAR) tool responses [7]. The tool has six coaxial coils T1 – T4, R1 and R2 and two coils R3 and R4 transverse to the tool's axis. Here T1 – T4 are transmitters and R1 – R4 are receivers. We have selected a typical six-measurements subset used in practice for inversion. The subset includes four bulk and two azimuthal measurements. The bulk measurements are attenuation (al400, al2m) and phase difference (pl400, pl2m) measured at 400 kHz and 2 MHz. The azimuthal measurements (imvc400, imvc2m) are compensated imaginary parts of induced voltage measured at 400 kHz and 2 MHz.

Model description. A two-layer model of the medium is described by the layer resistivities ρ_1, ρ_2 , the coordinate Z of the bed between the layers relative to the tool measure point (MP) and the tool dip angle θ (see Figure 1). The ranges of the specified parameters are 0.1-1000 Ohm·m for ρ_1 and ρ_2 , 0.2-5 m for Z , and 60-120 deg for θ . The tool MP can be located in any of two layers. The pointwise inversion allows determining all of the listed parameters with the exception of the dip angle.

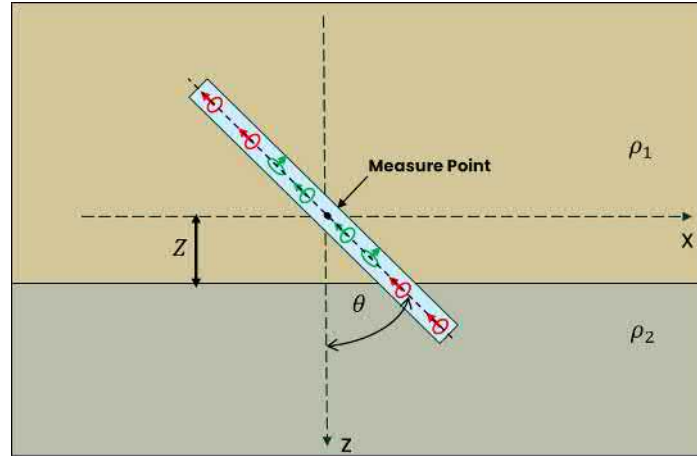


Fig. 1. Two-layer model of the medium with the tool.

Neural networks training. The synthetic database for ANNs training contains several hundred thousand samples. Each sample includes a randomly generated vector of model parameters and the corresponding vector of tool responses. To ensure successful ANN training and make the approach applicable to the real field data, the database has to be preprocessed. We add noise to the vectors of tool responses and also mark model vectors that appear to represent homogeneous models that are particular case of two-layer model. The database formed in this way is used to train a set of feedforward ANN-based classifiers and approximators applied in inversion. The methodology of training feedforward artificial neural networks is described in [8-9].

Cascade ANN inversion block. The proposed approach is based on the cascade ANN inversion block described below. In the environment model used by this block, the tool MP can only be in the upper layer. The block contains three pre-trained neural networks used as approximators. The first network converts the tool responses into the conductivity of the first layer. Further, the obtained conductivity σ_1 is added to the first ANN input and the resulting extended vector of parameters is converted by the second network into the distance to bed Z . In the same way, the output of the second network is added to its input and the resulting vector of parameters is converted by the third network into the conductivity of the second layer σ_2 (see Figure 2). If the tool responses are measured in a layered medium with more than two layers, the block outputs the parameters of an equivalent two-layer model. In the case when the responses are received in a homogeneous medium, the conductivity of the medium σ_1 defined using the first ANN of the cascade inversion block. At the end, the obtained conductivities are recalculated into the resistivity of the layers and together with the distance to the boundary Z go to the block output.

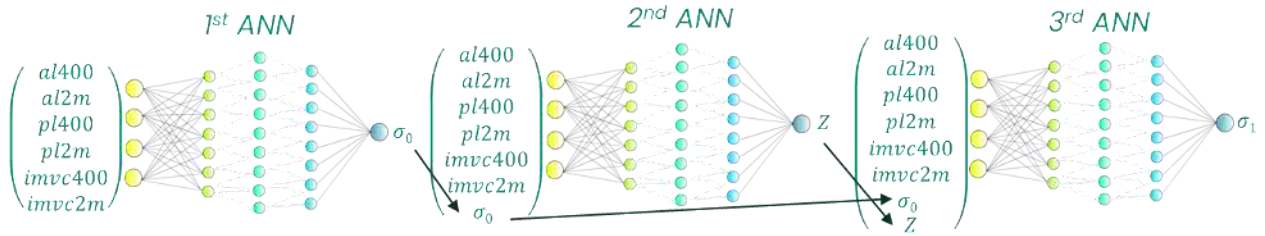


Fig. 2. Flowchart of the cascade ANN inversion block.

Classifier-based inversion. As mentioned above, the cascade inversion block works correctly in a layered medium represented by an equivalent two-layer model with the tool MP located in the first layer. To be applied in real-world conditions, the cascade block should be built into an extended inversion algorithm, which involves the passage of the tool through a homogeneous medium and both layers of a two-layer medium. Below is a description of such extended inversion algorithm in which, in addition to the cascade block, we use two classifier networks. The first classifier indicates whether the tool responses are obtained in a homogeneous medium or in a layered one. The second indicates the index of the layer in which the tool is located in the equivalent two-layer model. We call this approach as classifier-based and the detailed flowchart is shown in Figure 3.

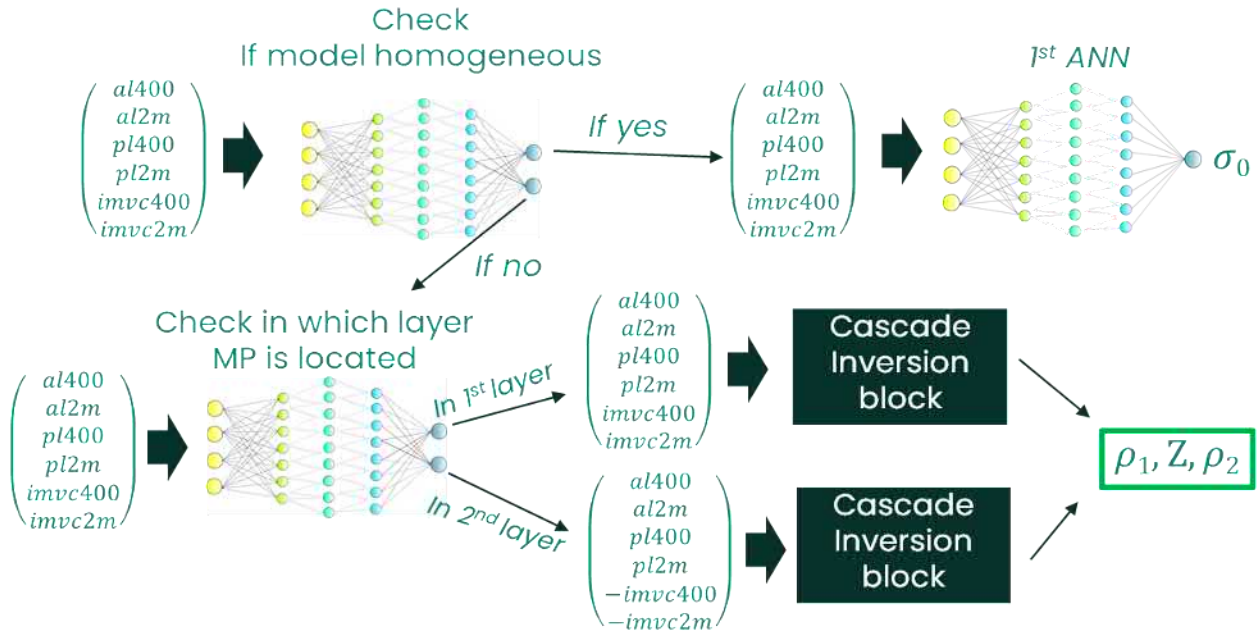


Fig. 3. Flowchart of the classifier-based inversion.

The inversion of the tool responses at each particular point of the log is carried out in several steps:

1. The tool responses go to the input of the classifier, which determines whether the tool is in a homogeneous or layered medium.
2. If the tool is in a homogeneous medium, its conductivity is calculated using the first network from the cascade inversion block and the inversion ends there.
3. If the tool is in a layered medium, the responses go to the input of the second classifier, which determines in which layer of the equivalent two-layer model the tool is located.
4. If the tool is in the second layer, then the responses are pre-converted to the equivalent position of the tool in the first layer using the symmetry of the model.

Then the responses pass to the input of the cascade inversion block and are converted into environmental parameters.

Results. To compare the results of the described ANN inversion with general inversion [Sviridov et al., 2014], a realistic synthetic model was built. Figure 4 shows the case containing the reservoir with a layered structure in which layers of low resistivity alternate with layers of high resistivity, wellpath and corresponding noisy DAR responses.

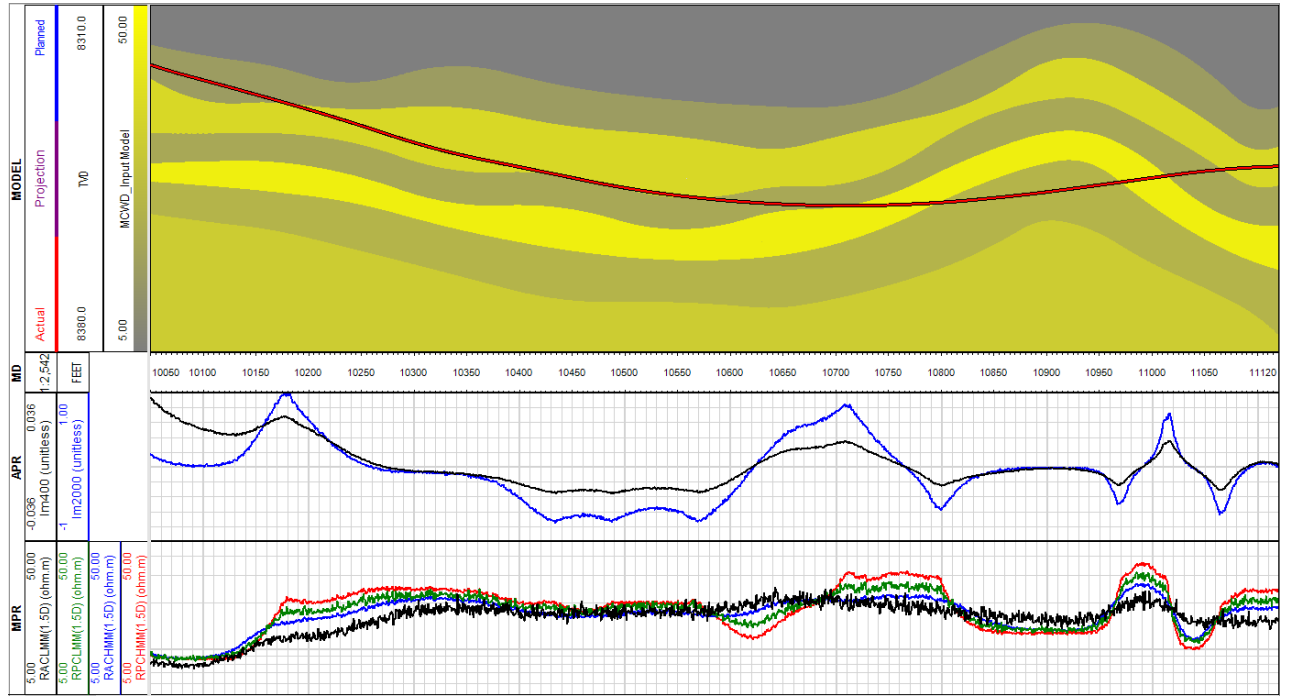


Fig. 4. Synthetic model consisting of seven layers with thicknesses smoothly varying along the well path (red line) at the first track from the top, measured depth in feet on the second track, dimensionless azimuthal measurements of DAR on the third track, and apparent resistivity based on axial measurements of DAR on the fourth track.

We apply three approaches of point-by-point inversion using a two-layer resistivity formation model. The first is the proposed ANN inversion, the second is the general inversion, and the third is the combination of the first and second. In the last case of the combined inversion ANN inversion result is passed as an expected model and initial guess of the general inversion, and the final model at each point is improved with the single gradient descent. Figure 5 shows the results of three approaches with misfit indicators. Misfit is defined as the root mean square difference between the reference responses and the responses in the inverted model.

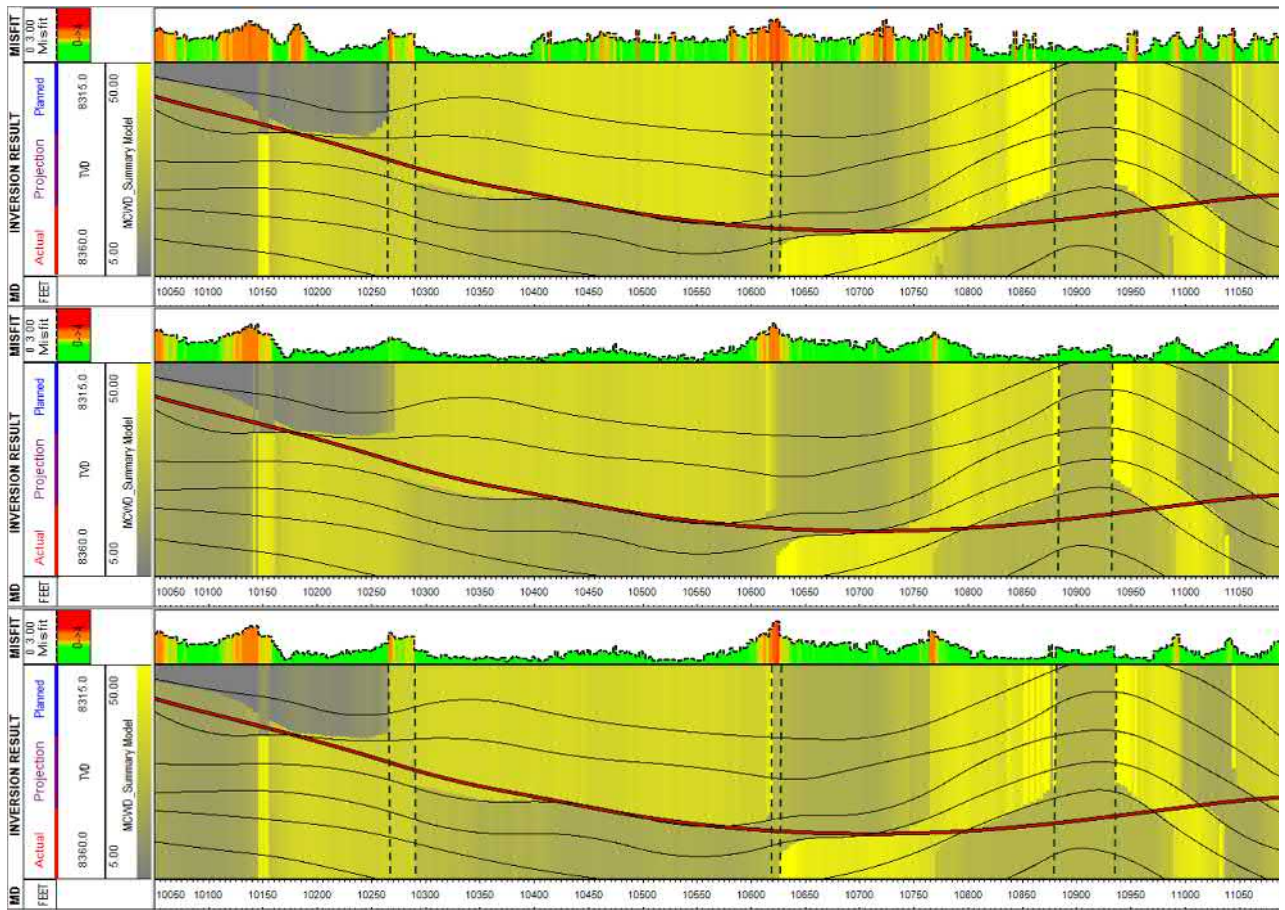


Fig. 5. The results of three approaches separated by blank lines. The ANN inversion results are at the top, the general inversion – at the center, the combined inversion – at the bottom. Each picture is accompanied by the misfit track at the top and the measured depth track at the bottom. Thin solid lines on the inversion results show the boundaries of the reference model, and dashed lines indicate homogenous models.

All three inversion results show similar pictures with the distances to the nearest boundaries that practically coincide with the reference reservoir model (black lines). In practice, the presented results would make it possible to understand the structure of the reservoir near the trajectory and help in geosteering well path adjustments. However, at some intervals with high misfit value an inversion with three layers is preferable (for example, 10000-10160, around 10275, around 10625, around 10770, and around 11000).

The ANN inversion has a slightly larger misfit at most points and identifies the homogeneous environment at a greater number of intervals. The combined inversion improves data match of the ANN inversion to the values compared with that of the general inversion results (see misfit tracks) except for the intervals identified as the homogeneous model. Typical computational times of the presented results are about of 1 millisecond per point for the ANN inversion, 1 second for the general inversion, and 20 milliseconds for the combined inversion.

Conclusions. We proposed a new ANN-based approach for resistivity data inversion. The approach is developed for two-layer resistivity formation model and tested on the synthetic example. The results of ANN inversion are close to the ones given by the general inversion algorithm. At the same time, the ANN-based approach is several orders faster. ANN inversion result can be used as a good initial model for a general gradient-based inversion algorithm for its acceleration. The proposed approach assumes processing of tool responses only, and no user input is required.

REFERENCES

1. Chemali R., Hart E., Flynn T. et al. Successful Applications of Azimuthal Propagation Resistivity for Optimum Well Placement and Reservoir Characterization While Drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition – Anaheim, California, U.S.A. – 11 November, 2007. <https://doi.org/10.2118/109959-MS>
2. Sviridov M., Mosin A., Antonov Y. et al. New Software for Processing of LWD Extradep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data // SPE Res Eval & Eng. – 2014. – Vol. 17 (2) – P. 109–127. <https://doi.org/10.2118/160257-PA>
3. Agbash I. and Sobolev A. Fast Analogues of Direct and Inverse Problems of Russian Laterolog by Neural Network Technology // Interexpo GEO-Siberia–2016: Proc. XII Int. Sci. Congr., Novosibirsk, 18–22 April, 2016. – Novosibirsk: SGUGiT, 2016. Vol. 2 (1). – P. 196–200.
4. Kushnir D., Velker N., Andornaya D. Neural Network Approximation of Resistivity Tool Responses in Three-layer Formation Model // Interexpo GEO-Siberia–2020: Proc. XVI Int. Sci. Conf., Novosibirsk, 20–24 April, 2020. – Novosibirsk: IPGG SB RAS, 2020. – P. 456–464. <http://dx.doi.org/10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-048>
5. Alyaev S., Shahriari M., Pardo D. et al. Modeling Extra-deep EM Logs Using a Deep Neural Network // Geophysics. – 2021. – P. 1-47. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0389.1>
6. Shahriari M., Pardo D., Picon A. et al. A Deep Learning Approach to the Inversion of Borehole Resistivity Measurements // Computational Geosciences. – 2020. – Vol. 24. – P. 971–994. <https://doi.org/10.1007/s10596-019-09859-y>
7. Wang H., Shen Q., Chen J. Sensitivity Study and Uncertainty Quantification of Azimuthal Propagation Resistivity Measurements // SPWLA 59th Annual Logging Symposium. – London, UK. – 2 June, 2018.
8. Ferrari S. and Stengel R. Smooth Function Approximation Using Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. Vol. 16 (1). – P. 24–38. – DOI: 10.1109/TNN.2004.836233.
9. Llanas B. and Sáinz F. Constructive Approximate Interpolation by Neural Networks // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2006. Vol. 188 (2). – P. 283–308. – DOI: 10.1016/j.cam.2005.04.019.

© Д. Ю. Кушнир, Н. Н. Велькер, Д. В. Андорная, Ю. Е. Антонов, 2021

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОЛЯ И УГЛЕННОСТЬ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ САЛАИРА

Павел Степанович Лапин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, к.г.н., научный сотрудник, тел. (383) 333-75-83, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

Описан один из возможных методов оценки современных геодинамических процессов в развитии рельефа земной поверхности. Он основан на анализе экзогенно-активного слоя. В его пределах изучается рельефообразующий процесс, как результат взаимодействия эндогенных и экзогенных сил, который протекает под действием неотектонических движений. В результате моделирования в пределах объекта исследования установлено соответствие новейших движений и образований не только каменноугольно-пермского угленосного бассейна, подтвержденного данными гравиметрии, но и пермо-триасовой вулканоплутонической провинции.

Ключевые слова: рельефообразующие процессы, новейшие движения, экзогенно-активный слой, Салаир

MODERN GEODYNAMIC PROCESSES, POTENTIAL FIELDS AND COAL CONTENT OF THE NORTHWESTERN PART OF SALAIR

Pavel S. Lapin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Research Scientist, Phone: (383) 333-75-83, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

One of the possible methods for assessing modern geodynamic processes in the development of the earth's surface relief is described. It is based on the analysis of the exogenously active layer. Within its limits, the relief-forming process is studied as a result of the interaction of endogenous and exogenous forces, which occurs under the influence of neotectonic movements. As a result of modeling within the research object, the correspondence of the latest movements and formations was established not only of the Carboniferous-Permian coal-bearing basin, confirmed by gravimetric data, but also of the Permian-Triassic volcano-plutonic province.

Key words: relief-forming processes, latest movements, exogenously active layer, Salair

Введение

В геологических науках на протяжении ряда последних лет пристальное внимание уделялось поиску критериев отражения структур земной коры в рельефе земной поверхности [1]. Наибольший интерес для обнаружения тектонической активизации глубокопогруженных геологических тел был проявлен в 70-80-тые годы прошлого столетия [2]. В первую очередь, на уровне изучения неотектонических движений, которые привели к дислоцированности геологических тел в верхней части разреза земной коры [3]. Напомним, что в 40-50-е годы прошлого века при анализе её верхней и нижней частей разреза была установлена различная дислоциро-

ванность геологических тел, которая носит планетарный характер. Для объяснения этого феномена и был введен неотектонический этап, характеризующий неоген-четвертичный временной интервал развития земной коры. При этом предполагалось, что неотектонические движения, отражая глубинные процессы, формируют верхнюю часть земной коры, а структурный план её нижней части не видоизменяется. Неотектонические движения в основном характеризуют вертикальные движения и только в объеме экзогенно-активного слоя появляется возможность изучения вертикальных и горизонтальных движений на основе анализа рельефообразующих процессов, как результата совместной деятельности эндогенных и экзогенных сил. С этой целью вычисляется общий показатель эрозионно-денудационного расчленения рельефа. На его основе осуществлено районирование территории и выявлены районы с разной интенсивностью современных рельефообразующих процессов. Установлено, что угольные пласты (северо-западная часть Кузнецкого угольного бассейна) приурочены к району незначительной активизации современных рельефообразующих процессов. Полученные результаты верифицированы с привлечением гравиметрических данных, поскольку известно, что в связи с разведкой угольных месторождений гравиметрия применяется как для определения границ угольного бассейна, так и для поисков отдельных пластов угля, которые отличаются значительной отрицательной эффективной плотностью.

Цель исследования – изучением современного рельефообразования установить их связь со структурами земной коры при условии взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов.

Объект и методы исследования

В геоморфологии объектом исследования является рельеф земной поверхности, который может быть представлен в виде цифровой модели. В лицензионном пакете Surfer версии 16 в работе построена цифровая модель рельефа по данным радарной съемки SRMT-3 с сайта <http://www.gisa.ru>.

Оценка проявления современных рельефообразующих процессов осуществлена через вычисление общего показателя эрозионно-денудационного расчленения рельефа [4, 5]. Значения этого показателя отражают в рельефе результат взаимодействия экзогенных и эндогенных процессов. Подробно используемая методика вычисления данного показателя представлена в [6].

Методические разработки реализованы на примере северо-восточной части Салаира, где отмечается северо-западное окончание Кузнецкого угольного бассейна – Завьяловский угленосный район. Исследования проведены в рамках тестирования методических разработок по оценке развития рельефа земной поверхности и их использования для решения прогнозных задач по разведке угольных месторождений.

Результаты и их обсуждение

Для решения поставленной задачи были построены и проанализированы: тектоническая и неотектоническая карты, карта распределения гравиметрических данных, схемы экзогенно-активного слоя земной коры и современных рельефообразующих процессов.

Из анализа тектонической карты (рис. 1, а) отмечена зональная смена тектонических структур с северо-запада исследуемой территории на юго-восток, от Колывань-Томской складчатой зоны до Бердско-Ельцовского поднятия. Доронинская впадина, выявленная по незначительным неотектоническим движениям земной коры, является одноименным угленосным районом, но в его пределах не ведется интенсивная добыча угля (рис. 1, б). Максимальные амплитуды неотектонических движений отмечены для Колывань-Томской складчатой зоны и Салаира (Бердско-Ельцовского поднятия). Знакопеременные значения характерны для Доронинской впадины, а общая тенденция смены интенсивности неотектонических движений носит широтный характер и не позволяет по результатам неотектонического районирования выявить Завьяловской угленосный район.

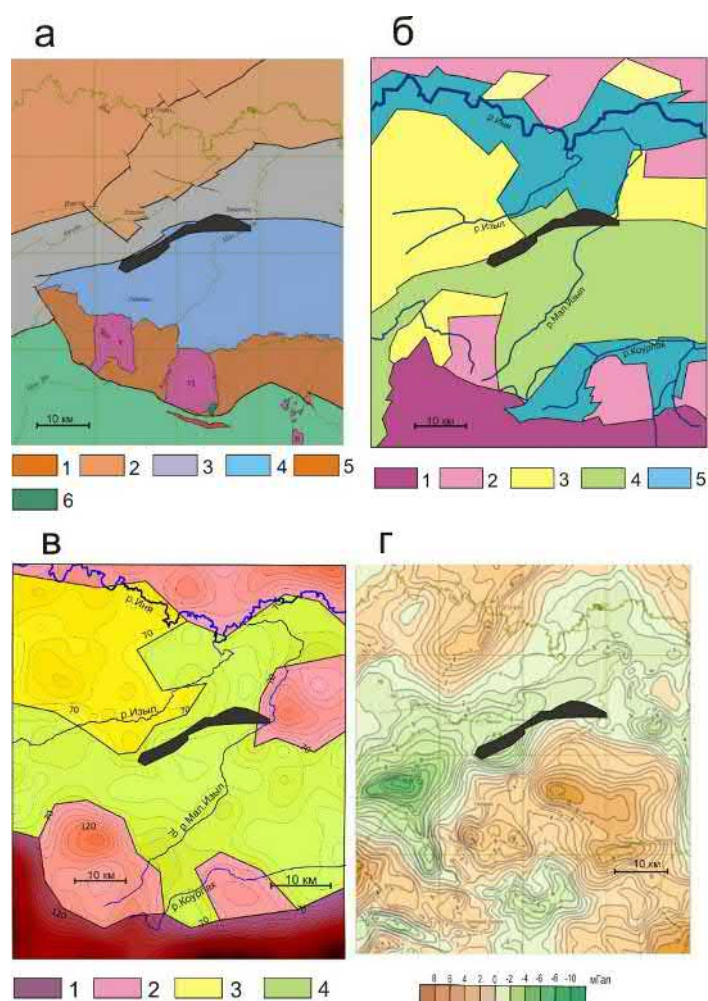


Рис. 1. Характер проявления угольного пласта в пределах Завьяловского района:

а – схема тектоники (складчатые зоны: 1 – Колывань-Томская, 2 – Зарубинско-Лебедянская, 3 – Горловско-Завьяловская, 5 – Рассолкинско-Прокопьевская; 4 – Доронинская впадина, 6 – Бердско-Ельцовское поднятие), б – схема неотектоники (поднятия: 1 – интенсивные, 2 – умеренные, 3 – незначительные; 4 – знакопеременные, 5 – стабильного погружения), в – схема экзогенно-активного слоя земной коры (степень вертикального расчленения рельефа: 1 – значительная, 2 – умеренная, 3 – незначительная, 4 – минимальная), г – схема аномальных гравитационных полей (редукция Буге)

При сопоставлении результатов районирования неотектонических движений и степени вертикального расчленения рельефа в пределах экзогенно-активного слоя земной коры (рис. 1, в) можно заметить, что в большей степени неравномерность движений за неоген-четвертичный этап отмечена в области знакопеременных движений и погружения. Районы интенсивного поднятия (Колывань-Томская складчатая зона и Бердско-Ельцовское поднятие) развивается унаследованно на всем протяжении неотектонического этапа. Следует отметить, что такая трансформация движений позволяет выявить угольные районы (Завьяловский и Доронинский) как испытывающие незначительные тектонические движения на современном этапе развития земной коры.

Любые модельные построения требуют верификации полученных результатов. В настоящей работе сопоставления осуществили с результатами гравиметрической съемки (рис. 1, г). Напомним, что гравиметрия применяется для непосредственных поисков отдельных месторождений и пластов угля, который отличается значительной отрицательной эффективной плотностью. По результатам сопоставления Завьяловский угольный район соответствует отрицательным значениям гравиметрического поля, что подтверждает достоверность примененного методического подхода.

Для более детального исследования, направленного на выявление характера проявления каменноугольно пермского угленосного бассейна в современных рельефообразующих процессах вычислен общий показатель эрозионно-денудационного расчленения рельефа земной поверхности и осуществлено районирование территории (рис. 2). Этот показатель учитывает не только вертикальную, но и горизонтальную составляющую неотектонических движений. В результате районирования локализовано проявление угольного пласта в пределах Завьяловского района, а также выделен артефакт – зона интенсивных процессов в северо-западной части объекта исследования. Она ориентирована в крест основным тектоническим структурам (рис. 1, а) и не совпадает с данными гравиметрии (рис. 1, г), а отражает проявление структуры пермо-триасовой вулканоплутонической провинции (Изыльский ареал).

На основе многоступенчатого анализа имеющейся информации и модельных построений развития современных рельефообразующих процессов в пределах экзогенно-активного слоя выявлено свойство и его элементы, позволившие описать характер проявления этих процессов. На первом этапе установлено унаследованное развитие современных рельефообразующих процессов от интенсивных неотектонических движений, которые проявляются в пределах Колывань-Томская складчатой зоны и Бердско-Ельцовского поднятия. На втором этапе, анализ экзогенно-активного слоя земной коры, как составной части проявления неотектонических движений на современном этапе её развития позволил выявить Завьяловский угленосный район. Он приурочен к области незначительного проявления движений. На следующем этапе установлена неоднородность проявления неотектонических движений в пределах экзогенно-активного слоя, которая, вероятнее всего, связана с выраженностью в этих показателях структуры пермо-триасовой вулканоплутонической провинции. Эта неоднородность объяс-

няется интенсивной деятельностью рельефообразующих процессов, направленных на увеличение расчлененности рельефа земной поверхности. Косвенным подтверждением этого процесса в современном рельефе является наличие большого числа останцов. Их присутствие на качественном уровне подтверждает обоснованность выбора анализируемого свойства и, как и для ранее анализируемых объектов по разработанной и опробованной нами методике., позволяет в пределах изучаемой территории перейти к созданию модели развития современного рельефа

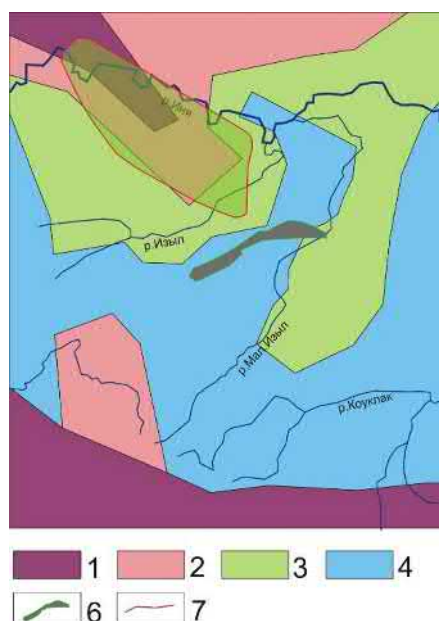


Рис. 2. Районирование по интенсивности проявления современных рельефообразующих процессов в пределах северо-востока Салаира (степень эрозионно-денудационного расчленения рельефа:

1- значительная, 2 – умеренная, 3 – незначительная, 4 – минимальная; 6 – угольный пласт Завьяловского района, 7 – границы Изылинского ареала)

Выводы

В результате районирования по интенсивности проявления современных рельефообразующих процессов, отмеченной в пределах экзогенно-активного слоя земной коры на Северо-Западе Салаира, выделены области современного рельефа, который с различной степенью унаследует неотектонические движения.

Морфогенетическое районирование территории в пределах северо-западной части Кузнецкого угольного бассейна на основе анализа показателя эрозионно-денудационного расчленения рельефа позволило не только локализовать Завьяловский угольный район, но и выявить структуры пермо-триасовой вулканоплутонической провинции (Изыльский ареал)..

Настоящие исследования могут быть использованы при решении генетических задач в геофизике, поскольку экзогенно-активный слой это ВЧР, которому

в процессе интерпретации геофизических методов уделяется пристальное внимание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новейшая тектоника нефтегазоносных областей Сибири / Под ред. Н.А. Флоренсова - М. Недра, 1981. - 239 с.
2. Карта новейшей тектоники нефтегазоносных областей Сибири. Масштаб 1:2 500 000/ Под. ред. Н.А. Флоренсова, И.П. Варламова – Л., 1978.
3. Ласточкин А.Н. Соотношение гидрографической сети Западной Сибири с разломами фундамента и структурами осадочного чехла // Геоморфология. - 1972. - № 1. – С. 28-37.
4. Филосовов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур: монография. - Саратов: Коммунист, 1960. - 95 с.
5. Уфимцев Г.Ф. Картографический анализ при изучении неотектоники горных стран // Геология и геофизика. - 1974. - № 2. - С. 79–85.
6. Лапин П.С. Современный морфогенез Западного Сояна и сейсмичность//Геоморфология. - 2009. - №1. - С. 76-84.

REFERENCES

1. Novejshaja tektonika neftegazonosnyh oblastej Sibiri / Pod red. N.A. Florensova - M. Nedra, 1981. - 239 s.
2. Karta novejshej tektoniki neftegazonosnyh oblastej Sibiri. Masshtab 1:2 500 000/ Pod. red. N.A. Florensova, I.P. Varlamova – L., 1978.
3. Lastochkin A. N. Sootnoshenie gidrograficheskoy seti Zapadnoj Sibiri s razlomami fundamenta i strukturami osadochnogo chehla //Geomorfologija. - 1972. - № 1. – S. 28-37.
4. Filosovov V. P. Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur: monografija. - Saratov: Kommunist, 1960. - 95 s.
5. Ufimcev G. F. Kartograficheskij analiz pri izuchenii neotektoniki gornyh stran // Geologija i geofizika. - 1974. - № 2. - S. 79–85
6. Lapin P. S. Sovremennyj morfogenez Zapadnogo Sojana i sejsmichnost'//Geomorfologija. - 2009. - №1. - S. 76-84.

© П. С. Лапин, 2021

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ НА СИГНАЛЫ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Анита Александровна Лапковская

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, инженер; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, магистрант, e-mail: LapkovskayaAA1@ipgg.sbras.ru

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, д.т.н., доцент, старший преподаватель, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Алексей Михайлович Петров

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

Ирина Владимировна Суродина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: SurodinaIV@ipgg.sbras.ru

В работе представлен анализ сигналов бокового каротажного зондирования, рассчитанных в трехмерных моделях сред с вертикальной трещиной. Показано, что в условиях, характерных для верхнепалеозойских отложений Томской области, влияние единичной тонкой трещины, проходящей через ось скважины, на сигналы эквивалентно влиянию зоны проникновения с низким удельным электрическим сопротивлением. На примере практических данных, измеренных в скважине Арчинского нефтегазоконденсатного месторождения (Томская область) рассмотрены возможности численной инверсии данных для выделения нефтепродуктивных интервалов.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, трещиноватость, численная инверсия

LONGITUDINAL FRACTURE INFLUENCE ON THE UNFOCUSED LATERAL LOGGING SOUNDING RESPONSES IN HIGH-RESISTIVITY DEPOSITS

Anita A. Lapkovskaya

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer; Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate. Student, e-mail: LapkovskayaAA1@ipgg.sbras.ru

Karina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Scientist; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Dr. Sc., Associate Professor, Senior Lecturer, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Aleksei M. Petrov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher: SurodinaIV@ipgg.sbras.ru

The article considers the analysis of unfocused lateral logs (BKZ) simulated in three-dimensional media models with a vertical fracture. It was found that for the Tomsk region Upper Paleozoic deposits conditions the influence of a single thin fracture passing through the well axis on the signals is equivalent to the influence of the invaded low resistivity zone. On the practical data measured in the well of Archinskoe oil-gas-condensate field (Tomsk region) we discuss the possibilities of numerical data inversion for identifying oil-productive intervals.

Keywords: lateral logging, fracturing, fractures, numerical inversion

Двумерная инверсия сигналов зондирующих методов скважинной электрометрии, например, бокового каротажного зондирования (БКЗ) может оказаться информативным инструментом при исследовании трещиноватых отложений. По сравнению с традиционной попластовой интерпретацией она позволяет значительно точнее оценивать электрофизические свойства контрастных отложений, естественным образом учитывая влияние вмещающих пород и нефокусированной формы зонда на каждое измерение [1, 2].

В то же время такой подход основан на предположении осевой симметрии прискважинного пространства, поэтому важно определить характер изменений измеряемых сигналов при нарушении азимутальной однородности среды вследствие трещиноватости, а также влияние этих изменений на результаты двумерной инверсии. Для оценки применимости двумерной численной инверсии данных БКЗ к трещиноватым породам, проведен анализ сигналов, рассчитанных в трехмерных моделях однородной среды с вертикальной трещиной (рис. 1).

Расчет сигналов в моделях среды, в которых прискважинная область осложнена вертикальной трещиной, проведен с помощью алгоритма моделирования сигналов БКЗ методом конечных разностей (программное обеспечение разработано в ИНГГ СО РАН [3, 4]). Изменение расчетных сигналов вдоль скважины по форме оказалось аналогично изменению при пересечении пласта, границы которого расположены в крайних точках трещины, а его удельное электрическое сопротивление (УЭС) меньше, чем УЭС вне трещины.

Чтобы определить тип двумерной модели, наиболее подходящий для количественной интерпретации сигналов БКЗ в осложненной трещиной среде, в результате инверсии рассчитанных в трехмерных моделях с трещиной сигналов рассмотрены четыре типа моделей и получены их параметры:

1) модель изотропного пласта в изотропных вмещающих отложениях без радиального изменения УЭС в пластах;

2) модель анизотропного пласта в изотропных вмещающих отложениях без радиального изменения УЭС в пластах;

3) модель анизотропного пласта в анизотропных вмещающих отложениях без радиального изменения УЭС;

4) модель изотропного пласта в изотропных вмещающих отложениях с зоной проникновения в пласт на интервале трещины.

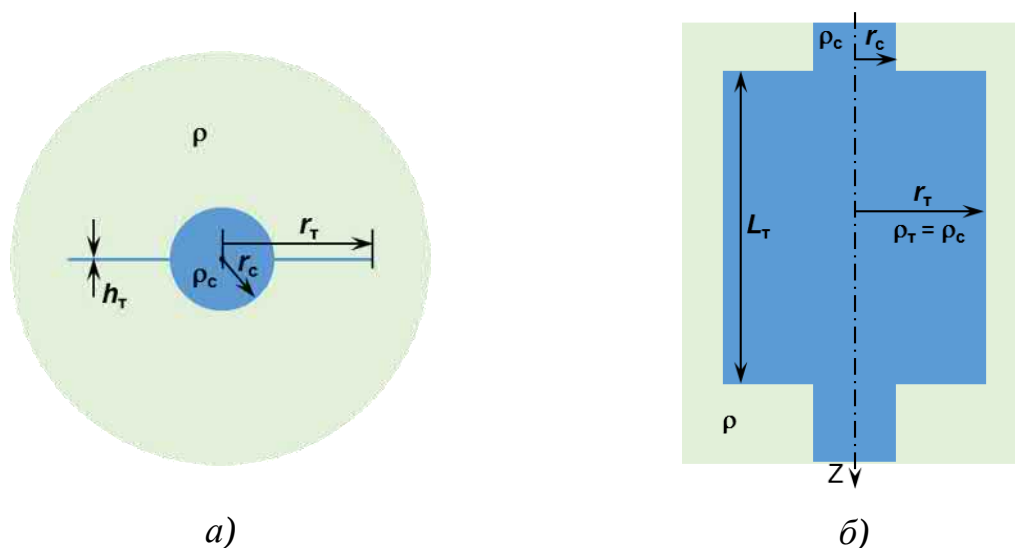


Рис. 1. Модель пересеченной скважиной высокоомных отложений, осложненной вертикальной трещиной, а – сечение горизонтальной плоскостью, б – сечение вертикальной плоскостью. УЭС пласта $\rho = 100, 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

УЭС бурового раствора $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, радиус скважины $r_c = 0.108 \text{ м}$;
 параметры трещины: толщина $h_T = 1 \text{ мм}$, длина $L = 1, 5 \text{ м}$, радиус $r_T = 0.5, 0.8 \text{ м}$,
 УЭС $\rho_T = \rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

На начальном этапе инверсии в созданной модели границы указывались в соответствии с границами трещины. Положение границ пластов среды и значения удельного электрического сопротивления не фиксировались, при инверсии производился подбор всех параметров.

Рассмотрим примеры результатов инверсии данных БКЗ, рассчитанных в модели: УЭС отложений $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, длина трещины 5 м (от -2.5 до 2.5 м по вертикали), радиус внешнего края трещины – 0.8 м .

При инверсии данных БКЗ в классе изотропной модели 1 на основании полученных результатов можно сделать следующий вывод. При отсутствии независимых данных о реальном строении среды на интервале распространения трещины определяется пониженное значение УЭС (около $82 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), но результат подбора характеризуется довольно большой невязкой измеренных и рассчитанных сигналов зонда А4.0.М0.5N (более 5% для длинного зонда) на значительном интервале скважины ($1\text{--}4 \text{ м}$), систематический характер которой свидетельствует о неадекватности выбора модели.

Добавление в пласт, выделенный в интервале трещины, вертикального УЭС (ρ_v) не приводит к уменьшению невязок исходных и подобранных сигналов,

которые остаются почти на прежнем высоком уровне для длинного зонда, также систематического характера, а для коротких зондов составляют около 3% (рис. 2, 3). Отметим, что в этой модели на интервале трещины определяется вертикальное УЭС, меньшее горизонтального (63 и 83 Ом·м). Добавление анизотропии во вмещающие породы также не приводит к удовлетворительному подбору.

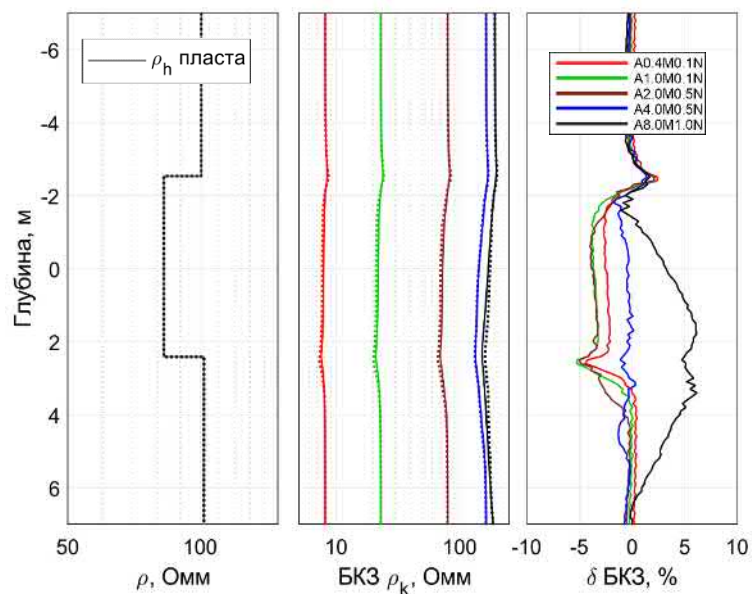


Рис. 1. Результат инверсии данных БКЗ на базе двумерной осесимметричной изотропной модели без радиального изменения УЭС в пластах

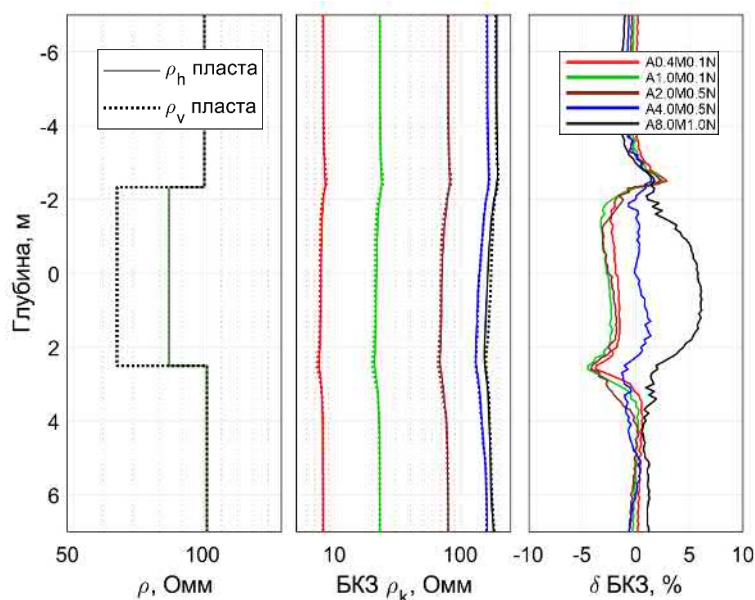


Рис. 3. Результат инверсии данных БКЗ на базе двумерной осесимметричной модели анизотропного слоя в изотропных вмещающих отложениях без радиального изменения УЭС в пластах

Результат инверсии на базе двумерной осесимметричной изотропной модели с понижающей зоной проникновения характеризуется наименьшими невязками, не превышающими 1 % (рис. 4).

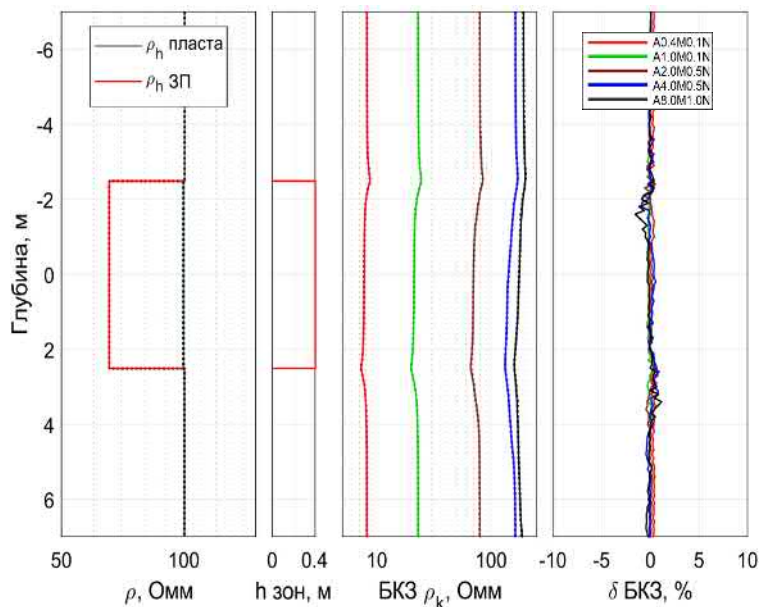


Рис. 4. Результат инверсии данных БКЗ на базе двумерной осесимметричной изотропной модели с зоной проникновения.

Восстанавливается близкое к истинному значение УЭС пласта (100.3 Ом·м). Интервал распространения трещины отчетливо выделяется в модели в виде понижающей зоны проникновения. Значения невязок на уровне погрешности расчета данных свидетельствуют о том, что эта модель является для сигналов БКЗ в практическом смысле эквивалентной модели с трещиной. Также при обработке практических данных можно ввести зону проникновения в каждый слой модели, где непроницаемые пласты будут характеризоваться близкими определяемыми значениями $\rho_{ЗП}$ и $\rho_{пласта}$, а трещиноватые отложения – $\rho_{ЗП} < \rho_{пласта}$. Подобный подход используется, например, в работе [5], однако авторы не касались вопроса выбора типа интерпретационной модели. Использование в инверсии ограничителя $\rho_{ЗП} \leq \rho_{пласта}$ позволит дополнительно уменьшить область эквивалентности и избежать физически не обоснованных моделей (с $\rho_{ЗП} > \rho_{пласта}$ при бурении высокоомных отложений на низкоомных растворах).

Численное моделирование подтверждает эти выводы и для более контрастных моделей, например, для УЭС среды 1000 Ом·м.

Применение алгоритма на реальных данных

На юго-востоке нефтегазоносного бассейна открыты залежи нефти, газа и газоконденсата в отложениях палеозоя (Арчинское месторождение [5]). Рассмотрим пример применения алгоритмов двумерной численной инверсии

данных БКЗ в интервале трещиноватых, сложно построенных высокоомных карбонатных коллекторов доюрского комплекса, вскрытых скважинами на глинистом буровом растворе.

Выбор интервала палеозойских отложений для численного анализа определялся наличием в двух его местах интервалов перфорации и данных о притоке, полученных во время проведения испытаний. Для создания стартового приближения геоэлектрической модели в работе использовался программный комплекс EMF Pro [6].

В полученной по результатам двумерной инверсии модели отчетливо выделяется интервал с контрастной понижающей зоной проникновения на глубине 3108–3122 м (рис. 5). По данным испытаний приток нефти на этом интервале составил $Q_n = 5.8$ т/сут, приток газа $Q_g = 4.2$ м³/сут. В другом нефтенасыщенном пласте, расположенном выше (интервал 3088–3092 м), по данным БКЗ не удалось выявить признаков проникновения бурового раствора. При этом при испытании в этом интервале наблюдался приток $Q_n = 19$ т/сут, $Q_g = 1.9$ м³/сут, что существенно превышает приток на интервале, выделенном при инверсии. Это скорее всего связано с повышенным пластовым давлением в верхнем интервале (пластовое давление верхнего интервала – 333 атм, нижнего – 311.6 атм), которое препятствовало фильтрации бурового раствора и его затеканию в трещины.

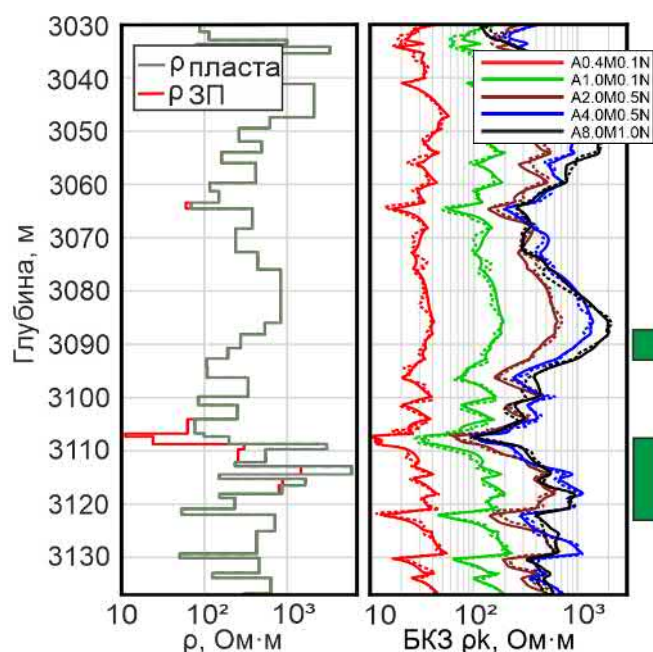


Рис. 5. Результат двумерной инверсии данных БКЗ в скважине Арчинского месторождения. Зеленые прямоугольники – интервалы перфорации.

Выводы

Информативность данных БКЗ в высокоомных отложениях во многом зависит от условий бурения и измерения, так как диагностическим признаком наличия потенциально продуктивного интервала является выявление в присква-

жинной области зон с пониженным относительно пласта УЭС, что вызвано раскрытием трещин и проникновением в них бурового раствора. В случае достаточной разницы давлений в скважине и пласте, при отсутствии аварийных ситуаций с фонтанированием пластовых флюидов или задавливанием больших объемов бурового раствора, интерпретация данных БКЗ может быть применена для поиска залежей углеводородов в аналогичных по свойствам отложениях, где сигналы БКЗ вертикальной трещины, проходящей через ось скважины, эквивалентно влиянию зоны проникновения с пониженным относительно неизменной части пласта УЭС.

Исследования выполнены в рамках проекта 0331-2019-0014 ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каюров Н.К., Глинских В. Н., Сухорукова К.В. Характеристика сложнопостроенных палеозойских коллекторов Арчинского месторождения (томская область) по данным ГИС. 2016, С. 204-206.
2. Петров А. М. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления. / Петров А. М., Нечаев О. В., Сухорукова К. В.// Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": т.4 – 2018. – С. 90-98.
3. Суродина И.В., Нестерова Г. В. Трехмерное численное моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // 16-я научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2014», 8–11 сентября 2014 г., Геленджик. – С. 4.
4. Суродина И.В., Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах//Математические заметки СВФУ, том 22, 2015, – С. 51-61.
5. Глинских В. Н., Каюров Н.К., Михайлов И. В., Нечаев О. В. Интерпретация данных электрических зондирований в карбонатных коллекторах доюрского фундамента юго-востока Западно-Сибирской плиты на основе двумерной численной инверсии (Арчинское месторождение) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 5. – С. 24–31.
6. Ельцов И. Н., Власов А. А., Соболев А. Ю., Фаре А.Н., Байкова М.А., Обработка, визуализация и интерпретация геофизических исследований в скважинах в системе EMF Pro Учебное пособие, 2016.

REFERENCES

1. Kayurov N.K., Glinskih V.N, Suhorukova K.V. Harakteristika slozhnopostroennyh paleozojskih kollektorov Archinskogo mestorozhdeniya (tomskaya oblast') po dannym GIS. 2016, S. 204-206.
2. Petrov A. M. Bystraya sovmestnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovanij s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya. / Petrov A. M., Nechaev O. V., Suhorukova K. V.// Interekspo GEO-Sibir': XIV Mezhdunarodnyj nauch-nyj kongress: Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya": t.4 – 2018. – S. 90-98.

3. Surodina I.V., Nesterova G.V. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie pokazanij zondov VIKIZ i BKZ na graficheskikh processorah // 16-ya nauchno-prakticheskaya konferenciya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdenij nefi i gaza «Geomodel' 2014», 8–11 sentyabrya 2014 g., Gelendzhik. – S. 4
4. Surodina I.V., Parallel'nye algoritmy dlya resheniya pryamyh zadach elektricheskogo karotazha na graficheskikh processorah//Matematicheskie zametki SVFU, tom 22, 2015, – S. 51-61.
5. Glinskih V.N., Kayurov N.K., Mihajlov I.V., Nechaev O.V. Interpretaciya dannyh elektricheskikh zondirovanij v karbonatnyh kollektorah doyerskogo fundamenta yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoj plity na osnove dvumernoj chislennoj inversii (Archinskoe mestorozhdenie) // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij. – 2017. – № 5. – S. 24–31.
6. El'cov I.N., Vlasov A.A., Sobolev A.YU., Fage A.N., Bajkova M.A., Obrabotka, vizualizaciya i interpretaciya geofizicheskikh issledovanij v skvazhinah v sisteme EMF Pro Uchebnoe posobie, 2016.

© *A. A. Лапковская, К. В. Сухорукова, А. М. Петров, И. В. Суродина, 2021*

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЮРСКОГО КОЛЛЕКТОРА ВОСТОЧНО-СУРГУТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Артём Русланович Леоненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, тел. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Алексей Михайлович Петров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Карина Владимировна Сухорукова

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

В статье представлены результаты совместной интерпретации данных гальванического и электромагнитного каротажа отложений юрского возраста. Юрские отложения характеризуются высокой контрастностью электрических свойств, анизотропией, частотной дисперсией диэлектрической проницаемости. Привлечение современных методов совместной численной инверсии позволяет построить их детальные геоэлектрические модели, отвечающие измеренным данным электрокаротажа в сложных геологических условиях.

Ключевые слова: нефтяные коллекторы, геофизические исследования скважин, детальные геоэлектрические модели, численное моделирование

GEOELECTRIC MODEL OF THE VOSTOCHNO-SURGUTSOE FIELD JURASSIC RESERVOIR ACCORDING TO GALVANIC AND ELECTROMAGNETIC LOGGING SOUNDING DATA

Artem R. Leonenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, tel. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Aleksei M. Petrov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, tel. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Karina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief scientist, tel. (383)330-49-52, e-mail: suhorukovakv@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of galvanic and electromagnetic well logs joint numerical inversion. Jurassic deposits are characterized by high contrast of electrical properties, resistivity anisotropy and dielectric polarization, that complicates modeling. Applying of modern methods of joint

numerical inversion makes it possible to build detailed geoelectric models corresponding to the measured data in complex geological environments.

Keywords: oil reservoirs, well logging, high-detailed geoelectric models, numerical simulation

Введение

Разрез юрских отложений характеризуется большим контрастом электрических свойств, частым чередованием низкоомных глинистых и высокоомных карбонатных пластов небольшой толщины, повышенной глинистостью пластов-коллекторов и рассеянной пиритизацией, что значительно затрудняет интерпретацию данных каротажа даже при визуальном анализе диаграмм. Тонкое переслаивание алевроаргиллита с алевролитом в перекрывающих и подстилающих пластах и песчаника с карбонатизированными и глинистыми породами в самом коллекторе приводит к возникновению электрической анизотропии, т. е. различию значений удельного электрического сопротивления (УЭС) вдоль и вкрест слоистости. Наличие микроанизотропии глинистых пород и большой контраст УЭС соседних пластов затрудняет применение одномерного подхода к интерпретации данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) на интервалах коллекторов. Рассеянная пиритизация и глинистость приводят к повышению диэлектрической проницаемости и её частотной дисперсии, вследствие этого возникают противоречия в численных значениях кажущегося сопротивления по данным электромагнитных зондирований (ВИКИЗ/ВЭМКЗ) и каротажа на постоянном токе.

Учет перечисленных особенностей возможен при использовании в качестве базовой модели среды двумерной осесимметричной. Совместная численная инверсия данных БКЗ и ВИКИЗ на базе такой модели позволяет устранить кажущуюся противоречивость измерений и получить согласованные по данным двух методов оценки электрофизических свойств отложений.

Данные ГИС на интервале юрских отложений Восточно-Сургутского месторождения

На рис. 1 представлен комплекс данных ГИС, измеренных на интервале нефтенасыщенного коллектора ЮС₂ и вмещающих его отложений в скважине Восточно-Сургутского месторождения.

Верхняя часть интервала представлена преимущественно глинистыми отложениями. На интервале 2905-2922 м на диаграммах всех представленных методов отчетливо виден целевой объект – песчаный коллектор ЮС₂. Расхождение диаграмм зондов БКЗ и ВИКИЗ разной длины свидетельствует о наличии радиального изменения УЭС, вызванного фильтрацией бурового раствора в пласты. Ниже по разрезу расположены контрастные по УЭС чередующиеся тонкие пласты глин, карбонатов и углей. Большой контраст УЭС прослоев приводит к форме диаграмм БКЗ, очень сложной для визуального анализа. Высокоомные карбонатные и угольные пласты хорошо локализуются по данным БК, но при

небольшой толщине слабо проявляются на диаграммах ВИКИЗ, что является основанием для использования совместной инверсии данных. На основе анализа представленного комплекса данных ГИС построена стартовая модель для последующей инверсии.

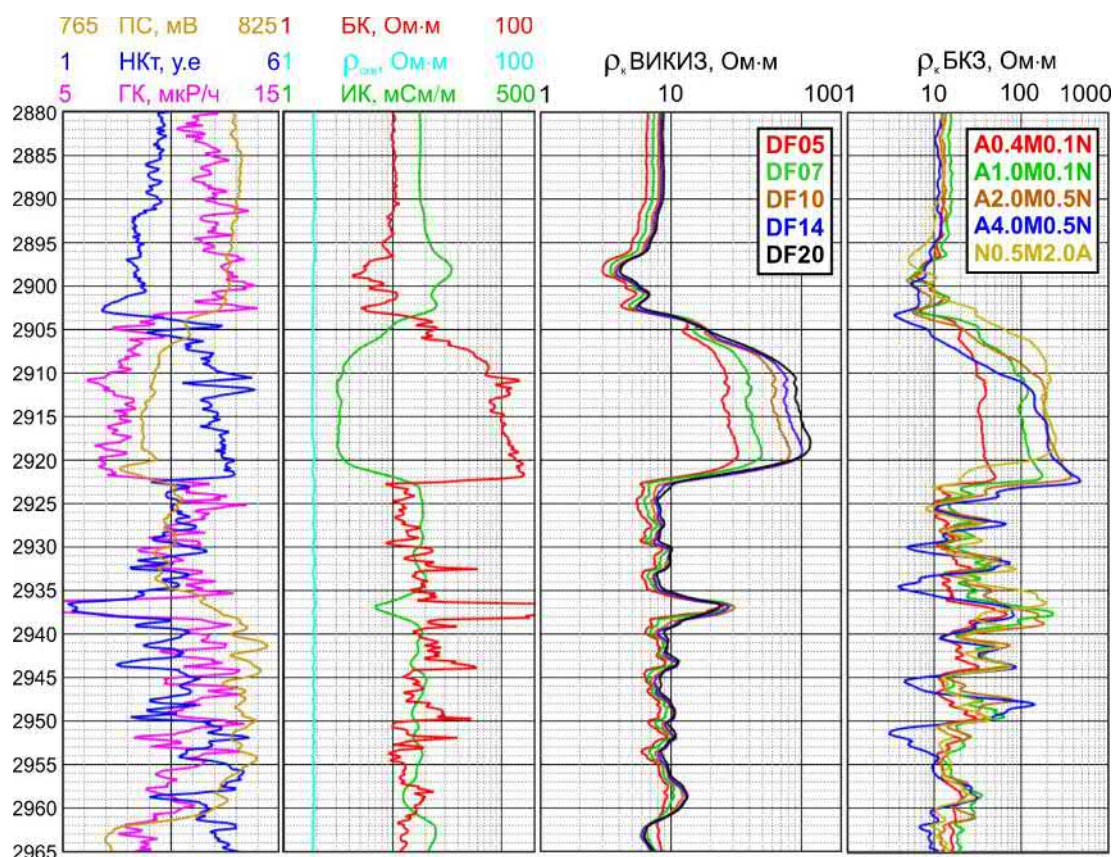


Рис. 1. Данные ГИС на интервале юрских отложений Восточно-Сургутского месторождения. Слева направо: гамма-каротаж (ГК), нейтронный каротаж (НКТ), потенциал самополяризации (ПС); боковой каротаж (БК), индукционный каротаж (ИК) и резистивиметрия (ρ_c); ВИКИЗ; БКЗ

Согласованная геоэлектрическая модель коллектора ЮС₂

Совместная численная инверсия данных электромагнитного и бокового каротажного зондирования выполнена с использованием программного пакета AlondraWL, разработанного в ИНГГ СО РАН [1].

Измеренные на интервале коллектора диаграммы электрокаротажа могут быть объяснены как влиянием сложного радиального профиля УЭС, так и влиянием электрической анизотропии и диэлектрической поляризации отложений, поэтому для получения реалистичной модели необходимо привлечение априорной информации.

По данным гамма-каротажа и каротажа спонтанной поляризации в рассматриваемой скважине не наблюдается существенной глинизации коллектора,

которая могла бы привести к значимым проявлениям диэлектрической поляризации и анизотропии УЭС. При этом в ряде работ, посвящённых исследованию гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения ([2–4]), отмечается, что в коллекторах, аналогичных исследуемому, при бурении образуется уплотненная прискважинная зона. Изменение напряженного состояния этой области приводит к уменьшению проницаемости и уплотнению, а как следствие – к увеличению УЭС.

Итоговая модель интервала нефтенасыщенного коллектора горизонта Ю2 Восточно-Сургутского месторождения представлена на рисунке 2.

Вмещающие коллектор глинистые отложения характеризуются явно выраженной анизотропией УЭС: коэффициент анизотропии относительно однородных перекрывающих пород составляет в среднем 2.0–2.5, а подстилающих отложений, представленных переслаиванием аргиллитов с углистыми и карбонатными слоями, – варьирует в диапазоне 1.0–3.0.

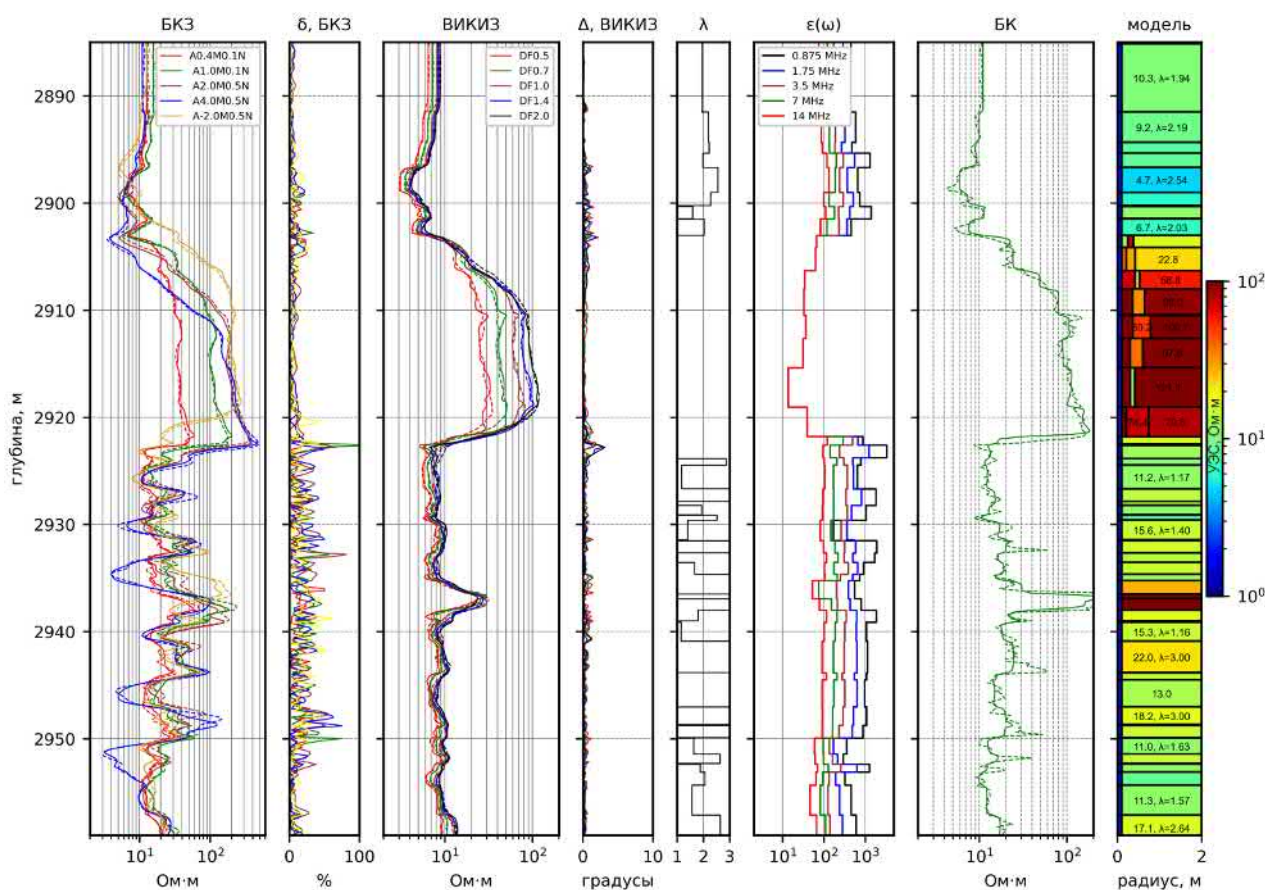


Рис. 2. Геоэлектрическая модель коллектора ЮС2 и вмещающих его отложений. Сплошными линиями – сигналы, рассчитанные в модели, пунктирными – наблюдаемые; справа от данных БКЗ и ВИКИЗ – поля с невязками подбора сигналов, далее коэффициент анизотропии (λ), относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ), данные БК (измерение и расчет в подобранной модели); горизонтальное УЭС

В силу существенной частотной дисперсии диэлектрической проницаемости вмещающих отложений согласование данных ВИКИЗ с данными каротажа на постоянном токе при использовании резистивной модели невозможно. Для учета поляризации была проведена инверсия сигналов каждого из зондов ВИКИЗ в отдельности, с подбором диэлектрической проницаемости. Таким образом получена зависимость $\varepsilon(\omega)$ для частот ВИКИЗ (0.875 МГц, 1.75 МГц, 3.5 МГц, 7 МГц, 14 МГц).

Высокое УЭС неизменной части коллектора соответствует нефтяному насыщению. Установленные значения ε соответствуют значениям, определяемым в аналогичных отложениях по данным ГИС в других скважинах и на других площадях. Минимальное значение ε определяется в наиболее карбонатизированной части коллектора (нижняя треть) с наибольшим УЭС. Вмещающие коллектор породы, представленные мощными глинистыми отложениями, местами карбонатизированными, характеризуются большой анизотропией УЭС и частотной дисперсией диэлектрической проницаемости, что также соответствует ранее установленным зависимостям [5].

Стоит отметить большие невязки при переходе к контрастным по УЭС глинистым отложениям непосредственно под коллектором, что предположительно связано с недостаточно хорошей увязкой сигналов по глубине. Дополнительной проверкой качества подбора параметров является совпадение измеренных и рассчитанных в подобранной модели сигналов бокового каротажа.

Заключение

На примере обработки данных, измеренных на интервале коллектора ЮС₂ и вмещающих его отложений в скважине Восточно-Сургутского месторождения, показано, что совместная инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ – эффективный инструмент для исследования юрских отложений, характерных для Широкого Приобья Западной Сибири. Совместная численная инверсия данных БКЗ и ВИКИЗ на базе двумерной осесимметричной модели позволяет устранить кажущуюся несогласованность измеренных сигналов и получить достоверные, согласованные по данным двух методов оценки электрофизических свойств отложений.

Исследования выполнены в рамках проекта 0331-2019-0014 ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // ГЕО-Сибирь-2018. Т. 4. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г. – 2018. – С. 90-98.
2. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И., Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // Доклады академии наук. – 2012 – Т. 445. – № 6. – С. 667–680.

3. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н., Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5. – С. 37–49.

4. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И., Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 978–990.

5. Эпов М.И., Глинских В.Н., Петров А.М., Сухорукова К.В., Федосеев А.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н., Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 62–64.

REFERENCES

1. Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V. Bystraya sovместnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotaznyh zondirovanij s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya // GEO-Sibir'-2018. T. 4. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geookologiya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 23-27 aprelya 2018 g. – 2018. – S. 90-98.

2. El'cov I.N., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Epov M.I., Interpretaciya geofizicheskikh izmenenij v skvazhinah s uchetom gidrodinamicheskikh i geomekhanicheskikh processov v zone proniknoveniya // Doklady akademii nauk. – 2012 – T. 445. – № 6. – S. 667–680 Nazarova

3. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Epov M.I., El'cov I.N., Evolyuciya geomekhanicheskikh i elektrogidrodinamicheskikh polej v massive gornyh porod pri burenii glubokih skvazhin // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. – 2013. – № 5. – S. 37–49.

4. El'cov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.YU., Epov M.I., Skvazhinnaya geoelektrika neftegazovyh plastov, razburivaemyh na repressii davleniya v neravnokomponentnom pole napryazhenij // Geologiya i geofizika. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – S. 978–990.

5. Epov M.I., Glinskih V.N., Petrov A.M., Suhorukova K.V., Fedoseev A.A., Nechaev O.V., Nikitenko M.N., CHastotnaya dispersiya elektrofizicheskikh harakteristik i elektricheskaya anizotropiya porod bazhenovskoj svity po dannyh elektrokartotazha Neftyanoje hozyajstvo. – 2014. – № 9. – S. 62–64.

© А. Р. Леоненко, К. В. Сухорукова, А. М. Петров, 2021

ПРИМЕНЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И НЕИТЕРАЦИОННОЙ ЭКСПРЕСС-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Артём Русланович Леоненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, тел. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Кирилл Николаевич Даниловский

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, инженер 1 категории отдела геолого-экономического анализа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Алексей Михайлович Петров

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, геолог 1 категории отдела геологии Западной Сибири, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Работа посвящена развитию методико-алгоритмического обеспечения количественной интерпретации данных электрокаротажа нефтяных скважин. Рассматриваются результаты применения нейросетевого подхода к обработке данных электрокаротажа, измеренных на интервалах, сложенных маломощными контрастными по электрофизическим свойствам пластами. Предлагаемые алгоритмы сочетают в себе преимущества интерпретации данных на базе двумерной осесимметричной модели среды и быстрого действия, что позволяет использовать их на этапе первичной обработки, повышая достоверность оперативной интерпретации.

Ключевые слова: нефтяные коллекторы, геофизические исследования скважин, электрокаротаж, экспресс-инверсия, детальные геоэлектрические модели, машинное обучение, свёрточные нейронные сети

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR RESISTIVITY LOGS PROCESSING AND NON-ITERATIVE EXPRESS-INVERSION IN COMPLEX RESERVOIR ENVIRONMENTS

Kirill N. Danilovskiy

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny ave., engineer of the 1st category of the geological and economic analysis department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior researcher, tel. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Artem R. Leonenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, tel. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Aleksei M. Petrov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny ave., geologist of the 1st category of the Western Siberia geology department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, tel. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

The work is devoted to the development of techniques and software for the quantitative interpretation of resistivity oil well logs. The article considers the results of applying the neural network approach to the processing of resistivity logging data measured at intervals composed of thin layers with contrasting electrical properties. The proposed algorithms combine the advantages of data interpretation based on a two-dimensional axisymmetric medium model and high performance, which allows them to be used at the primary processing stage, increasing the reliability of express interpretation.

Keywords: oil reservoirs, well logging, resistivity logging, express-inversion, high-detailed geoelectric models, machine learning, convolutional neural networks

Введение

Стандартный подход к количественной интерпретации данных электрокаротажа основывается на итерационном подборе параметров модели среды с минимизацией невязки между измеренными и рассчитанными данными. Сложность исследуемых сегодня геологических объектов требует учета влияния на измерения вмещающих пород и скважинных условий. В субвертикальных скважинах учет этих факторов возможен за счет использования детальных двумерных геоэлектрических моделей среды. Однако такая постановка приводит к высокой вычислительной сложности алгоритмов численного моделирования каротажных сигналов. Таким образом, быстродействие является фактором, ограничивающим возможности стандартного подхода при исследовании сложнопостроенных отложений.

Перспективной альтернативой стандартному подходу могут стать алгоритмы на основе машинного обучения, показавшие себя эффективным средством решения широкого спектра задач, в том числе и геофизических [1, 2]. В работе предлагается нейросетевой подход к обработке данных электрокаротажа, измеренных на интервалах, сложенных маломощными контрастными по электрофизическим свойствам пластами. Возможности предлагаемого подхода демонстрируется на примере алгоритма экспресс-инверсии данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) в параметры детальной двумерной геоэлектрической модели и алгоритма учета влияния вмещающих пород на сигналы электромагнитных зондирований (ВИКИЗ/ВЭМКЗ).

Данные электрокаротажа для обучения обоих алгоритмов рассчитываются с применением алгоритмов численного моделирования комплекса AlondraWL [3]. В качестве базовой архитектуры, используемой для реализации

алгоритмов выбрана полносвёрточная искусственная нейронная сеть (ИНС). Архитектура ИНС включает набор блоков, состоящих из свёрточных слоев и слоев пакетной нормализации. Обучение осуществляется алгоритмом Nadam [4], представляющим собой модификацию алгоритма Adam с использованием импульса Нестерова.

Экспресс-инверсия данных БКЗ

Решение обратной задачи электрокаротажа в общем случае неединственно. Стандартный подход подразумевает возможность выбора из множества моделей той, которая наилучшим образом удовлетворяет априорной информации в рамках заданной параметризации. При применении ИНС напрямую к измеренным данным такой выбор невозможен, так как каждому набору входных данных ставится в соответствие лишь одна модель среды. Однако эта связь может быть настроена для получения моделей, адекватных геологической среде на конкретных месторождениях. Для такой настройки предлагается использовать специальным образом сформированные обучающие выборки пар “сигналы - модель среды”, обеспечивающие нахождение более регулярных решений в конкретных геоэлектрических условиях. Кроме того, часть априорной информации можно учесть за счет использования ее в явном виде во входных данных.

Входными данными для алгоритма неитерационной экспресс-инверсии данных БКЗ являются измеренные сигналы, данные резистивиметрии и кавернометрии, а также информация об интервалах залегания проницаемых отложений, так как для сигналов БКЗ характерна эквивалентность между влиянием радиального изменения УЭС и электрической анизотропии. Результатом работы алгоритма является геоэлектрическая модель среды. Интервалы непроницаемых пород на каждой глубине измерений характеризуются горизонтальным и вертикальным УЭС, интервалы проницаемых – УЭС неизменной части пласта, УЭС и шириной измененной фильтрацией бурового раствора зоны.

На рис. 1 приведены результаты применения алгоритма неитерационной экспресс-инверсии сигналов зондов БКЗ к практическим данным, измеренным на интервале терригенных меловых отложений Широкого Приобья. Результатом работы алгоритма является высокоразрешенная геоэлектрическая модель прискважинного пространства. На интервалах непроницаемых отложений восстанавливаются их горизонтальное и вертикальное УЭС, на интервалах проницаемых - параметры измененной фильтрацией зоны и неизменной части пласта в изотропном приближении.

Полученную модель можно верифицировать сравнением рассчитанных в ней сигналов с измеренными. В приведенном примере среднее значение относительной невязки сигналов $\delta_{БКЗ}$ на интервалах непроницаемых отложений составляет 3.5 %. Однако на интервале сложнопостроенного коллектора это значение увеличивается до 7.9 %, при этом, в некоторых точках по глубине невязка сигналов отдельных зондов превышает 20 %. Это может быть вызвано как неудовлетворительной работой алгоритма, так и особенностями измерений: в силу

отсутствия фокусировки тока в методе БКЗ, малому изменению параметров среды может соответствовать большое изменение сигналов, особенно при наличии в разрезе тонких высокоомных карбонатизированных прослоев.

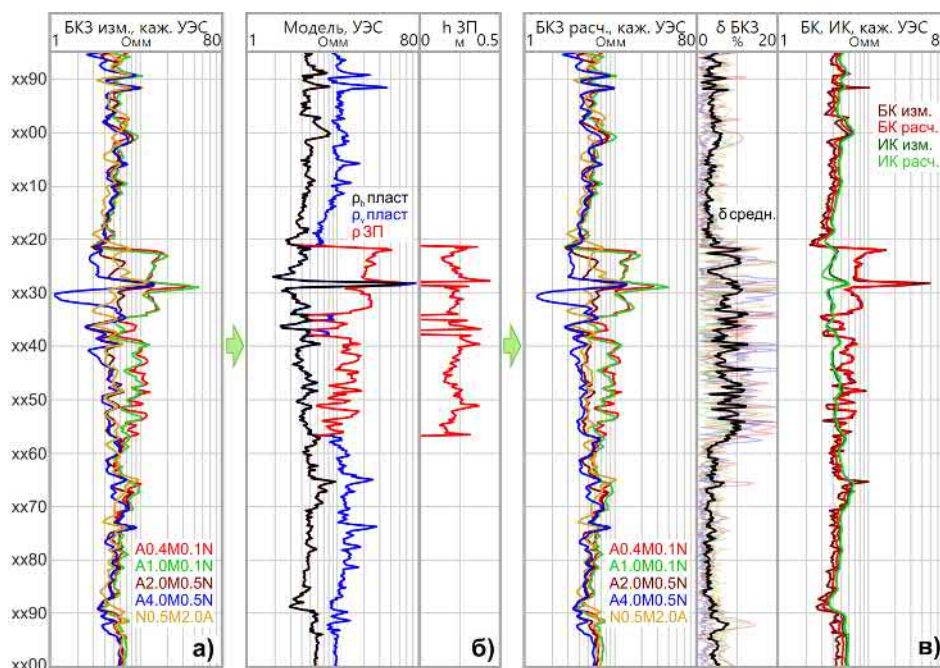


Рис. 1. а) Сигналы БКЗ, измеренные на интервале терригенных меловых отложений Широкого Приобья, б) геоэлектрическая модель, полученная их инверсией, в) измеренные и рассчитанные в полученной модели сигналы БКЗ, БК и ИК

Поэтому для оценки качества модели предлагается использовать данные низкочастотного индукционного (ИК) и фокусированного бокового (БК) каротажей. Рассчитанные в полученной модели и практические сигналы этих методов хорошо согласуются, что говорит о высокой достоверности результатов. При этом, полученное распределение горизонтального УЭС характеризуется высокой вертикальной разрешенностью, сопоставимой с измерениями БК.

Учет влияния вмещающих пород на сигналы ВЭМКЗ

Применение подхода в такой же постановке для методов, сигналы которых зависят от большего количества электрофизических характеристик, может быть затруднительно. Одним из таких методов является ВЭМКЗ, сигналы которого чувствительны к параметрам не только зоны проникновения, но и окаймляющей зоны, а также подвержены влиянию диэлектрической поляризации отложений. Тем не менее, возможно использование подхода в упрощенной постановке. Для этого в обучающей выборке каждому набору сигналов, рассчитанному в двумерной геоэлектрической модели, ставятся в соответствие не сами параметры модели, а сигналы, рассчитанные в ней в предположении, что вмещающие породы

не влияют на измерения напротив каждого конкретного пласта (“1D-сигналы”). Обученная на такой выборке ИНС устраняет из сигналов влияние вмещающих пород, что позволяет проводить интерпретацию на базе одномерной радиально-слоистой модели среды без ущерба достоверности результатов.

На рис. 2 представлен результат применения алгоритма коррекции влияния вмещающих пород к синтетическим сигналам ВИКИЗ, рассчитанным в модели среды, полученной путем численной двумерной инверсии практических данных. При таком способе оценки качества работы алгоритма на вход подаются сигналы, максимально приближенные к практическим. Также известны все параметры модели среды, что позволяет напрямую сравнить результаты коррекции с истинными 1D-сигналами.

Как видно из данных, представленных на рисунке, алгоритму удастся с практически значимой точностью восстановить распределение 1D-сигналов в достаточно сложной модели, сложенной переслаиванием проницаемых и непроницаемых пластов разной мощности. Вид получаемых диаграмм позволяет значительно упростить процедуру расчленения разреза на отдельные пласты, что является важным этапом интерпретации. Следует отметить, что в реальности распределение электрофизических свойств может быть далеко от кусочно-постоянного, а выделение пластов в разрезах, сложенных переслаиванием тонких контрастных по УЭС отложений неоднозначно. Наличие в разрезе большого их количества может нарушать работу алгоритма. В настоящее время исследуются возможные решения, среди которых предобработка входных данных как на этапе обучения ИНС, так и на этапе применения алгоритма.

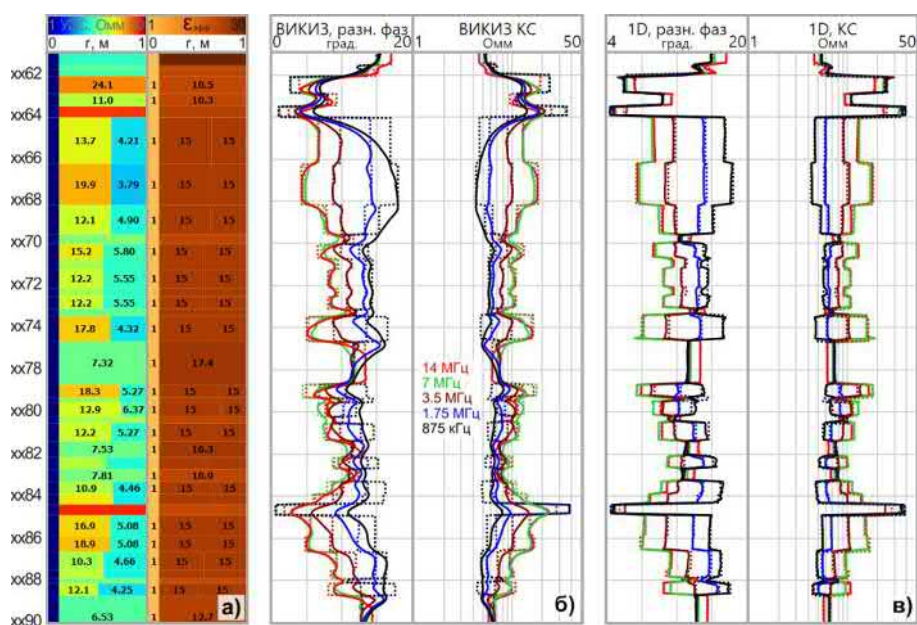


Рис. 2. а) геоэлектрическая модель, полученная двумерной инверсией практических данных, б) рассчитанные в модели сигналы ВИКИЗ (сплошные линии) и соответствующие им 1D-сигналы (пунктир), в) результаты обработки синтетических сигналов алгоритмом (сплошные линии) и истинные 1D-сигналы (пунктир)

Заключение

На примере реализованных алгоритмов экспресс-инверсии данных БКЗ и учета влияния вмещающих пород на сигналы ВЭМКЗ продемонстрированы возможности нового подхода к обработке данных электрокаротажа на основе свёрточных ИНС. Разработанные алгоритмы ориентированы на исследование сложнопостроенных проницаемых отложений и сочетают в себе преимущества интерпретации данных на базе двумерной осесимметричной модели среды с быстродействием и низкой ресурсоемкостью. Это позволит использовать их на этапе первичной обработки, повышая достоверность оперативной интерпретации и упрощая проверку кондиционности измеренных данных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного Проекта № 20-45-543003 «Методико-алгоритмическое обеспечение количественной интерпретации данных электрокаротажа нефтяных скважин на основе технологий машинного обучения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логинов Г.Н., Петров А.М. Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика. – 2019. – т. 60. – № 11. – С. 1650-1657.
2. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – P. 15.
3. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // ГЕО-Сибирь-2018. Т. 4. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г. – 2018. – С. 90-98.
4. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Электронный ресурс] URL: http://cs229.stanford.edu/proj2015/054_report.pdf

REFERENCES

1. Loginov G.N., Petrov A.M. Avtomaticheskoe vydelenie geoelektricheskikh granic po dannym bokovogo karotazhnogo zondirovaniya s pomoshch'yu glubokoj svertochnoj nejronnoj seti // Geologiya i geofizika. – 2019. – t. 60. – № 11. – S. 1650-1657.
2. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – P. 15.
3. Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V. Bystraya sovместnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovaniy s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya // GEO-Sibir'-2018. T. 4. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika.

Geoekologiya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 23-27 aprelya 2018 g. – 2018. – S. 90-98.

4. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Jelektronnyj resurs] URL: http://cs229.stanford.edu/proj2015/054_report.pdf.

© *К. Н. Даниловский, А. Р. Леоненко, А. М. Петров, 2021*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ РТУТИ В ПРОФИЛЕ ТИПИЧНЫХ ПОЧВ ЮЖНОЙ СИБИРИ

Елена Евгеньевна Ляпина

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634050, Россия, г. Томск, пр. Академический 10/3, к.г.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: eeldv@mail.ru

В статье приводятся оригинальные данные о валовой концентрации Hg в типичных почвах степных, лесостепных ландшафтов, озерно-аккумулятивных равнин, а также систем межгорных понижений Южной Сибири. Получены количественные оценки распределения Hg в почвенных профилях на территории Томской области, Алтайского края, Республики Бурятия. Выявлены особенности распределения концентраций Hg в почвенных профилях в зависимости от гранулометрического состава, водородного показателя, электропроводности и магнитной восприимчивости. Определены формы нахождения Hg в почвенных профилях разных типов почв. В исследованных типах почв наибольшая доля Hg приходится на формы, испаряющиеся в температурном диапазоне 170-400⁰С, т.е. высоколетучие низкомолекулярные ртуть-органические соединения, HgCH₃, Hg(CH₃)₂, HgCl₂, алкильные радикалы HgS, арильные радикалы, а также в составе органокомплексов. Данные формы наиболее доступные и токсичные для живых организмов, доля недоступных и инертных форм минимальна.

Ключевые слова: ртуть, Hg, почва, формы нахождения, геохимия, геоэкология

DISTRIBUTION OF THE FORMS OF MERCURY OCCURENCE IN THE PROFILE OF TYPICAL SOILS OF SOUTH SIBERIA

Elena Lyapina

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), 634055, Russia, Tomsk, 10/3, Academicheskyy ave., PhD, Researcher eeldv@mail.ru

Key words: mercury, Hg, soil, forms of occurrence, geochemistry, geoeology

Исследование почвы как долговременной депонирующей среды и важнейшего компонента биосферы, является актуальным и важным с позиции экологии, экономики и сельского хозяйства. Благодаря уникальным геохимическим и токсикологическим свойствам ртути (Hg), определяющим особенности ее накопления и перераспределения в компонентах окружающей среды, разнообразие форм миграции и специфику их трансформации в результате воздействия широкого спектра источников как природного, так и антропогенного происхождения, определение особенностей накопления и распределения Hg в почвах важная задача геоэкологии и геохимии. В почвах Hg аккумулируется органическим веществом, глинистыми частицами, может поглощаться растительностью, в том числе сельскохозяйственной, а также выделяться в виде паров и в составе пыли в атмосферу, мигрировать вниз по почвенному профилю и поступать в грунтовые воды. Концентрации Hg в почвах фоновых территорий варьируют в диапазоне 0,01-0,1

мг/кг. Максимальные концентрации приурочены, как правило, к верхним горизонтам и обычно снижаются с глубиной. Особенности миграции металла вниз по профилю почв обусловлены свойствами почв, соединений металла и др. Для Сибири характерны уровни Hg в пределах 0,005-1,275 мг/кг [1].

Целью данной работы является выявление особенностей распределения форм нахождения Hg в профилях типичных почв южной Сибири.

Отбор проб грунта проводился на территории Томской области, Алтайского края, и Республики Бурятия методом шурфа, согласно [2] на глубину почвенного профиля до 120 см с интервалом опробования 5 см. Всего отобрано 8 разрезов: 1) профиль глубиной 85 см на полигоне «Фоновый» на станции ИОА СО РАН в 70-ти км к югу от г. Томск (далее Киреевск); 90 см в пригороде г. Томска с южной стороны вдоль р. Томь (далее Потаповы Лужки) (Томская область); 2) 90 см в лесостепной зоне возле с. Добровольщина (далее Добровольщина); 100 см в степной зоне возле оз. Песчаное (далее Песчаное); 100 см возле оз. Малое Яровое (далее М. Яровое); 75 см в районе добычи поваренной соли возле оз. Бурсоль (далее Б. Карьер) (Алтайский край); 3) 120 см на территории Национального парка «Тункинский» (далее Жемчуг), почвенный разрез глубиной 120 см и 90 см в межкотловинной долине участок Тунка, представленный трансформированными торфяными почвами (Республика Бурятия).

Почвы участков представлены разными типами, но все являются типичными для изучаемых территорий и не испытывают непосредственного антропогенного воздействия:

- Томская область – почвы представлены светло-серыми и серыми лесными, а также дерново-глеевыми почвами террас р. Томь и Обь [3];

- Алтайский край – почвы относятся к южным черноземам и темно-каштановым южным черноземам Кулундинской степи, а также к черноземам южным солонцеватым и солончакам луговым [4, 5];

- Республика Бурятия – почвы долинные березовые разнотравные с дерновыми лесными глееватыми почвами с участками осоково-разнотравных лугов с луговыми черноземовидными почвами [6].

Изучение проб осуществляли в учебно-научной лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» НИ ТПУ. Содержание Hg в пробах определяли на анализаторе ртути РА-915+, методом атомной абсорбции с помощью приставки ПИРО-915 (метод пиролиза; предел обнаружения Hg - 5 нг/г). Точность определения анализа - 5 нг/г, содержание Hg в пробах рассчитывали на 1 г сухого вещества. Кроме того были определены рН и электропроводность водной вытяжки почв, а также магнитная восприимчивость. Гранулометрический анализ почв выполнен при помощи лабораторных сит диаметром 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,1; 0,04 мм.

Определение форм нахождения (ФН) Hg в пробах почв проводился методом термодесорбции на том же приборе. При температурах $<125^{\circ}\text{C}$ высвобождается элементная Hg и высоколетучие низкомолекулярные ртутьорганические соединения - свободная форма (СВ). По данным исследований установлено, что в

интервале от 160 до 250⁰С возгоняются соединения Hg, связанные с органическим веществом почв, гуминовыми и фульвокислотами - физически связанная форма (ФС). Разрушение ароматического ядра гумусовых кислот в результате термодеструкции происходит при 250-350⁰С. При температуре >350⁰С высвобождаются сульфиды, оксиды Hg, а также Hg, входящая в состав первичных минералов – химически связанная и сульфидная форма (ХС, С). При температурах в интервале 500-1000⁰С выходит Hg, входящая в кристаллическую решетку минералов – изоморфная форма (ИЗ) [7, 8, 9].

Профили всех исследованных почв имеют похожий вид: максимальные концентрации Hg отмечаются в верхней части профиля с последующим снижением вниз по почвенному профилю (рис. 1). Исключение составляет только почвенный разрез участка «Киреевск» и «М. Яровое», где максимальные концентрации выявлены в нижней части почвенного профиля.

Среднее содержание Hg в пробах почв, отобранных на территории Томской области, составляет 15 нг/г (4-29 нг/г). Наименьшие средние концентрации на территории Алтайского края, 8 нг/г (2-22 нг/г). Максимальное среднее содержание отмечается в почвах участка «Жемчуг» - 20 нг/г (3-46 нг/г).

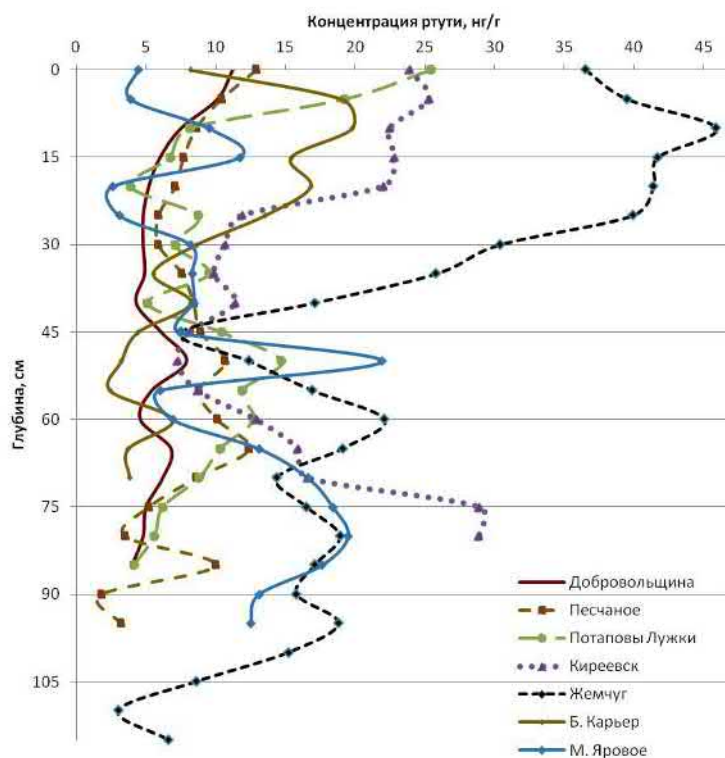


Рис. 1. Распределение концентраций Hg в профиле типичных почв Южной Сибири

В зависимости от гранулометрического состава содержание Hg в исследованных образцах варьирует от 5 до 24 нг/г. В половине случаев наибольшее

содержание Hg отмечается в самой мелкой фракции $>0,04$ мм, что соответствует крупной пыли по Качинскому [10]. В остальных случаях максимальные концентрации Hg приходятся на частицы почвы >1 ; $>0,5$ $>0,125$ мм, что соответствует среднему и мелкому песку [10].

Концентрации Hg в почвенных профилях всех исследованных участков снижается с увеличением pH и магнитной восприимчивости. Исключение составляют почвы участка «Киреевск» в Томской области, где концентрации Hg растут с повышением значений электропроводности и магнитной восприимчивости. Кроме того, от величины pH зависит электропроводность и магнитная восприимчивость почв. Причем, подщелачивание почв снижает величину магнитной восприимчивости и электропроводности почвенной вытяжки. Концентрации Hg в профилях связаны с наличием глинистых частиц и увеличиваются со смещением реакции почвенной вытяжки в кислую сторону. При увеличении магнитной восприимчивости и электропроводности концентрации элемента снижаются.

По результатам определения термоформ Hg в типичных почвах Южной Сибири выяснили, что, в среднем, в исследованных почвах Hg распределяется в виде СВ и ФС (до 77%), ХС и составе органокомплексов (до 64%) и ИЗ (до 29%) (рис. 2). И в большинстве случаев максимальная доля элемента высвобождается в температурном интервале 170-230 и 300-400 $^{\circ}$ C, соотношение 50/50. Доля Hg в составе кристаллической решетки минералов минимальна во всех исследованных пробах (10-12%). Исключение составляет лишь участок Потаповы Лужки, где соотношение форм нахождения элемента примерно равно (35%) и доля ИЗ Hg самая высокая среди изученных почв (29%).

Почвы Алтайского края характеризуются преобладающим нахождением Hg в виде HgS, арильных радикалов Hg и органических комплексов. Второе место занимают Hg 0 , HgCH $_3$, Hg(CH $_3$) $_2$. Доля HgS $_2$, HgO минимальна.

В почвах Томской области максимальная доля элемента выделена в низкотемпературной форме (35-77%). Далее картина неоднозначная – с одной стороны высока доля ФС Hg (до 35%), с другой стороны максимальный процент ИЗ (29%).

В пробах почв Республики Бурятия элемент высвобождается в основном при температуре 170-230 $^{\circ}$ C, соотношение остальных форм примерно одинаково (10-13%).

В поверхностной составляющей всех исследованных почв превалирует СВ Hg (6 участков из 8). С глубиной соотношение форм меняется в сторону увеличения доли элемента, связанной с органическим веществом, а также ХС. В нижней части почвенного профиля повышен процент Hg в составе кристаллической решетки минералов.

При этом стоит отметить разный характер изменения соотношения форм нахождения элемента. В засоленных почвах Алтайского края в среднем по профилю преобладают формы элемента, испаряющиеся в интервале температур 300-400 $^{\circ}$ C. В богатых гумусом южных черноземах Алтайского края и трансформированных торфяных почвах Республики Бурятия преобладают соединения Hg, связанные с органическим веществом почв, гуминовыми и фульвокислотами на всю

глубину разреза. Дерново-глеевые почвы Томской области и луговые черноземовидные Республики Бурятия характеризуются наличием экстремумов по всей глубине почвенного профиля, а также преобладанием низкотемпературной формы Hg.

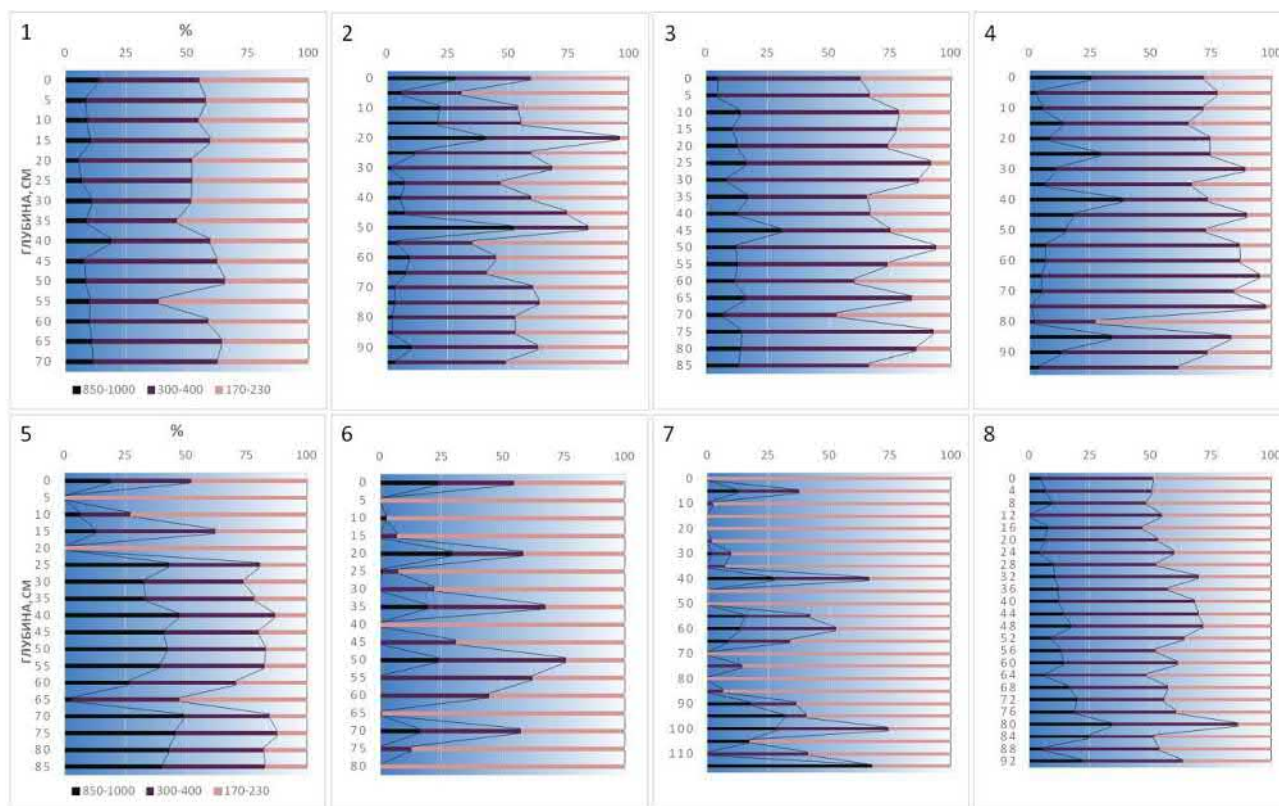


Рис. 2. Распределение форм нахождения Hg в типичных почвах южной Сибири, участки:

1 – Б. Карьер; 2 – М. Яровое; 3 – Добровольщина; 4 – Песчаное; 5 – Потаповы Лужки; 6 – Киреевск; 7 – Жемчуг; 8 – Тунка; температуры выхода термовид Hg, °C: 850-1000 – изоморфная; 300-400 – ульорганокмплесксы и химически связанная, сульфидная; 170-230 – свободная и физически связанная

В целом соотношение форм нахождения Hg в типичных почвах Южной Сибири зависит от типа почв, глубины почвенного горизонта, химического состава, гидрологического режима и др. [11] В исследованных типах почв наибольшая доля Hg приходится на формы, испаряющиеся в температурном диапазоне 170-400°C. Элемент в данном интервале температур представлена высоколетучими низкомолекулярными ртутьорганическими соединениями, HgCH_3 , $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$, HgCl_2 , алкильными радикалами, HgS , арильными радикалами, а также органо-комплексными. Низкотемпературные формы (СВ и ФС) являются наиболее доступными и токсичными для живых организмов. Доля Hg, присутствующей в кристаллической решетке минералов и сульфидной форме (недоступные и инертные формы) минимальна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аношин Г.Н., Маликова И.Н., Ковалев С.И. и др. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития*, т.3, № 1-2, 1995, С. 69-111.
2. ГОСТ 17.4.02-84. "Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа" М., Гидрометеиздат, 1983.
3. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы Обь-Томского междуречья // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2011. № 3 (15). С. 16–37.
4. Важов В.М. Гречиха на полях Алтая: монография / М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2013. – 188 с.
5. Маликова И.Н., Страховенко В.Д. Корреляционные связи ртути в почвах и донных отложениях оз. Большое Яровое // *Химия в интересах устойчивого развития*, № 25, 2017, С. 195-203.
6. Черкашина А.А., Голубцов В.А. Структура почвенного покрова Тункинской котловины // *География и природные ресурсы* 2016 №3, С. 130-140.
7. Звонарев Б.А., Зырин Н.Г. Изучение форм соединений ртути в почвах с помощью пиролиза при разных температурах // *Биологические науки*. – 1982. – № 8. – С. 97-102.
8. Радченко А.И. Формы нахождения ртути в биосфере // *Минералогический журнал*. 1999. – №5/6. – С. 48-56.
9. Никулина У.С., Кукин И.А., Гладков С.Ю. и др. Об определении форм ртути в сильнозагрязненных почво-грунтах антропогенного происхождения // *Успехи в химии и химической технологии*. Том XXVII. 2013. №6, С. 25-29.
10. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. — Москва: Изд-во АН СССР, 1958. — С. 25. — 191 с.
11. Malikova I.N., Ustinov M.T., Anoshin G.N. et al. Mercury in soils and plants in the area of Lake Bol'shoe Yarovoe (Altai Territory) // *Russian Geology and Geophysics*. Volume 49, Issue 1, January 2008, P. 46-51

REFERENCES

1. Anoshin G.N., Malikova I.N., Kovalev S.I. i dr. Rttut' v okruzhayushchej srede yuga Zapadnoj Sibiri // *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*, t.3, № 1-2, 1995, S. 69-111.
2. GOST 17.4.02-84. "Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakterio-logicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza" M., Gidrometeoizdat, 1983.
3. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Pochvy Ob'-Tomsogo mezhdurech'ya // *Vestnik Tomsogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2011. № 3 (15). S. 16–37.
4. Vazhov V.M. Grechiha na polyah Altaya: monografiya / M.: Izdatel'skij dom Akademii Estestvoznaniya, 2013. – 188 s.
5. Malikova I.N., Strahovenko V.D. Korrelyacionnye svyazi rtuti v pochvah i donnyh otlozheniyah oz. Bol'shoe Yarovoe // *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*, № 25, 2017, S. 195-203.
6. Cherkashina A.A., Golubcov V.A. Struktura pochvennogo pokrova Tunkinskoj kotloviny // *Geografiya i prirodnye resursy* 2016 №3, S. 130-140.
7. Zvonarev B.A., Zyrin N.G. Izuchenie form soedinenij rtuti v pochvah s pomoshch'yu piroliza pri raznyh temperaturah // *Biologicheskie nauki*. – 1982. – № 8. – S. 97-102.
8. Radchenko A.I. Formy nahozhdeniya rtuti v biosfere // *Mineralogicheskij zhurnal*. 1999. – №5/6. – S. 48-56.

9. Nikulina U.S., Kukin I.A., Gladkov S.YU. i dr. Ob opredelenii form rtuti v sil'nozagryaznennyh pochvo-gruntah antropogenного proiskhozhdeniya // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. Tom XXVII. 2013. №6, S. 25-29.

10. Kachinskij N.A. Mekhanicheskij i mikroagregatnyj sostav pochvy, metody ego izucheniya. — Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1958. — S. 25. — 191 s.

11. Malikova I.N., Ustinov M.T., Anoshin G.N. et al. Mercury in soils and plants in the area of Lake Bol'shoe Yarovoe (Altai Territory) // Russian Geology and Geophysics. Volume 49, Issue 1, January 2008, P. 46-51.

© *Е. Е. Ляпина, 2021*

ПРОГНОЗ СКОПЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Анна Васильевна Мамаева

Сибирский научно-исследовательский институт Геологии, Геофизики и Минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Потанинская, 6, ведущий эксперт, e-mail: mamaeva@sniiggims.ru

Евгений Валерьевич Крупнов

Сибирский научно-исследовательский институт Геологии, Геофизики и Минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Потанинская, 6, начальник отдела, e-mail: krupnov@sniiggims.ru

В работе рассмотрены результаты электромагнитных исследований методом ЗСБ, выполненных в пределах Нижне-Алданской площади Центральной Якутии с целью изучения особенностей геоэлектрического строения верхней части разреза. Изучена верхняя часть криолитозоны, определены ее геоэлектрические характеристики, выделены таликовые зоны, а также зоны, перспективные на обнаружение скопления газовых гидратов.

Ключевые слова: метод ЗСБ (зондирование становлением поля в ближней зоне), удельное электрическое сопротивление, газовый гидрат, многолетнемерзлые породы, ММП, Нижне-Алданская площадь, Центральная Якутия

FORECAST OF GAS HYDRATE ACCUMULATION IN MEZSOZOIC SEDIMENTS OF CENTRAL YAKUTIA FCCJRNDING TO ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA

Anna V. Mamaeva

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 6 Potaninskaya str., Leading Expert, e-mail: mamaeva@sniiggims.ru

Evgeny V. Krupnov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 6 Potaninskaya str., Head Department., e-mail: krupnov@sniiggims.ru

This article discusses the results of electromagnetic studies by the TEM method. They are made within the limits of Central Yakutia. The purpose of the research is to study the features of the geoelectric structure of the upper part of the section. The upper part of the cryolithozone was studied, its geoelectric characteristics were determined, talik zones were identified, as well as zones promising for detecting gas hydrate accumulations.

Keywords: TEM, electrical resistivity, gas hydrate, permafrost rocks, Nizhne-Aldanskaya area, Central Yakutia

Согласно карте «Карте распространения ММП на территории России», территория Нижне-Алданской площади относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощностью до 400 метров при средней температуре $(-3)^{\circ}\text{C} - (-5)^{\circ}\text{C}$. В верхней части разреза, представленной мезо-

кайнозойскими отложениями, выделяются два типа криогенного строения: эпигенетические и сингенетические мерзлые толщи [1]. К первому типу относятся все дочетвертичные образования, которые перешли в многолетнемерзлое состояние после завершения процесса осадконакопления. Ко второму – большая часть отложений, сформировавшихся на мерзлом субстрате в позднем плейстоцене и голоцене и промерзавших синхронно с процессом осадконакопления [2]. Среди дочетвертичных пород наименее насыщены льдом мезозойские образования угленосной формации. Для этих пород характерно однородное, выдержанное по площади и в разрезе криогенное строение. Для сцементированных пород (песчаников, алевролитов) типичны унаследованные (поровые и трещинные) криотекстуры, для нелитифицированных – массивные. Палеоген-неогеновые отложения, а также аллювиальные пески и галечники характеризуются массивной криотекстурой с поровым льдом –цементом. Согласно данным бурения на правом берегу р. Лены мощность толщи ММП составляет – 350-450 м. Ниже породы находятся в морозном состоянии. Нулевая изотерма проходит немногим ниже 400-600 м [«Карта мощности криолитозоны СССР», 1991].

Проведенные исследования выявили следующие основные особенности геоэлектрического строения верхней части разреза: двухслойное строение криолитозоны (КЛЗ); сокращение мощности многолетнемерзлых пород в южном и юго-западном направлениях; наличие проводящих объектов изометричной формы, пространственно сопряженных с озерами и долинами мелких рек. Верхняя часть криолитозоны представлена твердомерзлыми породами (преимущественно четвертичного и палеоген-неогенового возраста) с высокими значениями УЭС, а нижняя – морозными или пластично-мерзлыми породами (мезозойского возраста) с относительно низкими значениями УЭС. Здесь следует пояснить, что мы имеем в виду. Термином "мерзлые породы" описываются отложения, содержащие лед. Мерзлые породы всегда находятся в поясе отрицательных температур, т.е. залегают выше нулевой изотермы. Мощность таких пород либо совпадает с ней, если она подстилается пресными водоносными горизонтами, либо меньше ее, если под мерзлыми породами располагаются морозные или охлажденные породы (содержащие минерализованные воды) [3]. В нашем случае мощность пояса отрицательных температур превышает мощность мерзлой зоны на сотни метров. Под мерзлыми породами практически повсеместно залегают породы в пластичном или морозном состоянии без видимых включений льда (рис. 1).

При этом наблюдается неоднородное латеральное распределение УЭС в широком диапазоне глубин. Здесь практически на всех профилях, выделяются объекты с высокими значениями удельного сопротивления – свыше 900 Ом·м. Скорее всего это связано с особенностями геокриологического строения верхней части КЛЗ, а именно с широким распространением грубодисперсного материала в четвертичных и палеоген-неогеновых отложениях (пески, прослой супесей, суглинков и гравия). Опираясь на вышеизложенные данные, был выполнен прогноз льдистости мерзлой толщи до глубины 400 метров.

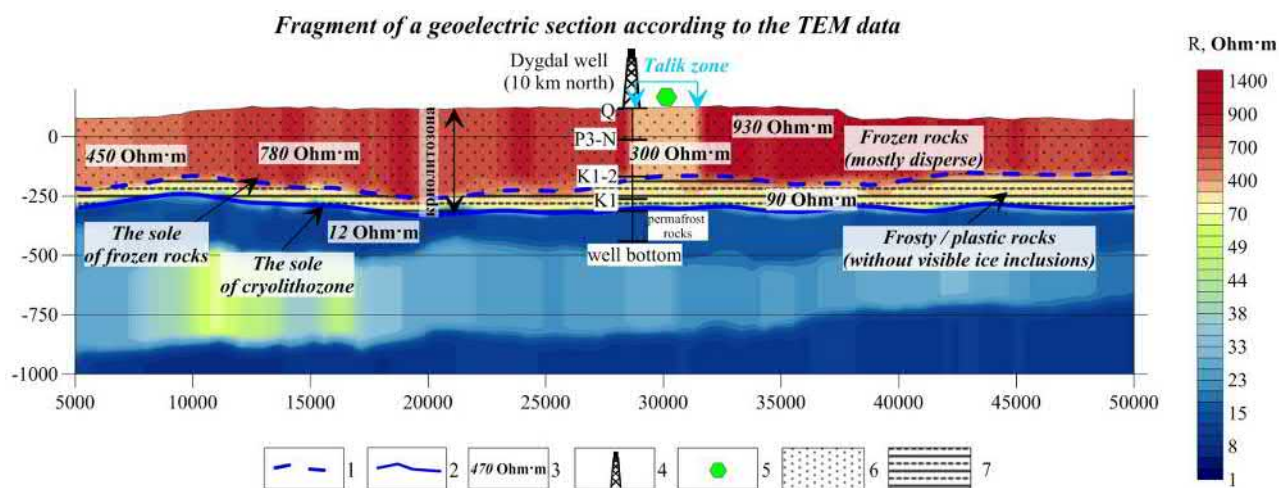


Рис. 1. Геоэлектрический разрез криолитозоны

1 - граница подошвы мерзлых пород по данным ЗСБ, 2 - граница криолитозоны, 3 - сопротивление в Ом·м, 4 - гидрогеологические скважины, 5 - установленные таликовые зоны, 6 - породы, вскрытые скважиной, представленные песками, 7 - представленные чередованием песков, аргиллитов и глин

В рамках работ нами была предпринята попытка рассмотрения нижней часть КЛЗ, представленной пластично-мерзлыми породами, как перспективный интервал разреза на обнаружение скопления газогидратов, так как в силу сходства свойств льдо- и гидратосодержащих пород при стандартном геофизическом исследовании скважин (ГИС) газогидратные скопления можно принять за мерзлые породы [4].

Газовые гидраты (ГГ) – кристаллические соединения, образованные из молекул воды и низкомолекулярных газов. ГГ широко распространены в субмаринных условиях, начиная с глубин 350–400 м, а также в областях криолитозоны глубже 200–250 м [5]. Гидраты природных газов могут образовываться при определенных для каждого газа – гидрообразователя термобарических условиях внутри зоны стабильности газогидратов (ЗСГ). В континентальных условиях области распространения зон стабильности гидратов большинства природных газов приурочены к областям распространения ММП и ледников, а также к зонам низких и отрицательных геотермических градиентов. Это обусловлено тем, что лишь при длительном и глубоком охлаждении литосферы возникают необходимые предпосылки для формирования в разрезах условий гидратообразования. Мощность ЗСГ обычно пропорциональна мощности криолитозоны – чем глубже залегает нулевая изотерма, тем больше мощность зоны стабильности гидратов [6].

В ходе многочисленных исследований, в основном в Западной Сибири, были сформулированы основные петрофизические признаки коллекторов, содержащих природные скопления ГГ: повышенные удельные электрические сопротивления и скорости распространения упругих волн; четко выраженные повышенные показания нейтронных методов каротажа; увеличение содержания

фоновому газу по результатам газового каротажа; отсутствие признаков проникновения фильтрата бурового раствора в пласт.

Анализ результатов, полученных предшественниками показал, что определенный интерес на рассматриваемой территории представляет комплекс отложенный верхнеюрско-нижнемелового возраста, развитый повсеместно в пределах северного склона Якутского поднятия. По данным С.П. Никитина (1985) [7] особого внимания заслуживают зоны выходов осадочных отложений на дневную поверхность по бортам прогибов и впадин, перекрытых мерзлотной покрывкой. Здесь, возможно, как скопление свободного газа, так и стабильных газовых гидратов. Важнейшим фактором, обуславливающим возможность образования и существования газогидратных скоплений, является наличие достаточного количества газа –гидратообразователя.

На территории исследования в зону стабильности гидратов попадают регионально распространенные песчаные отложения нижнего мела – эхксеняхской, батылыхской свит. При бурении гидрогеологических скважин, вскрывших терригенный мезо-кайнозойский разрез, из данного интервала разреза были зафиксированы газопроявления различного характера (спонтанные выходы метана) [8].

В ходе проведения работ, по данным ЗСБ, на карте–срезе - 400 м (абс.отм.) установлены зоны повышения сопротивлений с граничными значениями от 40 до 80 Ом·м, при фоновых в 20 Ом·м. Для более детального оконтуривания аномального участка, были построена карта распределения удельных сопротивлений предположительно в отложениях батылыхской свиты нижнего мела. Повышение сопротивления в данном интервале разреза могут свидетельствовать о распространении здесь газогидратных отложений. Кроме того, в верхней части разреза под предполагаемым перспективным объектом, фиксируется уменьшение мощности первого слоя КЛЗ (рис. 2).

Предполагается, что эти аномалии обусловлены, главным образом, протеканием экзотермических реакций в залежах углеводородов. Существование такого явления установлено по данным бурения на некоторых вилюйских газоконденсатных месторождениях Якутии. На Неджелинской, Мастахской, Толонской и частично Средне-Вилуйской структурах Хапчагайского поднятия Вилуйской синеклизы были проведены специальные работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). По результатам работ было обнаружено, что над залежами углеводородов в названных структурах, сокращение мощности мерзлых толщ достигает сотен метров. Участки с минимальной мощностью мерзлой толщи коррелируются с продуктивными частями месторождений [9].

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно предположить существование путей миграции, обеспечивающих подток газа из нижележащих юрских горизонтов. В первую очередь, такими путями являются субвертикальные разломы земной коры, в том числе неотектонические, которые широко развиты в пределах площади работ. В пользу этого предположения говорит наличие геохимических аномалий метана, этана, бутана, оконтуривающих перспективный объект.

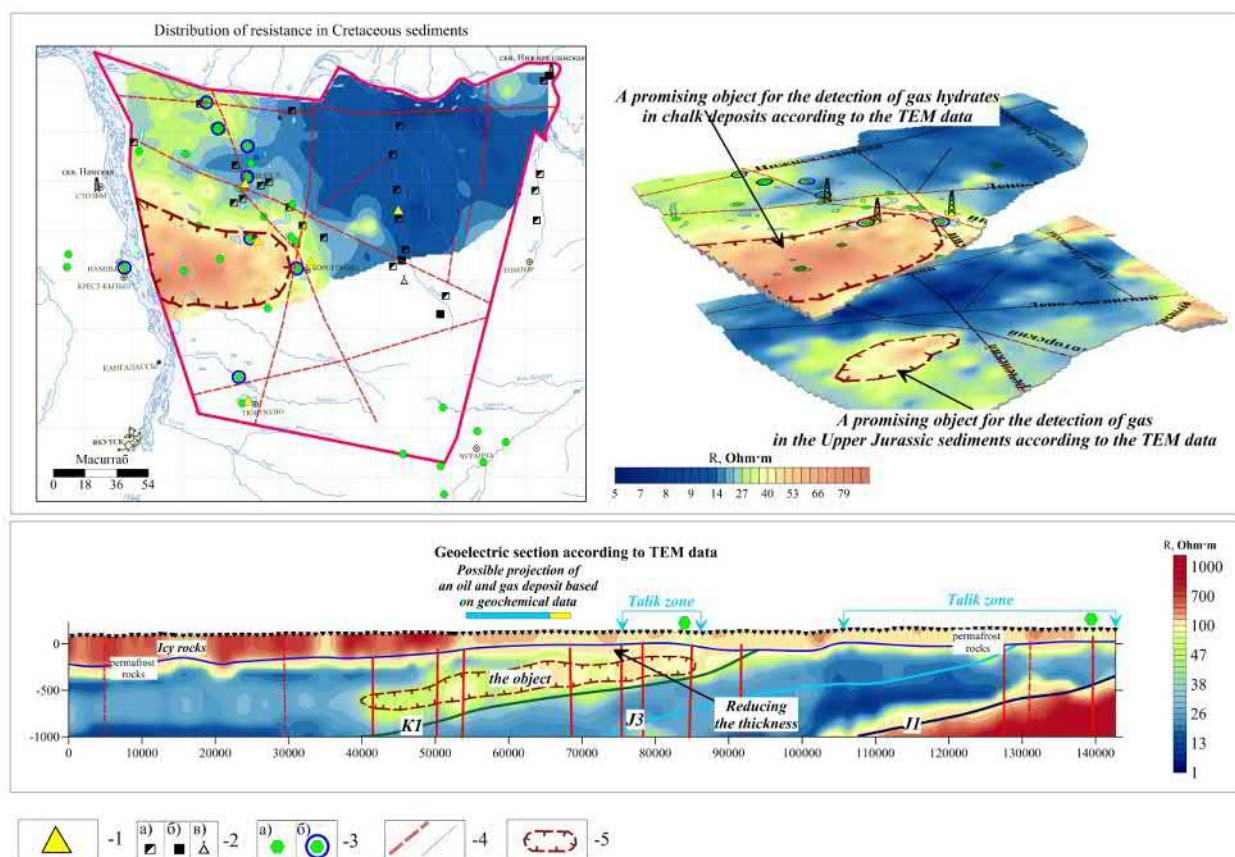


Рис. 2. Прогноз перспективных объектов в отложениях мела

1 - спонтанные выходы газа из батылхской свиты нижнего мела, 2 - проявления горючих ПИ: а) бурый уголь, б) каменный уголь, в) газ, 3 - талики: а) ранее установленные, б) ранее установленные и заверенные бурением, 4 - тектонические нарушения по геологическим и геофизическим данным, 5- перспективные объекты

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаренко И.А., Гидрогеологические, инженерно-геологические и геоэкологические условия Центральной Якутии, Бестях, 2002, (фондовая, № 3076, Центр_Якутск).
2. Бойцов А. В., Геокриология и подземные воды криолитозоны: учебное пособие, Тюмень, 2011, С.8
3. Маслов А.Д., Осадчая Г.Г., Тумель Н.В. Шполянская Н.А, Основы геокриологии: учебное пособие, Ухта, 2005, С. 14
4. Чувилин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В. Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ва Ямал // Материалы II конф. геокриологов России. М., МГУ, 2001, т. 1, С. 169–173.
5. Истомин В.А., Квон В.Г, Дуров В.А. Метастабильное состояние газовых гидратов // Газовая промышленность, спецвыпуск «Газовые гидраты». – 2006. – С. 32-35.
6. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и островов Российский Химический Журнал. Том XLVII (2003) № 3, Газовые гидраты, С. 81.
7. Никитин С.П. Геология нефти и газа. Москва, 09'1985, Перспективы газонефтеносности зон выходов фанерозойских отложений районов мерзлоты Восточной Сибири, С. 12-14.
8. Сивцев А.И., Чалая О.Н., Зуева И.Н. Перспективы нефтегазосности Центральной Якутии как ресурс энергобезопасности // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» № 2, 2016, С. 79-80.

9. Якупов В.С. Залежи углеводородов и сопутствующие им аномалии глубины залегания верхней и нижней границ мерзлых толщ, Соровский образовательный журнал № 11, 1997, С. 60.

REFERENCES

1. Pisarenko I.A., Hidrogeologicheskie, inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie usloviya Central'noj YAkutii, Bestyah, 2002, (fondovaya, № 3076, Centr_ YAkutsk).
2. Bojcov A.V., Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony: uchebnoe posobie, Tyumen', 2011, S.8.
3. Maslov A.D., Osadchaya G.G., Tumel' N.V., SHpolyanskaya N.A, Osnovy geokriologii: uchebnoe posobie, Uhta, 2005, S. 14.
4. CHuvilin E.M., Perlova E.V., Dubinyak D.V. Eksperimental'noe modelirovanie uslovij sushchestvovaniya gazovyh gidratov v morskikh otlozheniyah p-va YAmal // Materialy II konf. geokriologov Rossii. M., MGU, 2001, t. 1, S. 169–173.
5. Istomin V.A., Kvon V.G, Durov V.A. Metastabil'noe sostoyanie gazovyh gidratov // Gazovaya promyshlennost', specvypusk «Gazovye gidraty». – 2006. – S. 32-35.
6. YAkushev V.S., Perlova E.V., Mahonina N.A., CHuvilin E.M., Kozlova E.V. Gazovye gidraty v otlozheniyah materikov i ostrovov Rossijskij Himicheskij Zhurnal. Tom XLVII (2003) № 3, Gazovye gidraty, S. 81.
7. Nikitin S.P. Geologiya nefiti i gaza. Moskva, 09'1985, Perspektivy gazoneftenosnosti zon vyhodov fanerozojskikh otlozhenij rajonov merzloty Vostochnoj Sibiri, S. 12-14.
8. Sivcev A.I., CHalaya O.N., Zueva I.N. Perspektivy neftegazonosnosti Central'noj YAkutii kak resurs energobezопасности // Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo» № 2, 2016, S. 79-80.
9. Yakupov V.S. Zalezhi uglevodorodov i soputstvuyushchie im anomalii glubiny zaleganiya verhnjej i nizhnjej granic merzlyh tolshch, Sorovskij obrazovatel'nyj zhurnal № 11, 1997, S. 60.

© А. В. Мамаева, Е. В. Крупнов 2021

ПОТОЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Александр Константинович Маништейн

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

Павел Андреевич Соколов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, студент, e-mail: SokolovPA@ipgg.sbras.ru, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, Проспект Карла Маркса, 20 к4, геофизик

В работе представлены элементы разработанного и изготовленного аппаратурно-программного комплекса «Поточный измеритель минерализации водных растворов», предназначенного для оперативной оценки минерализации растворов непосредственно в металлических трубопроводах, с постоянной установкой двухэлектродного датчика во взрывоопасной зоне, при давлениях до 160 атм. и с боковыми стенками измерительной ячейки выполненных из стали.

Ключевые слова: палетка, минерализация, взрывозащита, геометрический коэффициент, сопротивление, растворы, проводимость

FLOW METER OF MINERALIZATION FOR AQUEOUS SOLUTIONS

Alexander K. Manstein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Leading Researcher, MansteinAK@ipgg.sbras.ru

Pavel A. Sokolov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., student, SokolovPA@ipgg.sbras.ru, Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Karl Marx Ave., building 4, Geophysicist

The paper presents the elements of the development of the hardware and software complex "Flow meter of mineralization of aqueous solutions", designed for the rapid assessment of salinity of solutions directly in metal pipelines, with a permanent installation of a two-electrode sensor in an explosive zone, at pressures up to 160 atm. and with side walls of the measuring cell made of steel.

Keywords: palette, mineralization, explosion protection, geometric coefficient, resistance, solutions, conductivity

Поточный измеритель минерализации водных растворов и природных вод предназначен для автоматизированного мониторинга жидкостей, сопутствующих природному газу при его добыче. Разработанный измеритель имеет размеры значительно меньше чем диаметр газового трубопровода. Диаметр электродов 0.5 мм, длина 5 мм расстояние между ними 9 мм. Диаметр измерительной ячейки

24 мм. Толщина слоя жидкости над электродами более 5 мм. При разработке устройства применялись элементы теории электромагнитной микрогидродинамики водных растворов [1]. Выполненные эксперименты по наблюдению за величиной измеряемой минерализации сопутствующей воды на скважине № 814 показали высокую повторяемость измерений, при лабораторном подтверждении постоянства химического состава, что подтверждает заложенные при проектировании датчика теоретические возможности самоочистки электродов под действием электролиза и электроосмоса на не поляризуемых электродах, питаемых переменным током на частоте 1 кГц.

Аппаратурный комплекс состоит из блока питания, ноутбука (Notebook) с программным обеспечением для записи данных, полученных с измерителя сопротивления (RLC E7-22) и датчиков температуры. Датчик сопротивлений состоит из двух электродов, измерительной ячейки, в которой накапливается измеряемая жидкость. Стенки ячейки в нашем случае выполненной из стали (на схеме: Датчик R, рис. 2). Наибольшая частота измерений раз в 3-4 секунды.

Электрооборудование взрывозащищённое. Взрывозащита выполнена согласно требованиям ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99). Основные параметры и характеристики оборудования представлены в таблице 1.

Устройство датчика представлено на рис. 1. В правой части рисунка виден стальной стакан измерительной ячейки, торцевая часть которого предназначена для вваривания в трубу продуктопровода.



Рис. 1. Датчик измерителя сопротивления в разобранном виде

Таблица 1

Основные параметры и характеристики аппаратурно-программного комплекса

Интервал рабочих температур, °С	от – 4 до + 50
Датчик R предназначен для подключения к газовой трубе с давлением до, Мпа (кг/см ²)	16 (160)
Диапазон измерений, Ом	от 10 до 10 000
Точность измерения сопротивления, ± %	0.5
Измеритель температуры корпуса датчика R	есть
Измеритель температуры окружающей среды	есть
Точность измерения температуры, ± °С	0.5
Диапазон измеряемых минерализаций, г/л	0.1 - 300

Температурный коэффициент сопротивления растворов зависит от распределения электрических токов между электродами по двум цепям - прямо между электродами по жидкости и вокруг электродов по проводящей стенке. При увеличении температуры раствора возрастает подвижность ионов и снижается вязкость растворителя, что приводит к уменьшению удельного сопротивления электролита. В то же время увеличение температуры стенки измерительной ячейки приводит к увеличению УЭС металла. Параллельное соединение участка цепи с электролитической проводимостью и участка с электронной электропроводностью металла создаёт суммарный температурный коэффициент сопротивления для участка цепи между электродами и суммарное сопротивление в ячейке, которые зависят от температуры и минерализации раствора. Решение задачи определения ТКС данной измерительной ячейки не поддаётся точному расчёту.

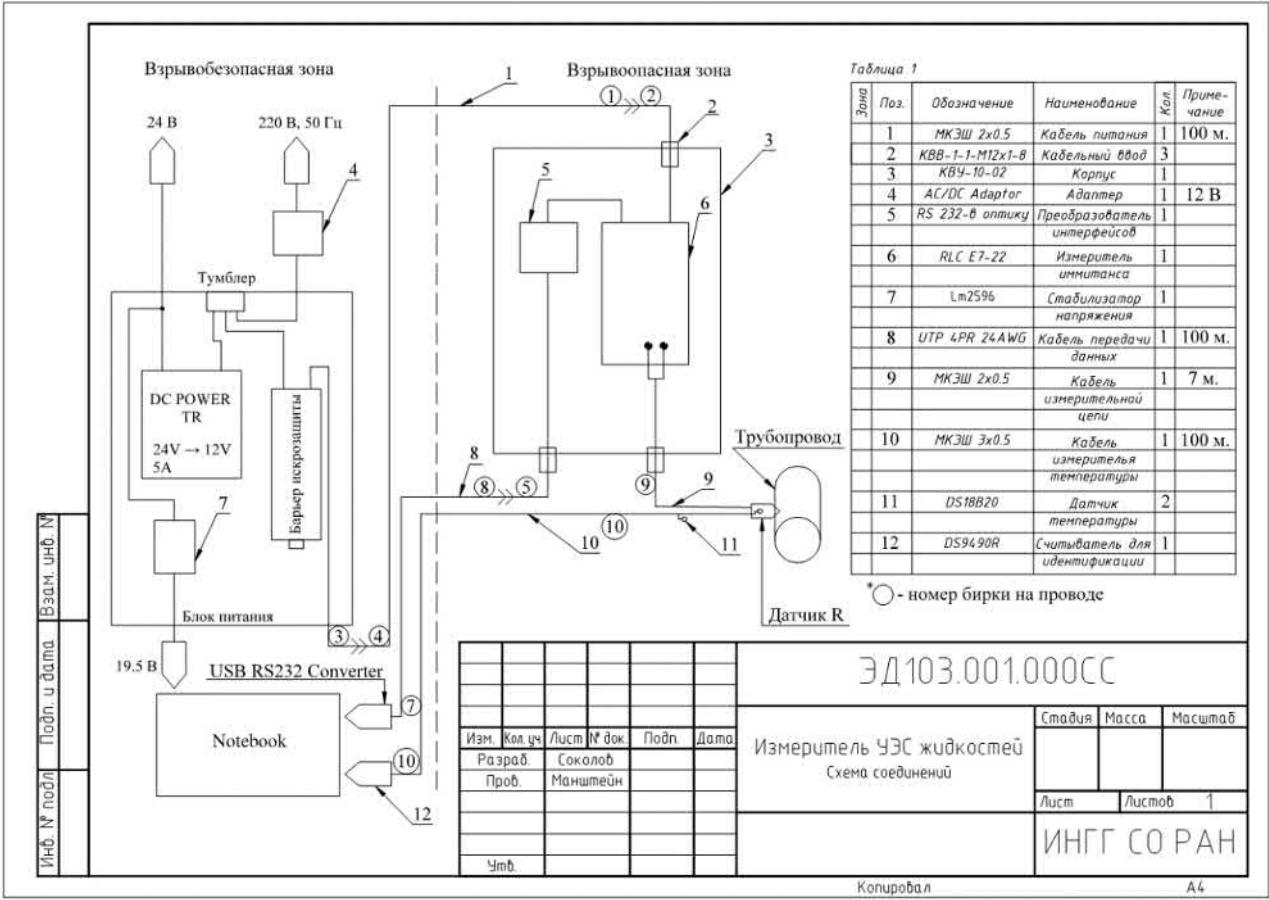


Рис. 2. Схема общего вида аппаратно-программного комплекса поточного измерителя минерализации водных растворов

Геометрический коэффициент измерительной ячейки в данном приборе не определяется как принято в рабочих ячейках с непроводящими стенками. В большинстве кондуктометров перевод измеренного сопротивления в удельное электрическое сопротивление происходит с помощью умножения измеренного сопротивления в цепи электродов на геометрический коэффициент в виде

отношения площади электродов на расстояние между электродами. На рис. 3 представлены экспериментальные кривые измеряемого сопротивления между электродами (для температуры 25 °С) и расчётного геометрического коэффициента для перевода этого сопротивления в УЭС. Для оценки расчётного коэффициента применялась палетка Шлюмберже [2].

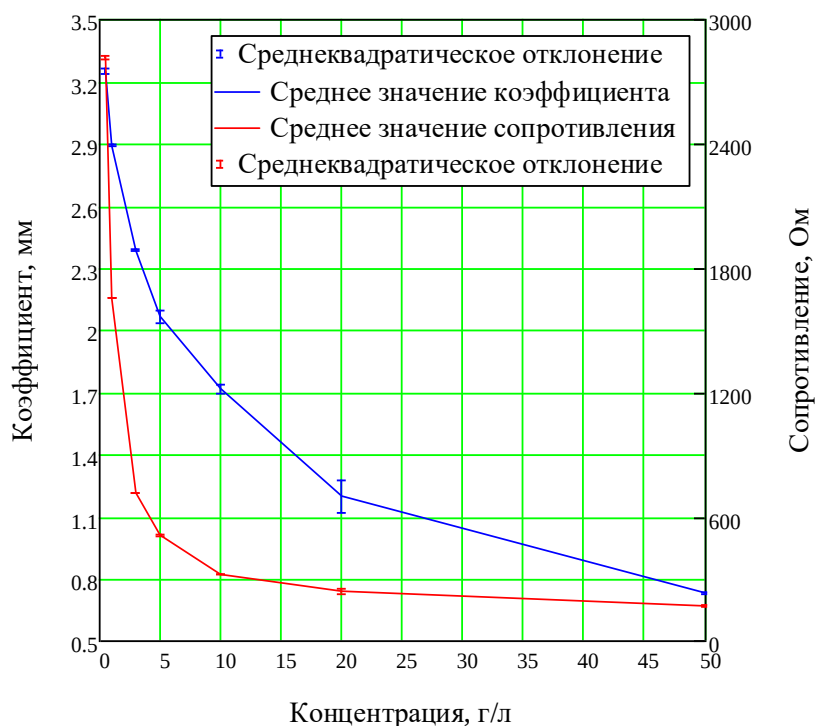


Рис. 3. Зависимость геометрического коэффициента и сопротивления от концентрации (температура 25 °С)

На рис. 3 видно, что для каждой концентрации раствора необходим свой геометрический коэффициент. В этом проявляется влияние электропроводящих стенок измерительной ячейки.

Лабораторные эксперименты показали особенности водных электролитов - в первую очередь непостоянство химического состава в зависимости от температуры. Особенно заметна плохая повторяемость измеряемого электрического сопротивления в цепи между электродами в растворах с минерализацией более 10 г/л и при температуре более 40 °С.

Для интерпретации данных от датчика было решено разработать палетку зависимостей: «Сопротивление, Температура, Минерализация».

Эксперименты выполнены в стабильных термодинамических условиях для растворов минерализаций от 0,1 до 300 г/л. Каждый раствор нагревался до температуры 64 градуса, после чего остывал и на участках стабильной температуры записывались значения сопротивлений. По полученному набору сопротивлений, зависящих от температуры, строились полиномиальные уравнения регрессии второй степени (аппроксимирующая функция) в виде:

$$R = a \cdot t^2 + b \cdot t + c, \quad (1)$$

где R – измеренное сопротивление, Ом при температуре t , °C; a , b , c – коэффициенты, которые находились из системы уравнений для квадратичной регрессии вида:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn = \sum_{i=1}^n R_i \\ a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n R_i t_i \\ a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n R_i t_i^2 \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 4, как пример, представлен график измеренных сопротивлений для минерализации 1 г/л при изменении температуры от 4 до 64 °C и аппроксимирующая прямая.

Эксперименты для каждой минерализации повторялись несколько раз. Определялись грубые ошибки, и эти данные не учитывались при обработке. Анализ повторений показывает достоверность измерений. Для дальнейшей обработки выбирались данные по нескольким повторениям с относительным разбросом не больше 9%, что соответствует требованиям ГОСТ 27384-2002 – «Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств».

Отклонения в первичных данных при повторениях экспериментов объясняются свойствами водных растворов, в частности изменение количества диссоциированных ионов, изменение вязкости и скорости ионов в зависимости от температуры [3].

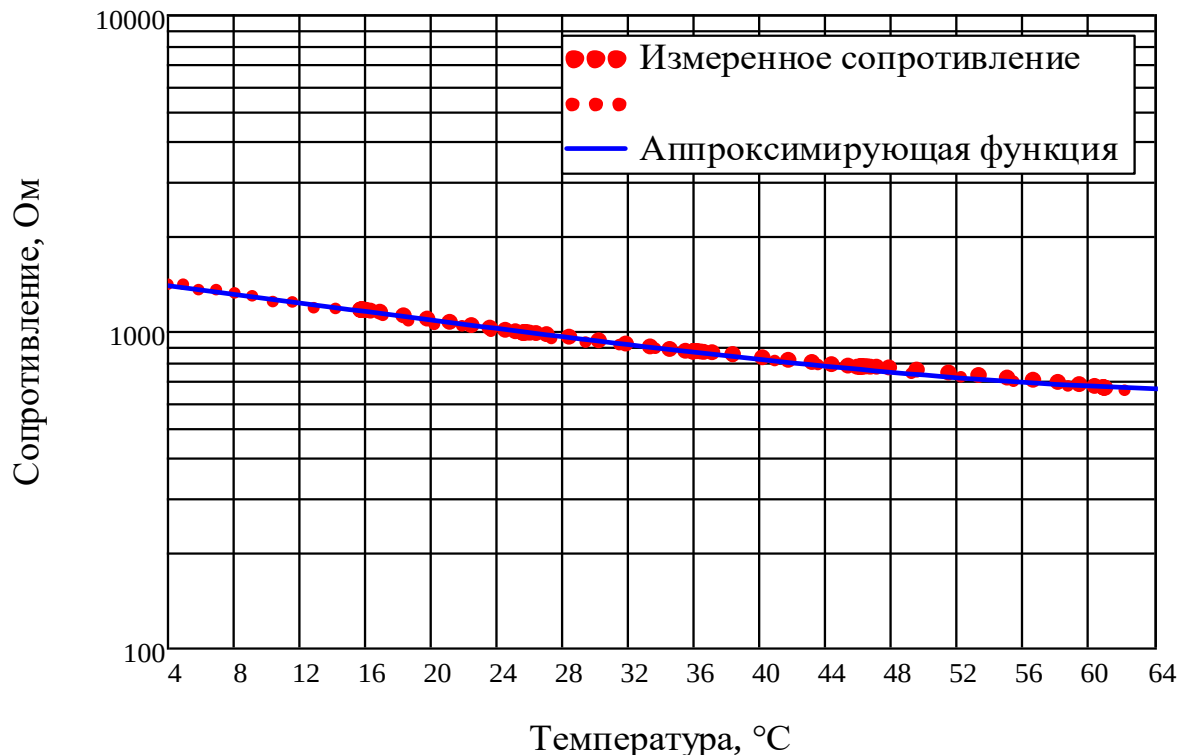


Рис. 4. Пример обработки измеренных данных. Раствор минерализацией 1 г/л. Аппроксимирующее уравнение: $R = 0.155 \cdot t^2 - 22.8 \cdot t + 1490$

После обработки всех экспериментальных данных была построена палетка для разработанного датчика, которая позволяет определять минерализацию раствора по измеренным сопротивлению и температуре в продуктопроводах с измерительной ячейкой, выполненной из стали (рис. 5).

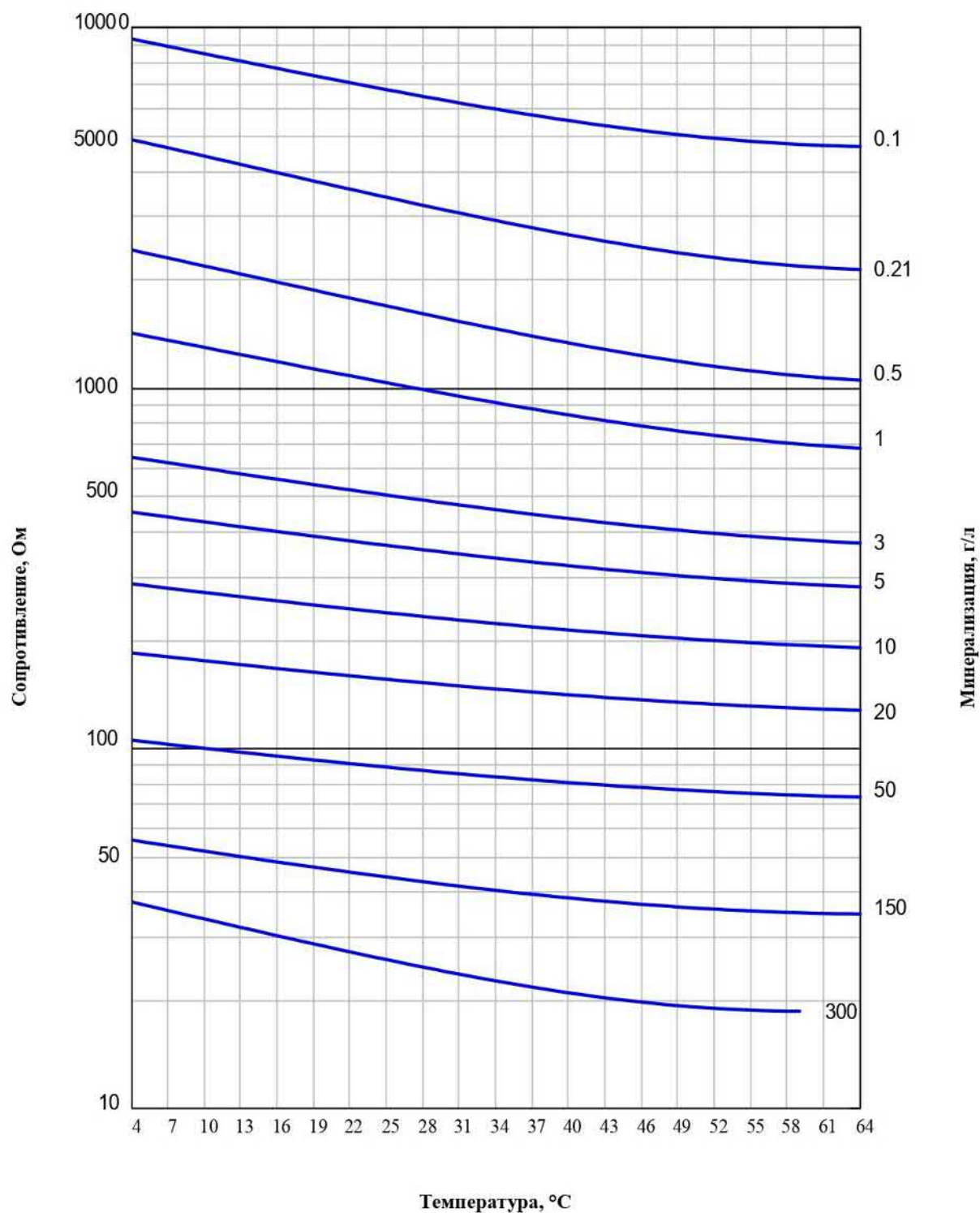


Рис. 4. Интерпретационная палетка для двухэлектродного датчика поточного измерителя минерализации водных растворов

Оценка точности построенной палетки в первую очередь определялась анализом повторяемости экспериментов. Цифровые коэффициенты статистической обработки представлены в табл. 2.

Пробы растворов, которые в экспериментах создавали измерения с большими ошибками в таблице не представлены. Кривые на палетке для этих минерализаций получены расчётным путём.

Таблица 2

Минерализация, г/л	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %	Повторяемость экспериментов при 25 °С, %
0.1	0.996	0.991	1.089	3.615
0.21	0.998	0.996	1.279	2.047
0.5	0.995	0.989	2.412	4.804
1	1	0.999	0.217	0.755
5	0.996	0.991	1.109	1.828
20	0.939	0.882	3.373	5.473
300	0.995	0.99	1.309	7.773

Для нахождения неизвестных промежуточных данных применялась своего рода интерполяция, основанная на нахождении аппроксимирующей функции для коэффициентов в полиноме, описывающем экспериментальные данные (1). Основная идея была в том, чтобы найти, как зависят коэффициенты **a**, **b** и **c** от минерализации. Применение стандартных методик нахождения аппроксимирующей функции показало сложный характер поведения кривых, из-за чего средняя ошибка аппроксимирующей функции доходила до 57%, тогда было решено работать с натуральным логарифмом коэффициентов и минерализаций. На рис. 6 представлена зависимость натурального логарифма коэффициента **a** от натурального логарифма минерализации.

Таким образом, были найдены аппроксимирующие функции для коэффициентов **a**, **b** и **c**, равные:

$$\begin{aligned}
 a(C) &= e^{0.015 \ln(C)^3 - 0.014 \ln(C)^2 - 0.987 \ln(C) - 1.864} \\
 b(C) &= -e^{0.013 \ln(C)^3 - 0.017 \ln(C)^2 - 0.942 \ln(C) + 3.128} \\
 c(C) &= e^{0.024 \ln(C)^3 - 0.000436 \ln(C)^2 - 0.759 \ln(C) + 7.316}
 \end{aligned} \tag{3}$$

где **C** – минерализация, г/л.

Цифровые коэффициенты оценки точности для **a(C)**, **b(C)**, **c(C)** представлены в таблице 3.

Для упрощения вычисления уравнения (1) можно найти корни относительно **t**, которые будут равны:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{b(C)+4a(C)(R-d(c))}-b(c)}{2a(c)} \\ t_2 = -\frac{\sqrt{b(C)+4a(C)(R-d(c))}+b(c)}{2a(c)} \end{cases} \tag{4}$$

где R – измеряемое сопротивление, Ом; $a(C)$, $b(C)$, $c(C)$ – коэффициенты, описываемые уравнениями (3).

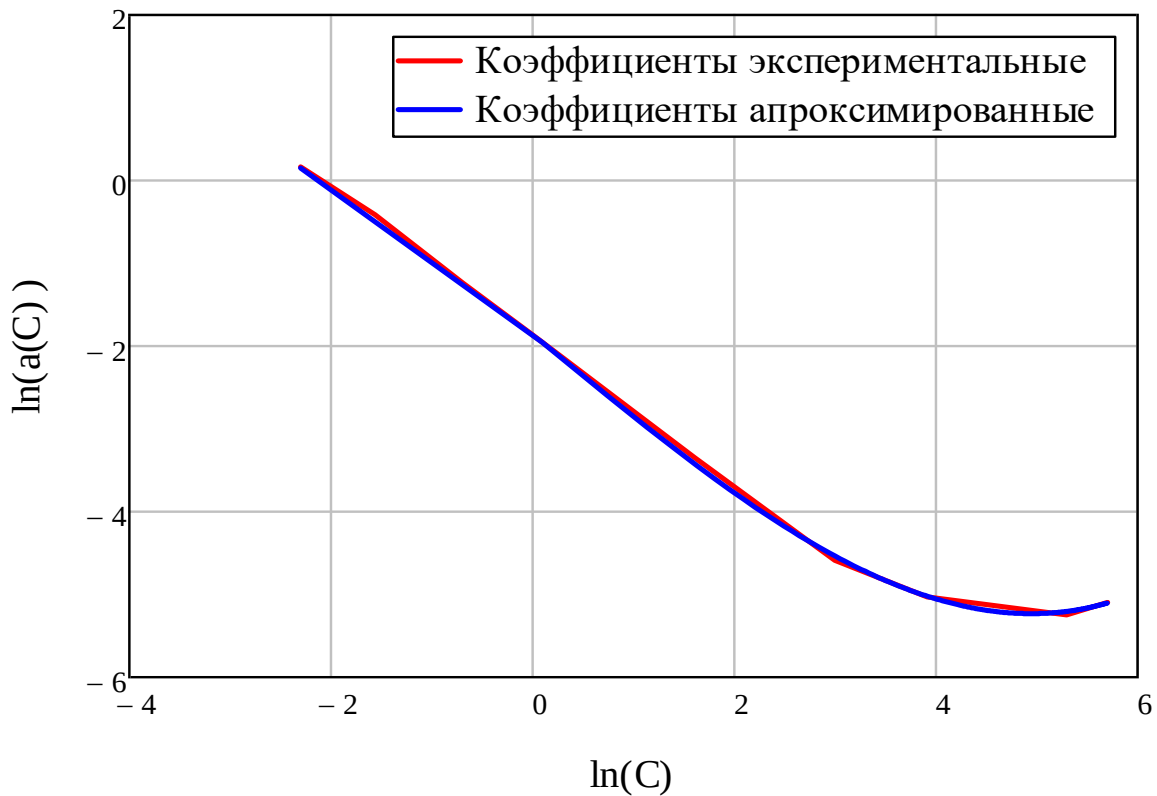


Рис. 6. Зависимость коэффициента a от минерализации.

Уравнение аппроксимации:

$$a(C) = 0.015 \ln(C)^3 - 0.014 \ln(C)^2 - 0.99 \ln(C) - 1.9$$

После анализа полученных выражений было установлено, что корень t_1 не имеет физического смысла, таким образом, общее уравнение для нахождения минерализации поточным измерителем минерализации водных растворов имеет вид:

$$-\frac{\sqrt{b(C)+4a(C)(R-d(C))+b(C)}}{2a(C)} - t = 0 \quad (5)$$

Таблица 3

Цифровые коэффициенты полиномиального уравнения

Коэффициент при степени в аппроксимирующем полиноме*	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
$a(C)$	0.9997	0.9996	0.425
$b(C)$	0.9998	0.9997	0.209
$c(C)$	0.9997	0.9995	0.206
*Полином вида: $R = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$			

Зная минерализацию можно получить удельное электрическое сопротивление и удельную электрическую проводимость при любой температуре по уже известной палетке Шлюмберже «Resistivity of NaCl Water Solutions» (рис. 7) [2].

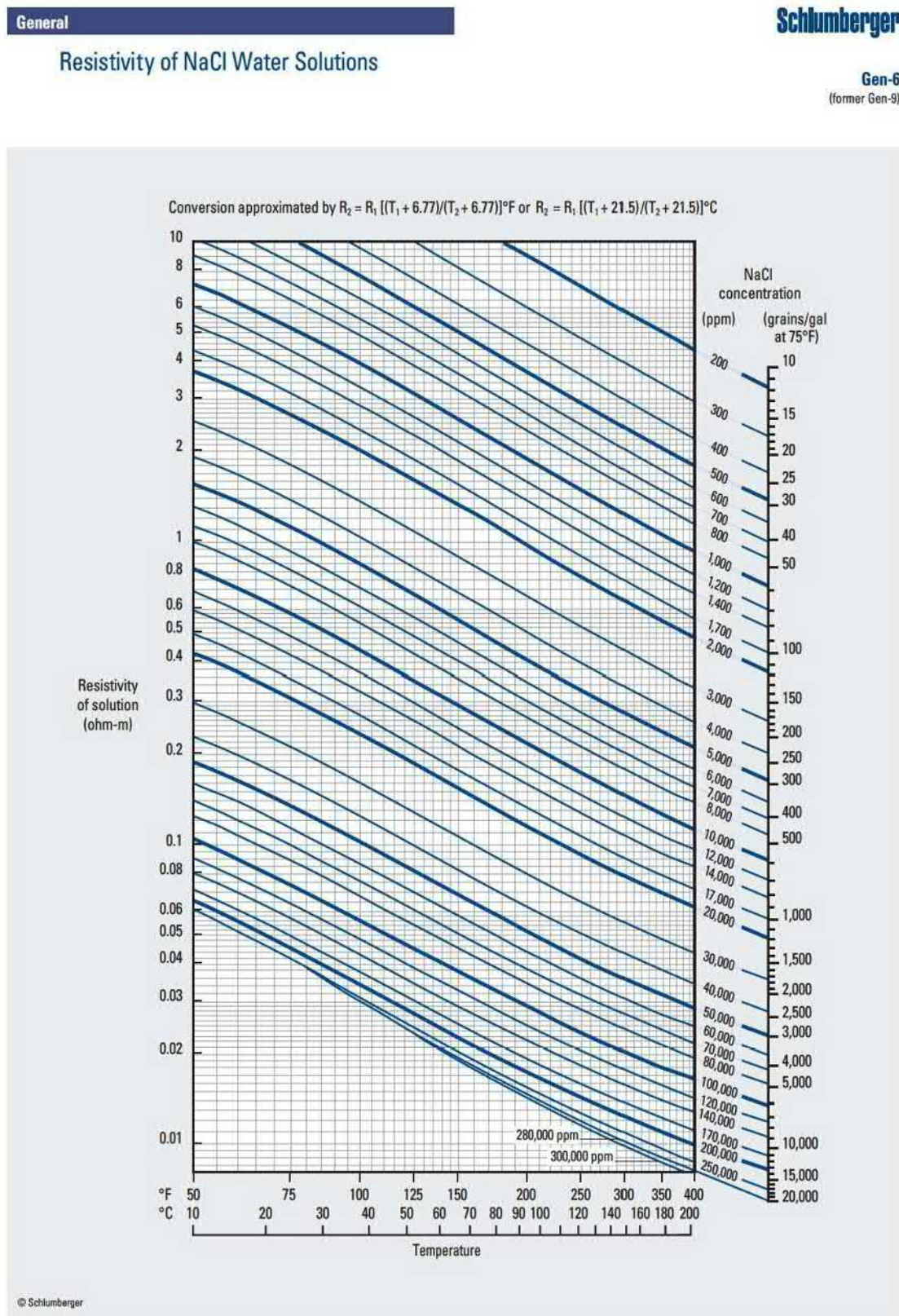


Рис. 7. Палетка Шлюмберже «Resistivity of NaCl Water Solutions» [2]

Для того чтобы не выходить из представленных выше погрешностей для формулы 5 приводятся следующие ограничения:

1. Ограничения по минерализации. Дело в том, что эксперименты выполнены с минерализацией от 0.1 до 300 г/л и, соответственно, нельзя утверждать, что расчет минерализации меньше 0.1 г/л или больше 300 г/л будет определен с теми же погрешностями, о которых говорилось ранее в тексте.

2. Ограничение по температуре. В ходе тестирования расчета по формуле 5 было выявлено, что при минерализации до 196 г/л температурный диапазон сопротивлений находится в пределах 4 - 64 °С, при минерализации от 196 до 216 г/л температурный диапазон составляет 4 - 63 °С, при минерализации от 216 до 238 г/л температурный диапазон 4 - 62 °С, при минерализации от 238 до 262 г/л температурный диапазон 4 - 61 °С, при минерализации от 262 до 287 г/л температурный диапазон 4 - 60 °С, при минерализации от 287 до 314 г/л температурный диапазон 4 - 59 °С.

3. Ограничение по сопротивлению. Исходя из пункта 1 при сопротивлениях от 0 до 10 кОм расчет минерализации является целесообразным и допустимым к оценке минерализации. Сопротивления выше 10 кОм обозначают концентрацию близкую 0 г/л.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГТ СО РАН №0331-2019-0015.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гак Е.З. Магнитные поля и водные электролиты – в природе, научных исследованиях, технологиях. СПб.: Элмор, 2013. – 536 с.
2. Log Interpretation Charts – Houston: 3750 BriarparkDr, 2013.
3. Методические указания по применению кондуктометрического контроля для ведения водного режима электростанций МУ 34-70-114-85 – Москва: СПО Союзтехэнерго, 1986. – 37 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов – Москва: Наука, 1968 – 382 с.

REFERENCES

1. Gak E.Z. Magnitnye polya i vodnye elektrolity – v prirode, nauchnyh issledovaniyah, tekhnologiyah. SPb.: Elmor, 2013. – 536 s.
2. Log Interpretation Charts – Houston: 3750 BriarparkDr, 2013.
3. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu konduktometricheskogo kontrolya dlya vedeniya vodnogo rezhima elektrostancij MU 34-70-114-85 – Moskva: SPO Soyuztekhenenergo, 1986. – 37 s.
4. YAvorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike dlya inzhinerov i studentov vuzov – Moskva: Nauka, 1968 – 382 s.

© А. К. Маништейн, П. А. Соколов, 2021

КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА В АППАРАТУРЕ ЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Александр Константинович Маништейн

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

Евгений Сергеевич Хлыстун

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20 к4, студент, e-mail: zheka.hlistyn@gmail.com

Разработан способ коррекции температурного дрейфа данных во время работы геофизического прибора наземного индукционного частотного зондирования. Прибор рассматривается как измеритель кажущегося удельного электросопротивления проводящего полупространства. В процессе изготовления аппаратуры экспериментально измеряется температурный коэффициент сопротивления (ТКС) устройства для каждой частоты в отдельности. ТКС устройства применяется для приведения величин измеренного сопротивления к некоторой нормализованной температуре, например, 20 °С. Результаты выполненных испытаний обработаны и систематизированы с помощью Microsoft Excel. Построены графики зависимости сопротивления от температуры. Разработанный метод исправления температурного воздействия предназначен для повышения точности обработки данных, получаемых с помощью аппаратуры, функционирующей в условиях изменяющейся температуры окружающей среды.

Ключевые слова: коррекция температурного дрейфа, температурный коэффициент сопротивления, измерения удельного электрического сопротивления грунта, геофизическая аппаратура

CORRECTION OF THE TEMPERATURE DRIFT IN THE GEOPHYSICAL INSTRUMENT OF GROUND-BASED INDUCTION FREQUENCY SOUNDING

Alexander K. Manshtein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Dr. Sc., Leading Researcher, e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

Yevgeniy S. Khlystun

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Prospect 20, k4, student, e-mail: zheka.hlistyn@gmail.com

A technique for correcting the temperature drift in the measurements of the geophysical instrument of ground-based induction frequency sounding has been developed. The device is considered as a measure of the apparent electrical resistivity of the conducting half-space. In the process of manufacturing the equipment, the temperature coefficient of resistance (TCR) of the device is experimentally measured for each frequency separately. The TCR of the device is used to bring the measured resistance values to a certain normalized temperature, for example, 20 °C. The results of the tests performed were processed and systematized using Microsoft Excel. The graphs of the dependence of resistance on temperature are built. The developed methods are intended to improve the accuracy of

data processing obtained with the help of equipment operating under conditions of changing ambient temperatures.

Keywords: correction of temperature drift, temperature coefficient of resistance, measurements of electrical resistivity of soil, geophysical equipment

Введение

Аппаратурно-программные комплексы индукционного частотного электромагнитного зондирования являются перспективными инструментами для геофизических исследований вблизи поверхности. Они обеспечивают бесконтактные, неинвазивные и портативные измерительные функции. Применения варьируются от определения засоленности почв, разведки полезных ископаемых, анализа содержания глины и воды, до оценки органического вещества в почвоведении [1]. Такие приборы состоят из одного или нескольких приёмных блоков с различным, но фиксированным расстоянием до передающего блока, что позволяет комплексу воспринимать различные диапазоны глубин подповерхностного пространства примерно в 1,5 раза больше, чем расстояние между приёмником и передатчиком [2]. Измеряемые значения, кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС), дрейфуют из-за тепловых эффектов в приёмниках и передатчике, и тем самым препятствуют количественному анализу истинного распределения электропроводности подповерхностного слоя. Ошибочные отклонения связаны с изменяющейся во времени окружающей температуры [3, 4].

Прибор измеряет разность потенциалов в антенном устройстве (ЭДС), после чего ЭДС нормируется на значение тока в генераторе. Следовательно, размерность измеряемой величины равна $[V/A]$ и сигнал пропорционален сопротивлению $[Om]$.

Исследованию влияния температуры на измеряемые данные в подобной аппаратуре посвящены работы, например: Robinson D.A. и соавт. [4], Xihe Tan [5], Abdu H и соавт. [6], Huang J и соавт. [7]. В работе Abdu H и соавт. говорится, что под влиянием условий испытаний с переменной температурой оба прибора DUALEM-1S и EM38-DD показывали более высокую погрешность (10-40 %) при низких электропроводностях грунта (≤ 0.02 См/м), в то время как ошибка становилась менее значительной ($\sim 5\%$) при более высокой электропроводимости (> 0.1 См/м), при изменении температуры на $20^\circ C$ [6].

Экспериментальное изучение авторами данной статьи температурного дрейфа характеристик блоков и узлов аппаратуры не выявило наличия сильно зависимых от температуры характеристик отдельных элементов. Например, в приёмной катушке с ферритовым сердечником диаметром 50 мм и числом витков 50 в интервале температур от $20^\circ C$ до $60^\circ C$ зарегистрированы изменения собственной резонансной частоты на 0.08 %. Но записываемый измеряемый сигнал прибора зависит от температуры.

Целью работы является разработка и применение физико-математического обеспечения коррекции температурного дрейфа отклика аппаратуры индукционного частотного зондирования АЭМП-14 [1]. Метод коррекции основан на:

1. Определении по экспериментальным данным для каждого экземпляра аппаратуры температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКС) для каждой частоты в отдельности;
2. Измерении текущих температур внутри корпуса прибора с погрешностью до ± 0.5 °С.
3. Выполнении во время работы термокомпенсации измеряемых данных приведением их к значениям при температуре + 20 °С;

Экспериментально установлено, что для разных уровней полезного сигнала данной частоты ТКС достаточно постоянен.

Температурная зависимость сигнала аппаратуры АЭМП-14

Эксперименты выполнялись в зимних условиях. Прибор выносили из тёплого помещения на улицу, неподвижно устанавливали над грунтом с УЭС не менее 100 Ом·м на высоте 1,5 м и записывался отклик от верхнего подповерхностного слоя. Пример отклика для частоты №2 (3088 Гц) приведён на рис.1, где по оси абсцисс указана температура прибора через 1 °С, по оси ординат - кажущееся сопротивление грунта в условных единицах.

Анализ экспериментальных данных (см. рисунок 1) показывает, что аппроксимированный сигнал в антенне, нормированный на ток генератора, имеет линейную зависимость от температуры.

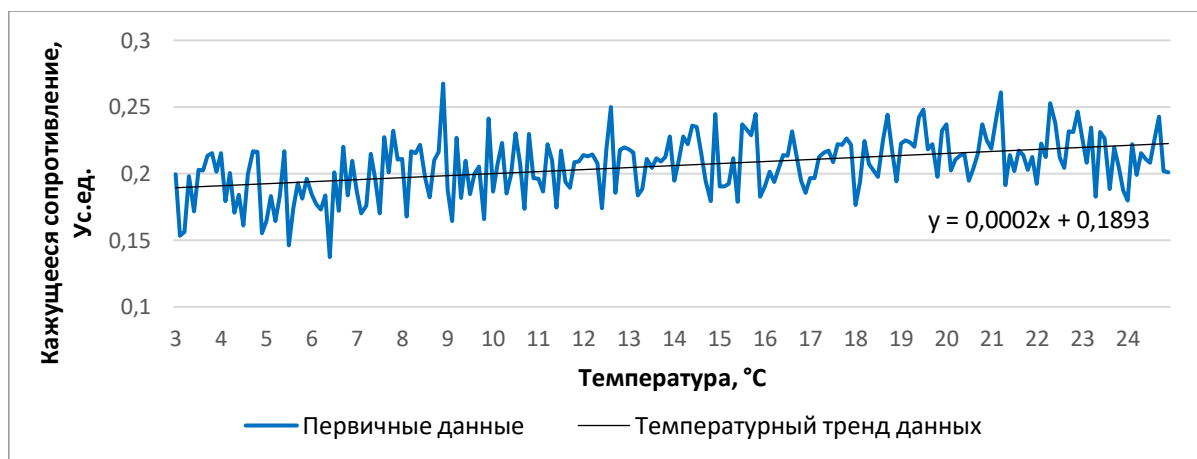


Рис. 1. Модуль комплексного сигнала ε / I , частота №2 и тренд.

Для компенсации температурного дрейфа применим тригонометрические свойства уравнения прямой с угловым коэффициентом [8, 9]

$$y = k \cdot x + b, \quad (1)$$

где b – расстояние от начала координат до пересечения оси ординат и прямой;
 k – угловой коэффициент прямой.

Распишем угловой коэффициент прямой:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (2)$$

где: $\Delta y = y_2 - y_1$;

$\Delta x = x_2 - x_1$.

Теперь, используя записанное ранее, проведём аналогию с нашими данными.

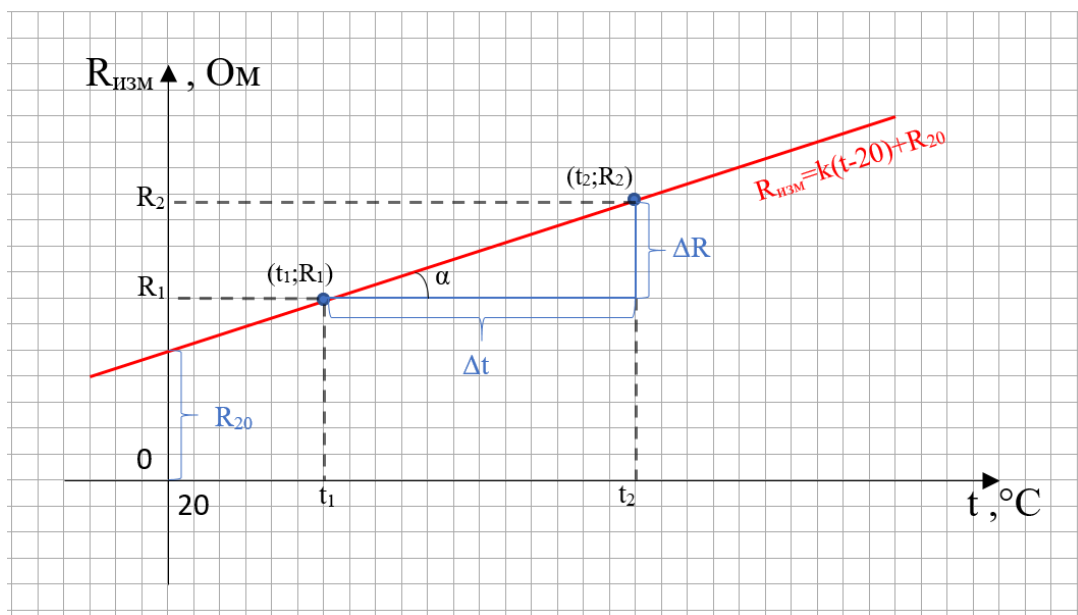


Рис. 2. Схематичное изображение тренда измеряемого сопротивления при изменении температуры окружающей среды

Целью компенсации температурного дрейфа является приведение измерений к какой-то одной температуре. Так как в АЭМП-14 много радиокомпонентов, которые вносят свой вклад в температурную зависимость сигнала, будем рассматривать компенсацию для всей аппаратуры. В таком случае нормальной температурой работы аппаратуры будем считать 20 °С, так как при этой температуре все радиодетали в приборе работают в нормальном режиме.

Поскольку используется 20 °С, а не 0 °С, то это нужно учесть при составлении уравнения. Ось ординат будет пересекать абсциссу не в точке ноль, а в точке равной 20. Это показано на рис. 2.

Запишем уравнение температурной зависимости сигнала аппаратуры используя аналогию с уравнением (1) и учитывая поправки, описанные выше:

$$R_{\text{изм}} = k \cdot (t - 20) + R_{20}, \quad (3)$$

где: $R_{изм}$ – измеренное сопротивление прибором;
 k – угловой коэффициент прямой;
 t – температура на момент измерения (в приборе);
 R_{20} – сигнал при нормальной температуре.

Для нахождения углового коэффициента, возьмём две произвольные точки на прямой. Опустив перпендикуляр на оси, определим координаты, которые будут соответствовать значениям (R_1, t_1) и (R_2, t_2) . После нахождения подставляем в уравнение (4).

Распишем угловой коэффициент прямой, ссылаясь на уравнение (2):

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t}, \quad (4)$$

где: $\Delta R = R_2 - R_1$;

$\Delta t = t_2 - t_1$.

Подставим (4) в (3):

$$R_{изм} = \frac{\Delta R}{\Delta t} \cdot (t - 20) + R_{20} \quad (5)$$

Умножим и разделим левую часть суммы на R_{20} , чтобы в дальнейшем избавиться от зависимости уровня сигнала:

$$R_{изм} = \frac{\Delta R}{\Delta t} \frac{R_{20}}{R_{20}} \cdot (t - 20) + R_{20}. \quad (6)$$

Выделим часть уравнения и введём новое обозначение:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} \frac{1}{R_{20}} = \alpha, \quad (7)$$

где: α – известный в технике температурный коэффициент сопротивления (ТКС) $\left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$.

Произведём замену (7) в (6) и вынесем R_{20} :

$$R_{изм} = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)]. \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что измеряемый сигнал состоит из сигнала при нормальной температуре и компоненты, зависимой от температуры.

Таким образом, величина сигнала, приведённая к нормальной температуре равна:

$$R_{20} = R_{изм} / [1 + \alpha \cdot (t - 20)] \quad (9)$$

При данном решении, происходит поворот прямой относительно точки при 20 °С, за счёт чего выполняется компенсация температурного дрейфа.

Используя уравнение (9), выполним компенсацию для ранее представленного примера на рис. 1 и представим несколько других результатов применения данного способа температурной компенсации на рисунках 3 и 4.

Отметим, что для температурной компенсации предварительно необходимо экспериментально определить температурный коэффициент сопротивления (α) аппаратуры для каждой частоты в отдельности.

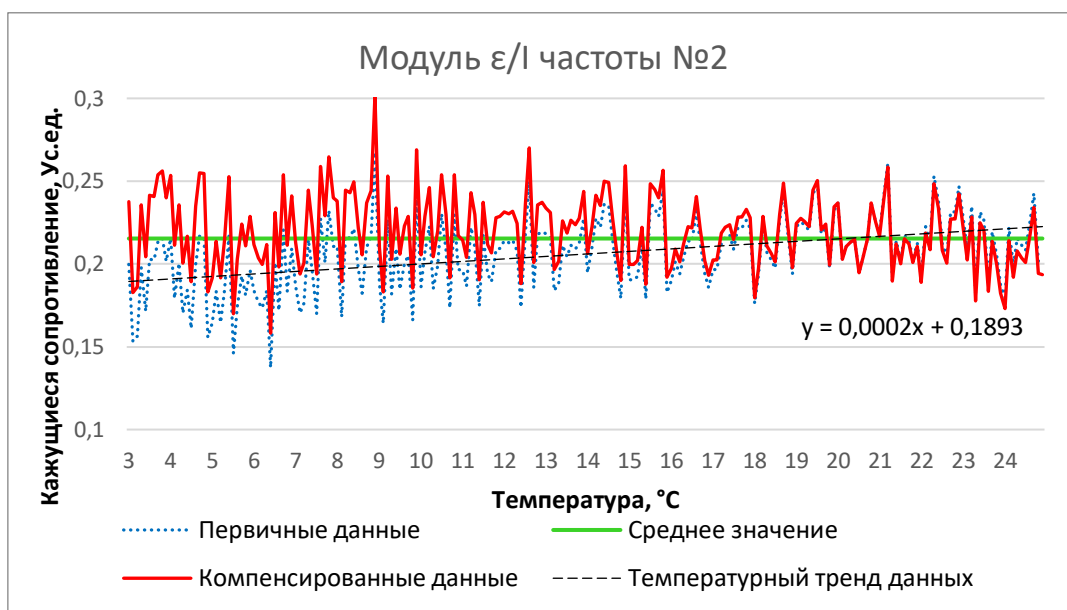


Рис. 3. Коррекция температурной зависимости измерений.
Частота 3088 Гц, ТКС = $9,4 \cdot 10^{-3}$ (1/°C)

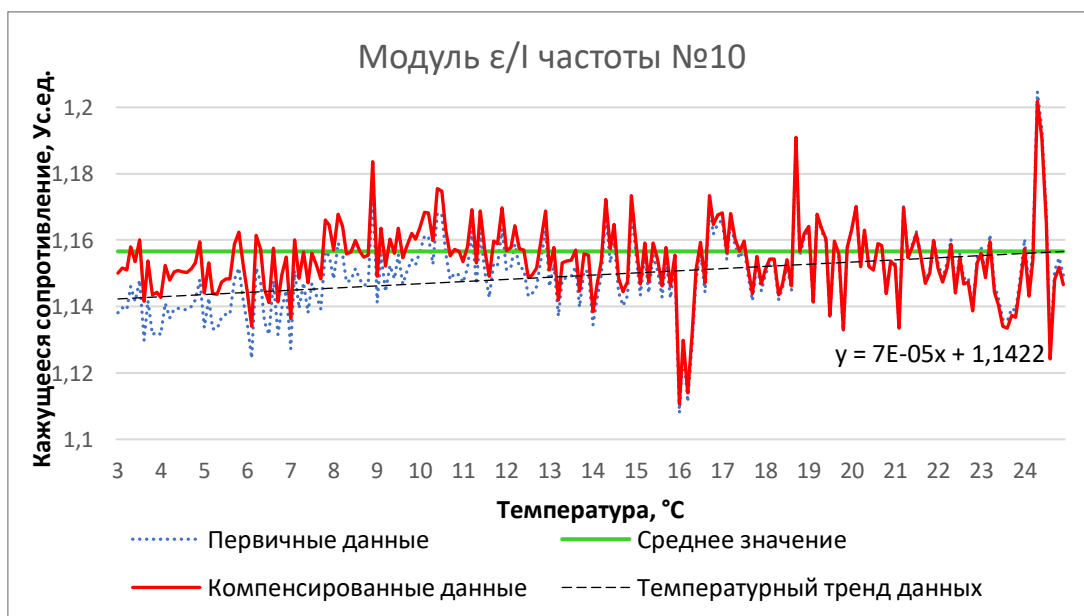


Рис. 4. Коррекция температурной зависимости измерений.
Частота 27779 Гц, ТКС = $0,61 \cdot 10^{-3}$ (1/°C)

Обозначение линий:

синяя пунктирная – измеренный сигнал, нормированный на ток без температурной компенсации - первичные данные;

чёрная пунктирная – линия тренда, проведённая по средним значениям первичных данных;

красная – данные приведённые к 20 °С, полученные с помощью уравнения (9);

зелёная – линия среднего значения сигнала, при 20 °С.

Алгоритм коррекции температурного дрейфа в аппаратуре

В аппаратурно-программном комплексе наземного индукционного частотного зондирования необходимо ввести новый элемент системы, обеспечивающий постоянную связь измерителя температуры прибора с блоком обработки данных глобальной управляющей программы. Постоянный режим связи позволяет в реальном масштабе времени проводить и обрабатывать данные, если режим коррекции включён.

При изготовлении прибора необходимо подготовить базу данных величин ТКС на каждой рабочей частоте.

Возможный алгоритм коррекции температурного дрейфа:

1) на ПК в программе EMS добавится функция включения и отключения температурной компенсации;

2) с датчика температуры (установленного внутри аппаратуры) приходит сигнал на микроконтроллер, указывающий температуру в данный момент времени;

3) при включённом режиме компенсации, микроконтроллер записывает данные с учётом температурной компенсации, то есть переводит каждое измеренное значение на значение при 20 °С;

4) посредством связи Bluetooth полученные данные передаются на ПК.

Заключение

Разработан способ коррекции температурного дрейфа для геофизического прибора наземного индукционного частотного зондирования АЭМП-14 [1]. Определён характер зависимости измеряемого УЭС от температуры, выведена формула, описывающая данную зависимость, рассчитан температурный коэффициент сопротивления для каждой частоты. Способ основан на компенсации температурного дрейфа отклика по рассчитанным значениям ТКС для используемых частот.

Показано, что относительное изменение измеряемого сопротивления от номинального значения при изменении температуры окружающей среды характеризует зависимость полезного сигнала геофизического прибора (кажущегося электрического сопротивления) от его текущей температуры и измеряется в градусах Цельсия в минус первой степени ($1/^{\circ}\text{C}$). Экспериментально установлен низкий уровень величины ТКС измеряемого сигнала, но он всегда больше нуля.

Данная методика позволяет повысить точность измерений кажущегося удельного электросопротивления среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН №0331-2019-0015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манштейн А.К. Аппаратурное и методическое обеспечение наземного электромагнитного индукционного многочастотного зондирования: Диссертация д-ра. тех. наук. - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2012. - 182 с.
2. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 6. - С. 571-579.
3. Lavoué F, van der Kruk J, Rings J, Andre F, Moghadas D, Huisman J A, Lambot S, Weiermüller L, Vanderborght L and Vereecken H 2010 Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography Near Surf. Geophys. V. 8 P. 553-561.
4. Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M. and Shouse P. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38 // Soil Sci. Soc. Am. - 2004 - J. 68 – P. 339–345.
5. Xihe Tan Development of Electromagnetic Induction Measurement and Inversion Methods for Soil Electrical Conductivity Investigations // Schriften des Forschungszentrums Jülich – 2020 – V. 62.
6. Abdu H, Robinson D A and Jones S B 2007 Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments Soil Sci. Soc. Am. J. 71 P. 189– 196.
7. Huang J, Minasny B, Whelan B M, McBratney M B and Triantafyllis J 2017 Temperature-dependent hysteresis effects on EM induction instruments: An example of single-frequency multi-coil array instruments Comput. Electron. Agr. 132 P. 76-85.
8. Прохоров А.М. Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] // М. - 1969—1978 - 3-е изд.
9. Привалов И.И. Аналитическая геометрия // М.: Наука - 1966. – 46 - 51 с.

REFERENCES

1. Manshtejn A.K. Apparaturnoe i metodicheskoe obespechenie nazemnogo elektromagnitnogo indukcionnogo mnogochastotnogo zondirovaniya: - Novosibirsk: IGGP SBRAS, 2012. - 182 s.
2. Manshtejn A.K., Panin G.L., Tikunov S.YU. Apparatura chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya «EMS» // Geologiya i geofizika. - 2008. - Т. 49. - № 6. - S. 571-579.
3. Lavoué F, van der Kruk J, Rings J, Andre F, Moghadas D, Huisman J A, Lambot S, Weiermüller L, Vanderborght L and Vereecken H 2010 Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography Near Surf. Geophys. Vol. 8 P. 553-561.
4. Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M. and Shouse P. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38 // Soil Sci. Soc. Am. - 2004 - J. 68 – P. 339–345.
5. Xihe Tan Development of Electromagnetic Induction Measurement and Inversion Methods for Soil Electrical Conductivity Investigations // Schriften des Forschungszentrums Jülich – 2020 – V. 62.

6. Abdu H, Robinson D A and Jones S B 2007 Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments Soil Sci. Soc. Am. J. 71 P. 189– 196.
7. Huang J, Minasny B, Whelan B M, McBratney M B and Triantafilis J 2017 Temperature-dependent dysteresis effects on EM induction instruments: An example of single-frequency multi-coil array instruments Comput. Electron. Agr. 132 P. 76-85.
8. Prohorov A.M. Bol'shaya sovetskaya enciklopediya : [v 30 t.] // М. - 1969—1978 - 3-e izd.
9. Privalov I.I. Analiticheskaya geometriya // М.: Nauka - 1966. – 46 - 51 s.

© А. К. Манитейн, Е. С. Хлыстун, 2021

СВЯЗЬ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ЯМР-ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВОГО ШЛАМА С ЕГО ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Андрей Алексеевич Мезин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, младший научный сотрудник, тел. (923)707-27-11, e-mail: MezinAA@ipgg.sbras.ru

Мария Йоновна Шумская

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, тел. (913) 482-41-37, e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Никита Александрович Голиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель кафедры геологии месторождений нефти и газа; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, доцент кафедры геоинформационных систем, тел. (383) 363-80-31, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

В работе приведены результаты экспериментальных исследований диэлектрических и ЯМР-характеристик образцов бурового шлама. Показано, как меняется распределение флюида в поровом пространстве на разных этапах экстракции и насыщения. Показана возможность оценки степени насыщения образцов при совместной интерпретации спектров диэлектрических и ЯМР-характеристик.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, релаксационные характеристики, буровой шлам, ядерный магнитный резонанс

RELATIONSHIP OF COMPLEX DIELECTRIC PERMEABILITY AND NMR CHARACTERISTICS OF DRILL CUTTINGS WITH ITS RESERVOIR PROPERTIES

Andrey A. Mezin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Junior Researcher, tel. (923)707-27-11, e-mail: MezinAA@ipgg.sbras.ru

Mariya Y. Shumskayte

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, PhD, Senior Researcher, tel. (913)482-41-37, e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Nikita A. Golikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, PhD, Senior Researcher; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, st. Pirogova 2, Senior Lecturer, Department of Geology of Oil and Gas Fields; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, Associate

The paper presents the results of experimental studies of the dielectric and NMR characteristics of drill cuttings. It is shown how the fluid distribution in the pore space changes at different stages of extraction and saturation. It is shown that it is possible to estimate the degree of saturation of samples by sequential interpretation the spectra of the dielectric and NMR characteristics.

Keywords: dielectric permittivity, relaxation characteristics, drill cuttings, nuclear magnetic resonance

Особенности диэлектрических свойств нефтенасыщенного шлама обусловлены наличием адсорбционных пленок на границе раздела фаз, образованных, как правило, из высокомолекулярных полярных соединений углеводородов (УВ) – смол и асфальтенов. Адсорбционные пленки на поверхности гранул горных пород и капель воды увеличивают значение диэлектрической проницаемости всей системы [1]. Некоторые авторы изучали процессы образования и влияния на диэлектрические параметры системы разрушения адсорбционной пленки нефти на границах раздела вода-нефть [2]. При этом значение реальной части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) растет во время образования адсорбционной пленки и не увеличивается с ростом толщины пленки [3].

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – мощный физический эффект, широко использующийся в различных областях научных исследований для изучения свойств, структуры и состояния вещества. Метод ЯМР на сегодняшний день успешно применяется в крупнейших нефтегазовых компаниях и ведущих научных лабораториях мира для изучения фильтрационно-емкостных и физико-химических свойств горных пород и насыщающих их флюидов. Популярным становится комплексирование ЯМР-метода с методами, отличающимися разной чувствительностью к определенным характеристикам породы и пластового флюида, что позволяет получить дополнительную информацию об изучаемом образце при совместной интерпретации результатов. К таким методам можно отнести диэлектрическую спектроскопию. При изучении флюидонасыщенной горной породы значительную роль в формировании диэлектрической проницаемости играют поляризационные процессы, происходящие на границе порода-флюид. Релаксационные процессы, действующие на этих поверхностях, в значительной мере определяют и ядерно-магнитные свойства изучаемых пород.

При разработке нефтяных и газовых месторождений самой важной информацией о пласте-коллекторе являются его фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), детальный анализ которых проводится в лабораторных условиях на образцах керна. Достоверность и представительность полученной петрофизической информации зависит от качества отобранного керна. На интервалах пласта-коллектора без отбора керна необходимую информацию о ФЕС могут дать исследования, проведенные на буровом шлама. Одним из методов оперативного изучения ФЕС бурового шлама является ЯМР-релаксометрия, которая хорошо зарекомендовала себя при изучении петрофизических параметров

образцов пород-коллекторов произвольной формы и размера [4-10]. Эффективность использования метода ЯМР для исследования шлама определяется тем, что результаты измерений в этом случае практически не зависят от формы и размеров исследуемых образцов [11].

Таким образом, целью работы является расширение возможностей применения методов ЯМР-релаксометрии и диэлектрической спектроскопии на примере совместной интерпретации данных этих методов для оперативного получения петрофизической информации о свойствах и структуре порового пространства нефтенасыщенного бурового шлама.

Экспериментальные ЯМР и диэлектрические исследования образцов шлама

Объектом исследования стали 10 образцов бурого шлама с разных глубин (2480-3100 м), на которых поочередно проводились ЯМР и диэлектрические исследования на неизмененных, промытых и насыщенных образцах. Такая последовательность позволила исследовать влияние на диэлектрические и ЯМР-характеристики насыщающего флюида и оценить открытую пористость путем взвешивания образцов после высушивания и после насыщения керосином. Спектры по временам поперечной релаксации показывают изменение коэффициента пористости и перераспределение пустотного пространства бурового шлама на каждом этапе экстракции (рис. 1).

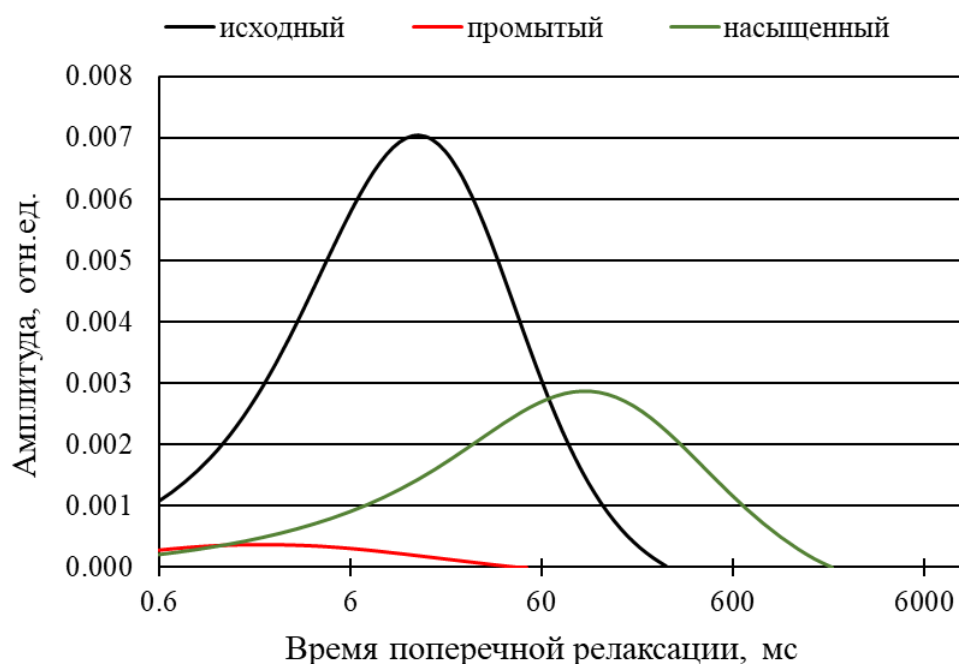


Рис. 1. Спектры по временам поперечной релаксации бурового шлама на разных этапах экстракции и насыщения

На графиках видно, что спектр исходного образца характеризуется наибольшей амплитудой, т.е. в образце содержится наибольшее количество флюида,

который занимает не только поры, но и каналы их соединяющие. Холодная экстракция хлороформом с последующей сушкой образца сопровождается уменьшением амплитуды, ЯМР-пористости и увеличением диапазона времен T_2 . Спектр сухого шлама имеет незначительную амплитуду и очень короткие времена поперечной релаксации, характеризующие остаточный глинисто-связанный флюид. Последующее насыщение бурового шлама керосином приводит к изменению времен релаксации и естественному увеличению амплитуды и ЯМР-пористости, поскольку заполняется все освободившееся после промывки хлороформом пустотное пространство. В керосинонасыщенных образцах бурового шлама большая часть флюида находится в свободном состоянии, глинисто-связанной флюида незначительное количество. Вышеописанные на примере образца №3 закономерности аналогичны для всех образцов коллекции.

По результатам диэлектрических измерений, представленных на рис. 2 видно, что значения ДП исходного состояния, равное 2 отн.ед. на 1 кГц снижаются до 1,2 отн.ед. на промытом образце, а при насыщении керосином увеличиваются до 3,5 отн.ед., что превышает значение ДП исходного состояния. Это объясняется тем, что после холодной экстракции хлороформом часть смеси пластового флюида и бурового раствора вымывается из порового пространства, за исключением очень мелких и закрытых пор – в результате наблюдаем ненулевой сигнал от промытого образца.

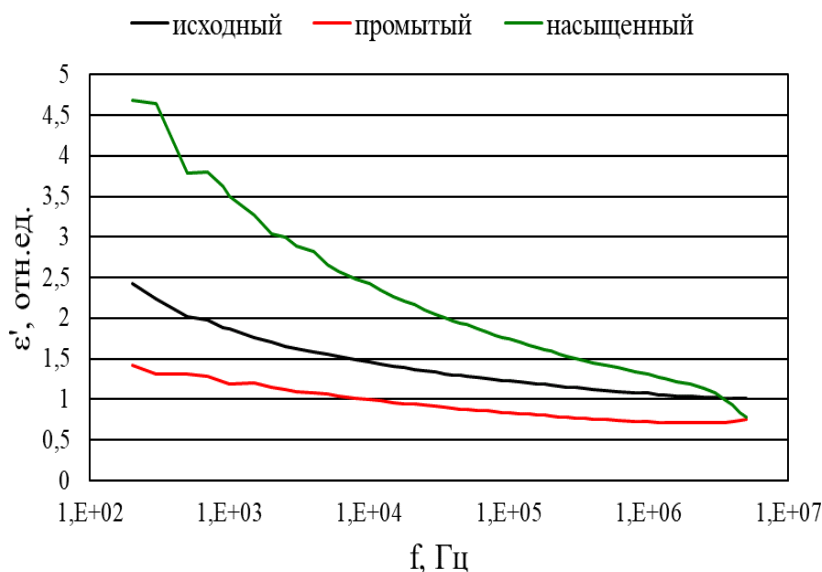


Рис. 2. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости бурового шлама от частоты на разных этапах экстракции и насыщения

ДП насыщенного керосином образца выше, чем у исходного, что, вероятно связано с разной степенью насыщения шлама. После промывки освобождается большая часть пустотного пространства, которую затем и заполняет керосин, приводя к увеличению значений ДП. Закономерности, описанные выше,

соответствуют образцам №2, 5-10. Значения ДП образцов №3 и 4 в исходном состоянии выше, чем у керосинонасыщенного, что можно объяснить наличием нефти на поверхности образцов, за счет чего и возрастает значение ДП в исходном состоянии. Образец №1 имеет примерно равные значения ДП в начальном и насыщенном керосином состояниях, отличие до 10%, это объясняется тем, что в начальном и в керосинонасыщенном состоянии насыщение флюидом одинаковое, поскольку керосин и нефть имеют примерно равные значения ДП.

В результате проведенных ЯМР-исследований образцов бурового шлама определены их фильтрационно-емкостные свойства. По спектрам диэлектрической проницаемости образцов на разных этапах экстракции можно судить о степени насыщения флюидом и о распределении флюида в поровом пространстве образца. Зная значения ДП для промытого образца и полностью насыщенного керосином, можно рассчитать значение коэффициента насыщения неизмененного состояния. Спектр диэлектрической проницаемости сухого шлама, в порах которого нет флюида, не имеет дисперсию (величина ДП не меняется с увеличением частоты), и таким образом можно судить о наличии флюида в мелких закрытых порах. Превышение значения ДП неизмененного образца над значением ДП керосинонасыщенного образца свидетельствует о 100%-м насыщении нефтью исходного образца и наличием нефти на поверхности зерен.

На ЯМР-характеристики, в частности на средне-логарифмическое время поперечной релаксации, влияет вязкость флюида (чем она выше, тем меньше времени релаксации), поэтому при насыщении промытого образца спектр смещается в область больших времен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р. Р. Исследование диэлектрических и реологических характеристик водонефтяных эмульсий // Теплофизика высоких температур. - 2008. - Т. 46. - №. 5. - С. 792-794.
2. Зиннатуллин Р. Р., Фатхуллина Ю. И., Камалтдинов И. М. Исследование образования адсорбционной пленки методом высокочастотной диэлектрической спектроскопии // Теплофизика высоких температур. - 2012. - Т. 50. - №. 2. - С. 316-316.
3. Cosenza P. et al. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - 2008. - Т.113. - № B8. - 9 p.
4. Аксельрод С.М. Современные тенденции в геолого-технологических исследованиях, проводимых в процессе бурения скважин (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. - 2015. - №6. - С. 77-110.
5. Белорай Я.Л., Кононенко И.Я. Использование ядерно-магнитных исследований для геоинформационного обеспечения строительства скважин // Каротажник. - 2006. - №1. - С. 53-65.
6. Мезин А.А., Шумскайте М.Й., Голиков Н.А., Бурухина А.И. Связь комплексной диэлектрической проницаемости нефти с ее физико-химическими свойствами и ЯМР-характеристиками // Геофизические технологии. - 2019. - №4. - С. 24-34.
7. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алеврито-глинистых образцов // Геология и геофизика. - 2016. - Т.57. - № 10. - С. 1911-1918.
8. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Бортникова С.Б., Харитонов А.Н., Пермиков В.С. Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважины, методом ЯМР-релаксометрии //

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2017. - Т.328. - № 2. - С. 59-66.

9. Howard J.J. Quantitative estimates of porous media wettability from proton NMR measurements // Magnetic Resonance Imaging. - 1998. - Vol.16. - №5. - P. 529-533.

10. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving Petrophysical Interpretation with Wide-Band Electromagnetic Measurements // SPE Journal. - 2008. - Vol.13. - Is.2. - P. 205-215.

11. Вавилин В.А., Галиев Т.Р., Кунакасов А.А., Романов Ю.К., Сорокина Е.В. Опыт ЯМР-исследований структуры порового пространства пород из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы - 2015. - С. 259-274.

REFERENCES

1. Kovaleva L.A., Minnigalimov R.Z., Zinnatullin R. R. Issledovanie dielektricheskikh i reologicheskikh harakteristik vodoneftyanyh emul'sij // Teplofizika vysokih temperatur. - 2008. - Т. 46. - №. 5. - S. 792-794.

2. Zinnatullin R. R., Fathullina YU. I., Kamaltdinov I. M. Issledovanie obrazovaniya adsorbtsionnoj plenki metodom vysokochastotnoj dielektricheskoy spektrometrii // Teplofizika vysokih temperatur. - 2012. - Т. 50. - №. 2. - S. 316-316.

3. Cosenza P. et al. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - 2008. - Т.113. - № B8. - 9 p.

4. Aksel'rod S.M. Sovremennye tendencii v geologo-tehnologicheskikh issledovaniyakh, provodimyyh v processe bureniya skvazhin (po materialam zarubezhnoj literatury) // Karotazhnik. - 2015. - №6. - S. 77-110.

5. Beloraj YA.L., Kononenko I.YA. Ispol'zovanie yaderno-magnitnyh issledovaniy dlya geoinformacionnogo obespecheniya stroitel'stva skvazhin // Karotazhnik. - 2006. - №1. - S. 53-65.

6. Mezin A.A., SHumskajte M.Y., Golikov N.A., Buruhina A.I. Svyaz' kompleksnoj dielektricheskoy pronicaemosti nefti s ee fiziko-himicheskimi svojstvami i YAMR-harakteristikami // Geofizicheskie tekhnologii. - 2019. - №4. - S. 24-34.

7. SHumskajte M.Y., Glinskih V.N. Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti YAMR-harakteristik ot udel'noj poverhnosti i udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya peschano-alevrito-glinistyyh obrazcov // Geologiya i geofizika. - 2016. - Т.57. - № 10. - S. 1911-1918.

8. SHumskajte M.Y., Glinskih V.N., Bortnikova S.B., Haritonov A.N., Permyakov V.S. Laboratornoe izuchenie zhidkostej, vynosimyyh iz skvazhiny, metodom YAMR-relaksometrii // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. - 2017. - Т.328. - № 2. - S. 59-66.

9. Howard J.J. Quantitative estimates of porous media wettability from proton NMR measurements // Magnetic Resonance Imaging. - 1998. - Vol.16. - №5. - P. 529-533.

10. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving Petrophysical Interpretation with Wide-Band Electromagnetic Measurements // SPE Journal. - 2008. - Vol.13. - Is.2. - P. 205-215.

11. Vavilin V.A., Galiev T.R., Kunakasov A.A., Romanov YU.K., Sorokina E.V. Opyt YAMR-issledovaniy struktury porovogo prostranstva porod iz mestorozhdenij s trudnoizvlekaemymi zapasami // Petrofizika slozhnyh kolektorov: problemy i perspektivy - 2015. - S. 259-274.

© А. А. Мезин, М. Й. Шумскайте, Н. А. Голиков, 2021

ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЗОНДОМ В ТОНКОСЛОИСТЫХ МОДЕЛЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Игорь Владиславович Михайлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Марина Николаевна Никитенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 6, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Проведено трёхмерное конечно-разностное моделирование электромагнитных сигналов каротажного зонда с тороидальными катушками в тонкослоистых моделях на базе электролитического бака. По результатам моделирования установлены толщины и удельные электрические сопротивления прослоев, при которых сигналы зонда в тонкослоистой и эквивалентной ей макроанизотропной модели совпадают в пределах заданной погрешности.

Ключевые слова: тороидальная катушка, численное моделирование, удельное электрическое сопротивление, тонкая слоистость, физический эксперимент

SUBSTANTIATION OF PHYSICAL EXPERIMENTS WITH ELECTROMAGNETIC TOOL IN THIN-LAYER MODELS SUBSEQUENT TO NUMERICAL SIMULATION RESULTS

Igor V. Mikhaylov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Marina N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We performed 3D finite-difference simulation of electromagnetic signals from the logging tool with toroidal coils in electrolytic-tank-based thin-layer models. Following the simulation results, we elucidated the thicknesses and resistivities of the interlayers, for which the signals in a thin-layer and the equivalent macroanisotropic model coincide within the specified error.

Keywords: toroidal coil, numerical simulation, electrical resistivity, thin layering, physical experiment

Данное исследование направлено на развитие электромагнитных скважинных зондирований за счёт применения тороидальных катушек в качестве источников и приёмников сигналов [1]. Ранее выполнено математическое обоснование каротажного электромагнитного зонда с тороидальными катушками [2], созданы специализированные программно-алгоритмические средства конечно-разностного моделирования, обработки и инверсии данных [3, 4], разработаны подходы к интерпретации [5], показана возможность изучения тонкослоистых электрически анизотропных коллекторов Приобского нефтяного месторождения [6].

Основная цель исследования – обосновать численным моделированием физические эксперименты с каротажным зондом с тороидальными катушками в тонкослоистых макроанизотропных моделях, которые предполагается соорудить в электролитическом баке ИНГГ СО РАН (рис. 1). Тонкая слоистость будет достигнута чередованием имитаторов пористой среды и прослоев электролита, разделённых компактными непроводящими проставками. Имитаторы пористой среды будут представлены наборами склеиваемых или спекаемых цилиндрических гранул из полиэтилена высокого давления ($d = 0.7$ мм, $h = 2.2$ мм, $\rho = 0.910\text{--}0.967$ г/см³). Пористость имитатора может изменяться в пределах 10–30%, УЭС электролита: 1–20 Ом·м. Тонкослоистые модели должны имитировать среды со значениями коэффициента электрической анизотропии от 1.7 до 4.1.

Для выбора оптимальных параметров физических моделей, при которых тонкослоистая среда будет проявляться на электромагнитных сигналах зонда с тороидальными катушками как макроанизотропная, необходимо провести численное трёхмерное моделирование, реалистично описывающее конфигурацию электролитического бака со скважиной и тонкими прослоями. Для трёхмерного конечно-разностного моделирования используется решение прямой задачи в полной математической постановке при возбуждении электромагнитного поля круговым магнитным током [3]. Моделируемые сигналы: реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля ($\text{Re}E_z$ и $\text{Im}E_z$) и тангенциальной компоненты магнитного поля ($\text{Re}H_\phi$ и $\text{Im}H_\phi$). Ниже приведены некоторые результаты численного моделирования $\text{Im}E_z$ и $\text{Im}H_\phi$, демонстрирующие основные особенности сигналов.

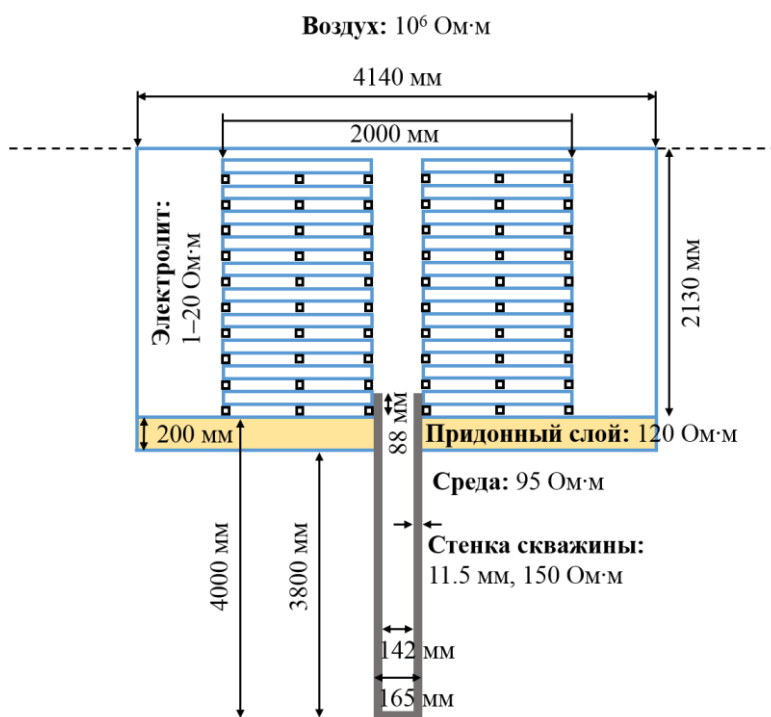


Рис. 1. Схема электролитического бака с тонкослоистой моделью в разрезе (ширина бака – 2850 мм). Под баком расположена скважина с асбоцементной стенкой. При численном моделировании не учитываются электрофизические характеристики стенок бака и проставок между прослоями

На первой стадии выполнено численное моделирование электромагнитных сигналов в баке без тонких прослоев при УЭС электролита 1 Ом·м (рис. 2). На всех диаграммах отчётливо проявлены верхняя и нижняя контрастные границы бака. Диаграмма $\text{Im}H_\phi$ суммарного режима с однонаправленными моментами симметрично расположенных генераторных катушек для центрального приёмника 0.0 м квазисимметрична относительно центра бака, а кривые приёмников -0.25 и $+0.25$ м характеризуются зеркальной симметрией. Близкие закономерности наблюдаются для $\text{Im}E_z$ в разностном режиме с разнонаправленными моментами генераторных катушек.

Максимальные значения $\text{Im}H_\phi$ в суммарном режиме отмечаются в центре бака и варьируются от 4.96 А/м (приёмник 0.0 м) до 5.54 А/м (приёмники -0.25 и $+0.25$ м); максимальные значения $\text{Im}E_z$ в разностном режиме удалены на 0.5 м внутрь бака от выделенных пунктиром границ и по модулю изменяются от $4.37 \cdot 10^{-4}$ до $1.7 \cdot 10^{-3}$ В/м. В центре бака диаграмма разностного режима для приёмника 0.0 м характеризуется точкой перегиба.

Выход сигналов суммарного режима на нижнюю асимптоту происходит на глубине 3.0 м, в то время как сигналы разностного режима близки к нулевому значению в обеих вмещающих бак средах.

При добавлении тонкослоистой модели в бак, показания обоих режимов уменьшаются и не превышают 3.67 А/м и $8.68 \cdot 10^{-4}$ В/м соответственно (рис. 3).

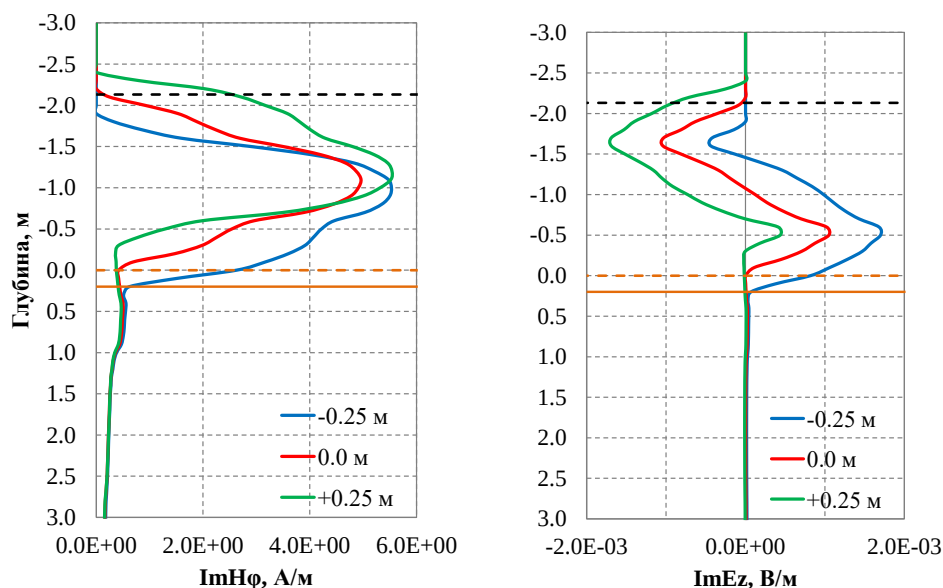


Рис. 2. Результаты трёхмерного конечно-разностного моделирования сигналов каротажного зонда с тороидальными катушками в электролитическом баке (УЭС электролита 1 Ом·м). Частота 250 кГц. Слева – суммарный режим, мнимая составляющая тангенциальной компоненты магнитного поля; справа – разностный режим, мнимая составляющая вертикальной компоненты электрического поля. Чёрная линия соответствует границе «воздух-электролит», оранжевые – придонному слою. Шифр соответствует положению приёмной катушки

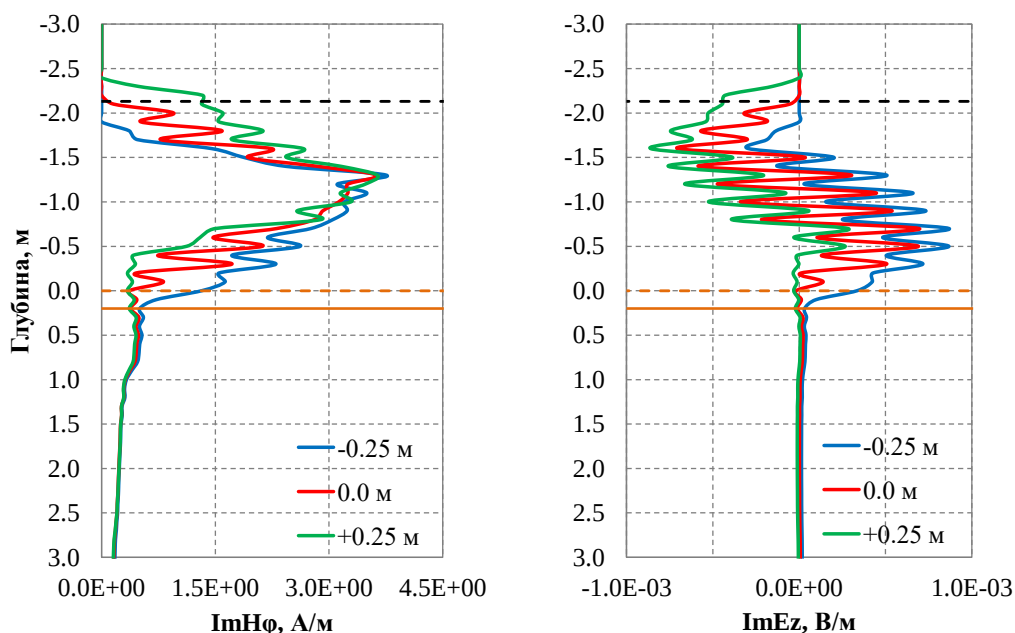


Рис. 3. Результаты трёхмерного конечно-разностного моделирования сигналов в электролитическом баке (УЭС электролита 1 Ом·м) с тонкослойной моделью (20 чередующихся прослоев с УЭС 1 и 16 Ом·м, толщиной 0.1 м). Частота 250 кГц. Обозначения – как на предыдущем рисунке

Тонкая слоистость видна на диаграммах как суммарного, так и разностного режима, но более выражена в разностном. Отметим также, что на глубине –1.3 м присутствуют выраженные экстремумы диаграмм $\text{Im}N_\phi$ с близкими значениями, равными 3.63, 3.64 и 3.76 А/м.

Соответствие между сигналами зонда с тороидальными катушками в тонкослоистой и эквивалентной макроанизотропной модели оценивается как относительное отклонение среднего значения в тонкослоистой модели от показания в эквивалентной макроанизотропной модели. Исходя из такого подхода, по предварительным результатам исследований, оптимальная толщина тонких прослоев модели в электролитическом баке для проведения физических экспериментов составляет 0.05-0.1 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-05-00595.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Применение тороидальных катушек в задачах каротажа нефтегазовых скважин (аналитический обзор) // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 1. – С. 5–24.
2. Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 113–129.
3. Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12. – С. 131–134.
4. Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 187–197.
5. Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродина И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 23–27.
6. Михайлов И.В., Велесов Д.В., Глинских В.Н. Изучение тонкослоистых коллекторов с применением тороидальных источников и приемников (на примере Приобского нефтяного месторождения) // Геофизические технологии. – 2020. – № 1. – С. 16–27.

REFERENCES

1. Mihajlov I.V., Glinskih V.N., Nikitenko M.N. Primenenie toroidal'nyh katushek v zadachah karotazha neftegazovykh skvazhin (analiticheskij obzor) // Geofizicheskie issledovaniya. – 2021. – Т. 22. – №. 1. – С. 5–24.
2. Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskih V.N. Matematicheskoe obosnovanie novogo elektromagnitnogo zonda s toroidal'nymi katushkami dlya vysokorazreshayushchego karotazha neftegazovykh skvazhin // Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii. – 2018. – Т. 16. – №. 1. – С. 113–129.

3. Surodina I.V., Mihajlov I.V., Glinskih V.N. Matematicheskoe modelirovanie signalov toroidal'nogo istochnika v trekhmernykh izotropnykh modelyakh geologicheskikh sred // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2020. – №. 12. – S. 131–134.

4. Epov M.I., Mihajlov I.V., Glinskih V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Algoritmy obrabotki i inversii dannykh elektromagnitnogo zonda s toroidal'nymi katushkami pri izuchenii makroanizotropnykh svoystv plastov-kollektorov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2019. – T. 330. – №. 6. – S. 187–197.

5. Epov M.I., Glinskih V.N., Eremin V.N., Mihajlov I.V., Nikitenko M.N., Osipov S.V., Petrov A.N., Surodina I.V., Yacenko V.M. Novyj elektromagnitnyj zond dlya vysokorazreshayushchego karotazha: ot teoreticheskogo obosnovaniya do skvazhinnykh ispytaniy // Neftyanoe hozyajstvo. – 2018. – №. 11. – S. 23–27.

6. Mihajlov I.V., Velesov D.V., Glinskih V.N. Izuchenie tonkosloistyh kollektorov s primeneniem toroidal'nykh istochnikov i priemnikov (na primere Priobskogo neftyanogo mestorozhdeniya) // Geofizicheskie tekhnologii. – 2020. – №. 1. – S. 16–27.

© И. В. Михайлов, М. Н. Никитенко, И. В. Суродин, 2021

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПУНКТЕ ГЛУБИННОГО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ксения Сергеевна Непеина

Научная станция РАН в г. Бишкеке, 720049, Кыргызстан, г. Бишкек, Бишкек-49, НС РАН, младший научный сотрудник лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований, тел. 996(312)316140, e-mail: neks@gdirc.ru

Виталий Евгеньевич Матюков

Научная станция РАН в г. Бишкеке, 720049, Кыргызстан, г. Бишкек, Бишкек-49, НС РАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований, тел. 996(312)316140, e-mail: vitaliy@gdirc.ru

В работе рассматриваются результаты обработки и анализа данных глубинных магнитотеллурических зондирований (ГМТЗ), выполненных в 2018 году. Выполнено сравнение вариаций кажущегося сопротивления, эндогенной составляющей магнитотеллурического поля, лунно-солнечными приливными деформациями и сейсмическими событиями, которые были зарегистрированы во время зондирований. Задачей исследования заключается в обнаружении зависимости между появлением вариаций электромагнитных параметров на данных магнитотеллурического мониторинга от произошедших землетрясений, их удаленности, энергетического класса и положения относительно пункта ГМТЗ.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, каталог землетрясений, кажущееся сопротивление, лунно-солнечные приливы

ANALYSIS OF GEOPHYSICAL PARAMETERS VARIATIONS AND SEISMIC EVENTS AT THE POINT OF DEEP MAGNETOTELLURIC SOUNDING

Kseniia S. Nepeina

Research Station RAS in Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, Bishkek, Bishkek-49, RS RAS, Junior Scientific Researcher of the Laboratory of Deep Magnetotelluric Investigations, phone: 996(312)316140, e-mail: neks@gdirc.ru

Vitalii E. Matiukov

Research Station RAS in Bishkek, RS RAS, Bishkek, Bishkek-49, 720049, Kyrgyzstan, PhD, Senior Scientific Researcher of the Laboratory of Deep Magnetotelluric Investigations, phone: 996(312)316140, e-mail: vitaliy@gdirc.ru

The paper considers the results of processing and analysis of data from deep magnetotelluric soundings (DMT) performed in 2018. Comparison of variations in apparent resistivity, the endogenous component of the magnetotelluric field, lunar-solar tidal deformations and seismic events that were recorded during the research. The objective of the study is to detect the relationship between the appearance of variations in electromagnetic parameters of the data of magnetotelluric monitoring from the occurred earthquakes, its' distance, energy class and position, relative to the DMT point.

Keywords: magnetotelluric soundings, earthquake catalog, apparent resistivity, lunar-solar tides

В 2018 году Научной станцией РАН в г. Бишкеке были выполнены глубинные магнитотеллурические зондирования (ГМТЗ) в 12 пунктах на 3 профилях с продолжительностью 72 часа регистрации 5 компонент электромагнитного поля станциями Phoenix MTU-5 (Phoenix Geophysics, Canada) (рис. 1). Эти исследования выполнены в рамках режимного мониторинга и частично повторяют пункты этих профилей, измеренных в 2011 году [1]. Пространственное расположение эпицентров землетрясений, также параметры их энергетических классов заимствуются из каталогов сейсмических событий международного сейсмологического центра ISC по данным цифровых сетей KNET, KRNET [2].

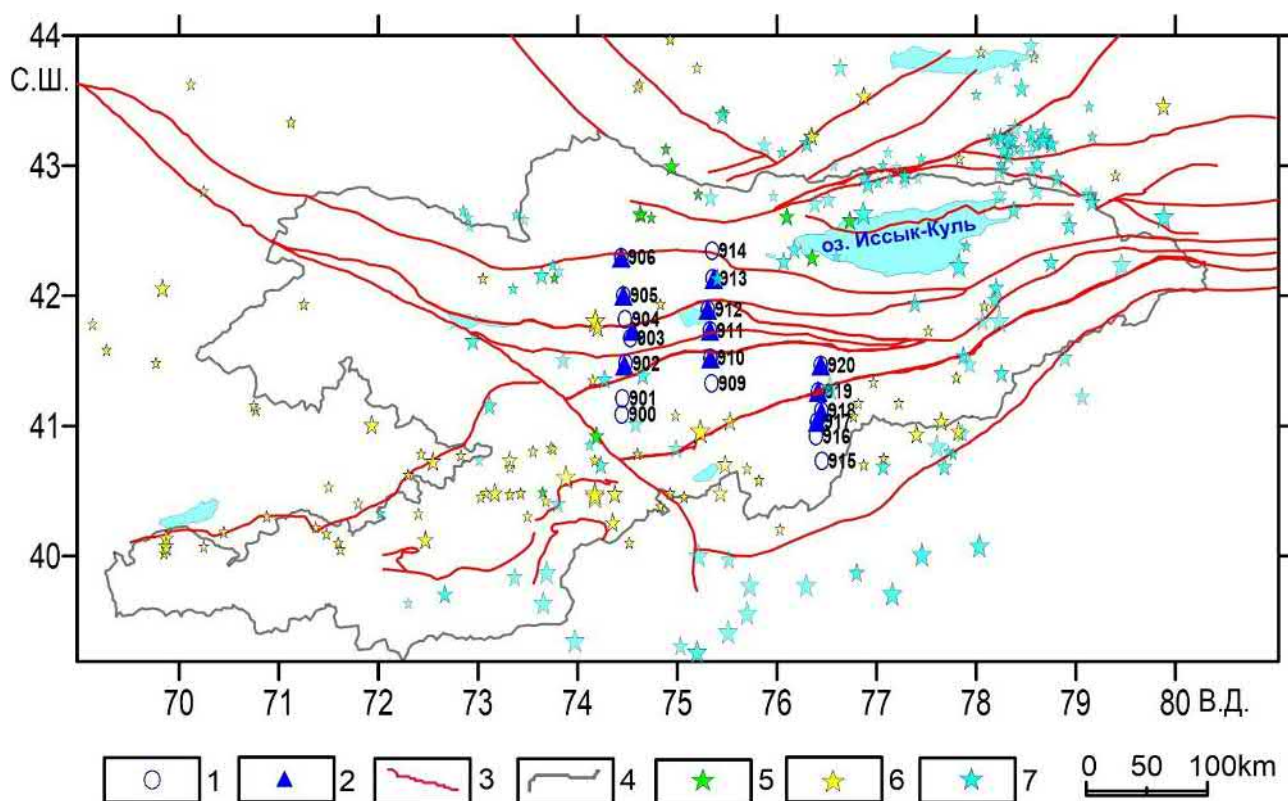


Рис. 1. Карты исследуемой территории:

1 – пункты ГМТЗ выполненные в 2011 году; 2 – пункты ГМТЗ выполненные в 2018 году; 3 – основные разломные зоны; 4 – граница Киргизской Республики; землетрясения по каталогам сейсмических сетей и центров: 5 – KNET; 6 – KRNET; 7 – ISC

В рамках исследований была проанализирована взаимосвязь поведения вариаций электромагнитных параметров и напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмоактивных регионов Тянь-Шаня, а также корреляционные связи между компонентами лунно-солнечных приливных воздействий и вариациями электромагнитных параметров для пунктов ГМТЗ Центрального Тянь-Шаня. Для исследований нами был выбран пункт 913, который находится в Нарынской области на профиле $75^{\circ}20'$ (рис. 1).

Для анализа взаимосвязи с пространственно-временным распределением сейсмичности был применен алгоритм для пересчета параметров очагов землетрясений (относительных координат). Результаты распределения сейсмичности по отношению к пункту ГМТЗ 913 представлены в виде круговых диаграмм в полярных координатах, где длина вектора R отвечает за удаленность эпицентра землетрясения, а его относительное азимутальное расположение - в градусах (Az) (рис. 2). Для этого из координат очага землетрясения (X_0, Y_0) вычитаются координаты точки наблюдения (X_{MT}, Y_{MT}) и вычисляется расстояние в километрах $R = \sqrt{(X_0 - X_{MT})^2 + (Y_0 - Y_{MT})^2}$. Азимут рассчитывается как арктангенс отношения

$$Az = \arctg\left(\frac{Y_0 - Y_{MT}}{X_0 - X_{MT}}\right).$$

Для всех пунктов ГМТЗ строятся частотно-временные ряды (ЧВР) всех электромагнитных параметров по методике азимутального магнитотеллурического мониторинга [3]. Методика заключается в анализе построенных временных рядов - псевдоразрезов, и выявлении вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность данного вида исследований на основании соотношений из [4]. В рамках комплексного подхода к изучению современных геодинамических процессов для пункта ГМТЗ 913 были рассмотрены энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения (рис. 3а), полученная в результате обработки в программе [5], расчетные лунно-солнечные приливы в программе TIDE_3.exe (рис. 3б), ЧВР кажущегося сопротивления с шагом по азимуту 15° (рис. 3в), распределение сейсмичности во времени вертикальными линиями и по энергетическому классу (рис. 3г) за выбранный период наблюдений.

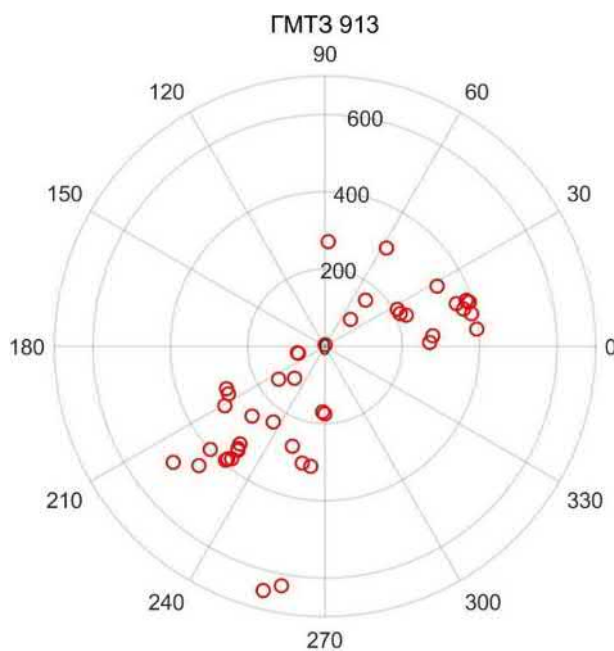


Рис. 2. Пространственное расположение эпицентров землетрясений относительно пункта ГМТЗ 913 (13.08.2018-16.08.2018).

Напряженно-деформированное состояние геологической среды обусловлено воздействием на вариации электромагнитных параметров приливных деформаций. Происходящие в геосреде процессы, такие как разрушение, трещинообразование и сопутствующие им, сопровождаются генерацией геофизических полей различной природы и могут быть как обратимыми, так и необратимыми [6-8]. Проявление их в электромагнитном и упругом полях вызывают особый интерес с точки зрения вариативности процессов [9-12].

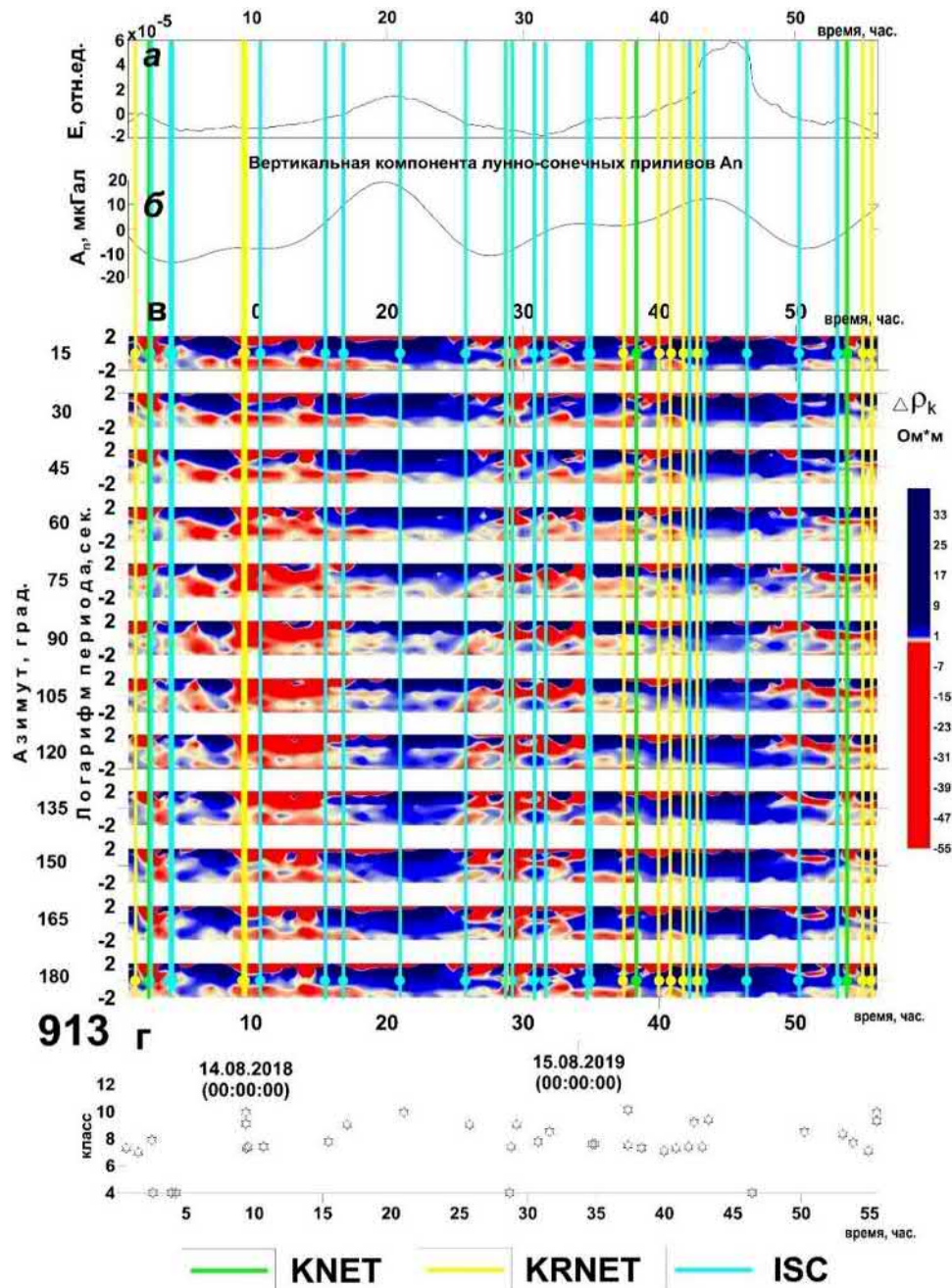


Рис. 3. Результаты мониторинга точки ГМТЗ 913 (13.08.2018-16.08.2018): (а) эндогенная характеристика электромагнитного поля, (б) лунно-солнечные приливы, (в) частотно-временные ряды ($\Delta\rho_k$), (г) энергетические классы землетрясений из сейсмических каталогов

Наблюдается ряд закономерностей в отклике геофизических полей на геодинамическую активизацию сейсмоактивных регионов Тянь-Шаня. Предполагается, что в результате подготовки землетрясения или его инициирования происходит перераспределение флюидов в горных породах, вследствие чего в мониторинговых данных по глубине и по времени наблюдается смена знака вариаций. На частотно-временных рядах кажущегося сопротивления (ρ_k) наблюдаются вариации, связанные с деформационными процессами, сопутствующими сейсмическим событиям, и могут быть использованы для оценки чувствительности к ним. По результатам построений ЧВР вариаций кажущегося сопротивления на мониторинговых данных можно отчетливо выделить контрастные изменения в некоторых временных отрезках. Например, на отрезке 15-25 и 42-48 часы крупные положительные аномалии в энергетической характеристике и вертикальной компоненте лунно-солнечных приливов имеет закономерное продолжительное соответствие в повышенном значении кажущегося сопротивления на ЧВР. Также наглядно выделяется взаимосвязь энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения и вертикальной компоненты лунно-солнечных приливов с некоторым пространственно-временным смещением, что ранее отмечалось авторами [9, 10] в подобных исследованиях.

Сопоставление энергетических классов (рис. 3г) дает основание полагать о зависимости измеряемых и расчетных геофизических параметров. Основные особенности поведения указанных рядов достаточно схожи. Во время регистрации электромагнитного поля (13.08.2018-16.08.2018) произошли землетрясения, некоторые из них фиксируются на расстояниях менее 100 км от пункта ГМТЗ 913. Одно из них зарегистрировано на удалении порядка 70 км обеими сетями KNET и KRNET 13.08.2018, которое попало на начало записи МТЗ и находится на втором часу ЧВР. Ещё одно сейсмическое событие, представляющее интерес, произошло в непосредственной близости от пункта наблюдений в радиусе 4 км, и было зарегистрировано по каталогу ISC 14.08.2018 в 22:14:08.54 UTC, то есть на через 32 часа после начала записи МТЗ. Для этого ближайшего землетрясения на ЧВР хорошо прослеживается смена знака полярности относительных вариаций кажущегося сопротивления. При уменьшении логарифма периода (ось Y, рис.3) наблюдается изменение от отрицательных значений $\Delta\rho_k$ к положительным при повороте системы координат в пространстве. Это подтверждает вывод о том, что для близких землетрясений (в радиусе менее 10 км), несмотря на невысокое значение энергетического класса ($K < 10$), происходит синфазное изменение электромагнитных параметров на ортогональных азимутах при внутренней перестройке вследствие напряженно-деформированного состояния среды.

Заключение

Можно отметить, что на максимумы энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения и вертикальной компоненты лунно-солнечных приливов приходятся положительные изменения в псевдорезах частотно-временных рядов.

Результаты интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в сейсмоактивных регионах Центрального Тянь-Шаня, свидетельствуют о синхронности в поведении вариаций электромагнитных параметров (энергетической характеристики и частотно-временных разрезов кажущегося сопротивления) и сейсмического поля под влиянием пространственно-временного распределения сейсмичности, лунно-солнечных приливов и других факторов. Как показали результаты электромагнитных наблюдений в 2018 г., вариации ρ_k отражают изменения напряженно-деформированного состояния геосреды не только перед значимыми сейсмическими событиями, но и перед слабыми, которые произошли вблизи точки мониторинга.

Благодарности

Работы выполнены в рамках выполнения государственного задания Научной станции РАН по теме АААА-А19-119020190063-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баталёва Е.А., Рыбин А.К., Баталёв В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.
2. Каталог ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue. Version 7.0 - released on 2020-04-09. Дата обращения 12.01.2021. <https://doi.org/10.31905/D808B825>.
3. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. материалы докладов конференции: в 2 т. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. – 2012. – С. 365-368.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. – М. : Недра, 1992. – 250 с. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618606. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований / Александров П.Н., Баталева Е.А. – М., 2019. 1 с.
6. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Докл. РАН. – 2000. – Т. 371, № 2. – С. 235–239.
7. Александров П.Н. К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2009. – № 2, Вып. 14. – С. 49-58.
8. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) // Вестник КРАУНЦ. – 2019. – № 2(42). – С. 42-56. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.
9. Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Matyukov V.E., Aleksandrov P.N. Definition of the seismic field of the underground sources in the ambient seismic noise in the Tien Shan region using a three-component gradient system // Journal of Earth Science. – 2020. – 31(5). – P. 988–992. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1327-5>.
10. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields // Journal of Applied Geophysics. – 2020. – 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.

11. Шалагинов А.Е., Неvedрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 93-107. – <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339>.

12. Неvedрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.

REFERENCES

1. Bataleva E.A., Rybin A.K., Batalev V.Yu. Variatsii kazhushchegosya soprotivleniya gornyx porod kak indikator napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sredy // Geofizicheskiye issle-dovaniya. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.

2. Katalog ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue. Version 7.0 - released on 2020-04-09. Data obrashcheniya 12.01.2021. <https://doi.org/10.31905/D808B825>.

3. Bataleva E.A., Batalev V.Ye. Variatsii kazhushchegosya soprotivleniya gornyx porod kak indikator napryazhennogo sostoyaniya sredy // Tektonofizika i aktual'nyye voprosy nauk o Zemle. materialy dokladov konferentsii: v 2 t. Institut fiziki Zemli im. O.YU. Shmidta RAN. – 2012. – С. 365-368.

4. Berdichevskiy M.N., Dmitriyev V.I. Magnitotelluricheskoye zondirovaniye gorizonta'-no-odnorodnykh sred. – М. : Nedra, 1992. – 250 s. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.

5. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2019618606. Programma razde-leniya elektromagnitnogo polya po polozheniyu istochnikov po dannym magnitotelluricheskikh zondirovaniy / Aleksandrov P.N., Bataleva E.A. – М., 2019. 1 s.

6. Zhamaletdinov A.A., Mitrofanov F.P., Tokarev A.D., Shevtsov A.N. Vliyaniye lunno-sutochnykh prilivnykh deformatsiy na elektroprovodnost' i flyuidnyy rezhim zemnoy kory // Dokl. RAN. – 2000. – Т. 371, № 2. – С. 235–239.

7. Aleksandrov P.N. K teorii seysmicheskogo i elektromagnitnogo monitoringa sovre-mennykh geodinamicheskikh protsessov // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. – 2009. – № 2, Vyp. 14. – С. 49-58.

8. Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Matiukov V.E., Rybin A.K. Izucheniye neobratimyykh deformatsiy v litosfere Tyan'-Shanya po magnitotelluricheskim dannym (metodologicheskiy aspekt) // Vestnik KRAUNTS. – 2019. – № 2(42). – С. 42-56. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>.

9. Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Matiukov V.E., Aleksandrov P.N. Definition of the seismic field of the underground sources in the ambient seismic noise in the Tien Shan region using a three-component gradient system // Journal of Earth Science. – 2020. – 31(5). – P. 988–992. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1327-5>.

10. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields // Journal of Applied Geophysics. – 2020. – 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.

11. Shalaginov A.Ye., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O. Variatsii elektrofizicheskikh parametrov po dannym elektromagnitnogo monitoringa kak indikator aktivnosti razlomnykh zon // Geodinamika i tektonofizika. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 93-107. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339>.

12. Nevedrova N.N., Shalaginov A.E. Monitoring elektromagnitnykh parametrov v zone seysmicheskoy aktivizatsii Gornogo Altaya // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.

© К. С. Непеина, В. Е. Матюков, 2021

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ

Олег Валентинович Нечаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.ф.-м.н, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

Кирилл Николаевич Даниловский

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

Статья посвящена проблеме изучения состояния вечной мерзлоты и процессов ее геокриологических изменений с помощью геофизических методов. Для мониторинга криолитозоны предлагается методика импульсного электромагнитного межскважинного зондирования. На основе векторного метода конечных элементов создана математическая модель процесса межскважинного зондирования импульсным источником в трехмерной пространственно неоднородной среде.

Ключевые слова: криолитозона, импульсное электромагнитное зондирование, межскважинная разведка

NUMERICAL SOLVING THREE-DIMENSIONAL DIRECT PROBLEM OF PULSED ELECTROMAGNETIC CROSS-WELL EXPLORATION FOR CRYOLITHOZONE MONITORING

Oleg V. Nechaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

Kirill N. Danilovskiy

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

The article is devoted to the problem of studying permafrost state and the processes of its geocryological changes using geophysical methods. To monitor the cryolithozone, a method of pulsed electromagnetic cross-well sounding is proposed. On the basis of the vector finite element method, a mathematical model of the cross-well sounding process by a pulsed source in a three-dimensional spatially inhomogeneous medium has been created.

Keywords: cryolithozone, pulsed electromagnetic sounding, cross-well survey

Исследование состояния вечной мерзлоты, занимающей не менее 25% площади суши земного шара, в настоящее время становится всё более актуальной научной задачей. Это обусловлено, прежде всего, климатическими изменениями последних десятилетий, сопровождающимися повышением среднегодовой

температуры воздуха на Земле. Таяние вечной мерзлоты, как следствие, несёт угрозы как локального, так и регионального и глобального масштабов. Представленное исследование посвящено научному обоснованию нового способа электромагнитного мониторинга вечной мерзлоты под автодорогами, которая представляет серьёзную проблему на территории Российской Федерации. Эксплуатация автодорог, построенных на мёрзлом основании, отличается высокой капиталоемкостью, связанной с постоянно возникающими деформациями дорожного полотна, требующими восстановительных работ и разработки мер по стабилизации мерзлотной обстановки. Как правило, причиной деформаций является вытаивание внутригрунтового льда и образование чаш протаивания в основании дороги – таким образом формируется термокарст. Развитие термокарста продолжается в течение нескольких лет, а иногда и десятков лет, что требует значительных финансовых затрат на поддержание автодороги в состоянии, соответствующем стандартам. Задача картирования чаш протаивания под дорожным полотном и определения их размеров эффективно решается методом электротомографии [1]. Чёткое оконтуривание чаши протаивания даёт возможность прицельно спланировать инженерные работы и повысить эффективность противодеформационных мероприятий.

Однако кроме картирования термокарста возникает необходимость мониторинга процессов геокриологических изменений в основании дороги, например, после проведения мероприятий по стабилизации мерзлотной обстановки. Процессы протаивания или промерзания мёрзлых пород будут сопровождаться изменением их электрической проводимости, что даёт возможность применения электроразведочных, в том числе электромагнитных методов, для мониторинга.

Мы предлагаем способ мониторинга вечной мерзлоты под автодорогами, основанный на импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании геологического пространства. Рассматриваются следующие параметры геоэлектрической модели и установки межскважинного просвечивания (рис 1.).

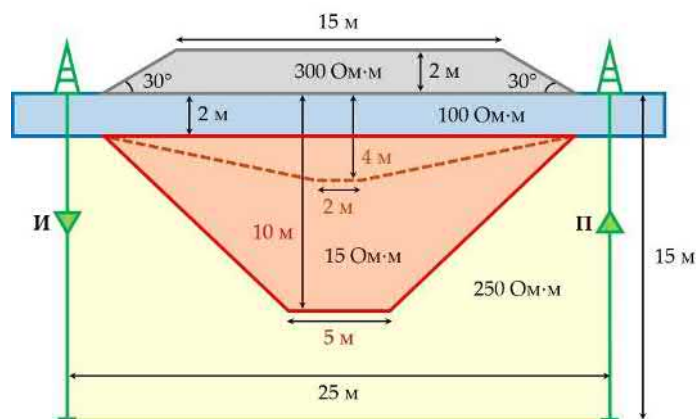


Рис. 1. Геоэлектрическая модель элемента автодороги с подтаявшей мерзлотой и применяемая геофизическая установка межскважинного просвечивания (в разрезе). Серый цвет – дорожное полотно с насыпью, синий – сезонно-оттаивающий слой, жёлтый – многолетнемёрзлые породы, красный – талики, зелёный – скважины с источником и приёмников сигнала

Трапециевидный в разрезе элемент дорожного полотна с насыпью (серый цвет) имеет высоту 2 м, длину верхнего основания 15 м и протяжённость 30 м в плане (на рисунке не показано). Углы при основании трапеции составляют 30° . Удельное электрическое сопротивление (УЭС) представленного элемента дороги – 300 Ом·м. Ниже залегает сезонно-оттаивающий слой прямоугольной формы (синий) с высотой 2 м и УЭС 100 Ом·м. Многолетнемёрзлые породы (жёлтый) характеризуется УЭС 250 Ом·м. Геоэлектрические параметры модели хорошо согласуются с результатами обработки полевых данных электротомографии.

Под дорогой и сезонно-оттаивающим слоем сформировалась область протавивания (талик), имеющая в разрезе форму трапеции (красный). Мы исследуем случаи двух разных таликов с УЭС 15 Ом·м: большего размера (длина верхнего основания 5 м, расстояние от него до низа насыпи 10 м) и меньшего размера (длина верхнего основания 2 м, расстояние 4 м).

С целью электромагнитного просвечивания рассматриваемой среды, по обеим сторонам дороги пробурены две вертикальные скважины глубиной 15 м от низа насыпи, на расстоянии 25 м друг от друга (зелёный). В первой находится источник сигнала (И), во второй – приёмник (П). Источник сигнала – виток с радиусом 0.02 м, приёмник – катушка того же радиуса. По витку протекает постоянный ток с амплитудой 1 А. В момент времени $t = 0$ происходит его ступенчатое выключение, после чего в приёмной катушке регистрируется зависимость электродвижущей силы (э.д.с.) от времени. Во время межскважинного просвечивания источник и приёмник располагаются на одном уровне по глубине и синхронно перемещаются вдоль скважин.

Для получения математической модели, описывающей процесс зондирования с использованием импульсного источника возбуждения электромагнитного поля в сложной по физическому и геометрическому строению трехмерной области, используется система уравнений Максвелла. Воспользовавшись уравнениями состояния, из системы уравнений исключаются вектора электрической и магнитной индукции, а также напряженность магнитного поля, в результате чего получается уравнение второго порядка относительно напряженности электрического поля. Для решения уравнения по времени используется преобразование Фурье. Для получения дискретного аналога исходной задачи по пространственным координатам используется векторный метод конечных элементов [2]. Построение матрицы и правой части системы линейных уравнений осуществляется при помощи векторных базисных функций третьего порядка, определенных на тетраэдральной сетке [3]. Для решения системы линейных алгебраических уравнений используется модифицированный мультипликативный алгоритм совместно с алгоритмом QMR [4-5]. Расчеты выполнялись на кластере ССКЦ СО РАН.

Смоделированные зависимости э.д.с. в измерительной катушке от времени представлены в логарифмическом масштабе для четырёх глубин по скважине: 1, 5, 10 и 15 м (рис. 2).

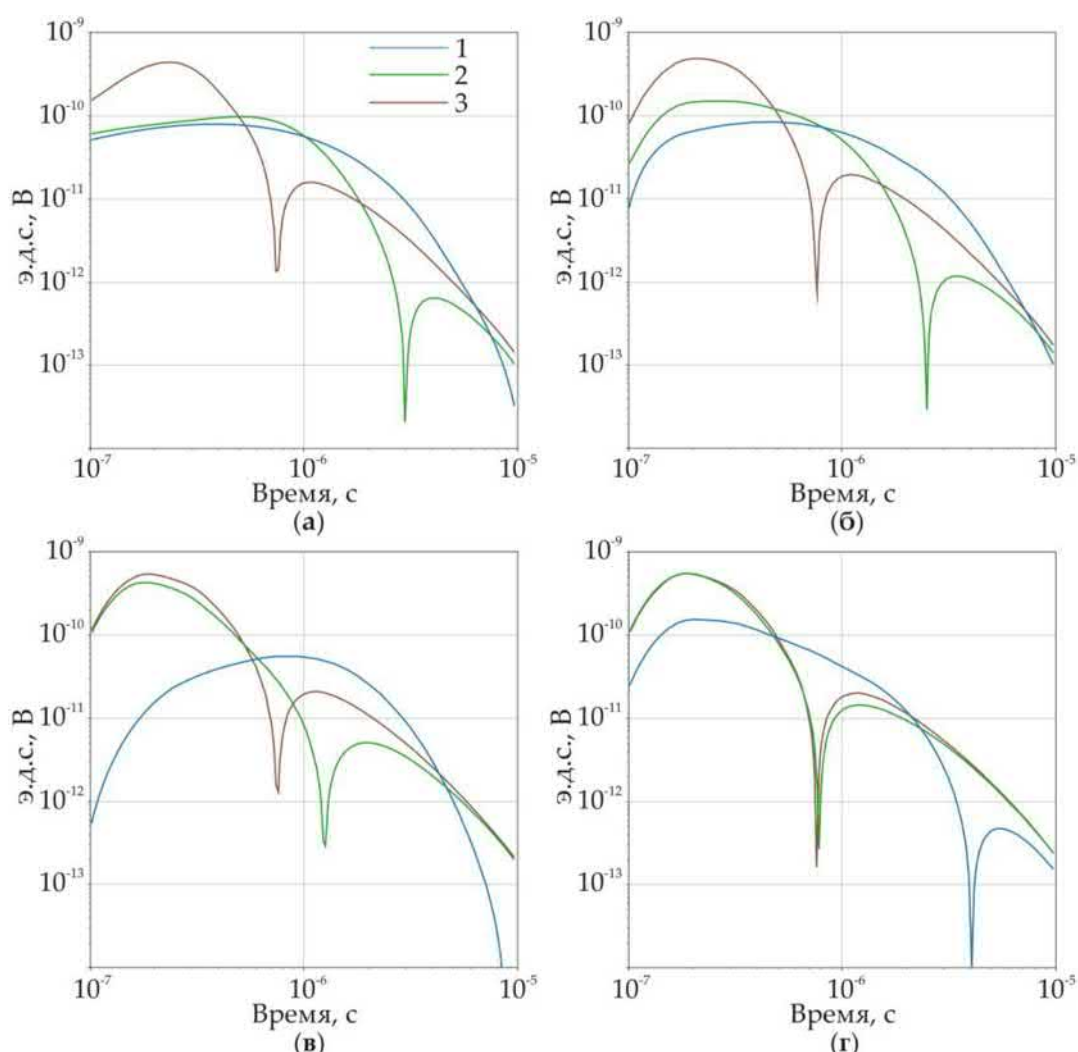


Рис. 2. э.д.с. в измерительной катушке от времени на 4 характерных глубинах (а – 1 м, б – 5 м, в – 10 м, г – 15 м) при движении источника и приёмника вниз напротив друг друга: 1 – в референтной модели, 2 – в модели с малым таликом, 3 – в модели с большим таликом

Нулевая глубина соответствует низу дорожной насыпи на рис. 1. Наиболее простой вид имеет э.д.с. для референтной модели – переход через 0 отмечается только на глубине 15 м в области больших времён. Что касается обеих моделей с таликами, соответствующие им э.д.с. существенно от неё отличаются: переход через 0 проявлен на всех графиках. При этом принципиальное различие заключается в расположении соответствующих экстремумов при изменении просвечиваемой глубины. Так, для большого талика с ростом глубины экстремум находится на одном времени, а величина э.д.с. незначительно уменьшается. Для малого талика увеличение глубины приводит к сдвигу экстремума графика э.д.с. в область меньших времён и увеличению измеряемого сигнала. Наибольшее различие между графиками э.д.с. касательно времени перехода через 0 и абсолютному значению наблюдается в среднем диапазоне глубин (например, на 5 м). На глубине 15 м размер неоднородности (талика) перестаёт быть различимым, так как зависимости э.д.с.

практически идентичны. Главный вывод проведённого анализа: с применением предлагаемой системы межскважинного просвечивания можно достоверно говорить о наличии талика под дорожной насыпью, а также оценивать его размеры.

Результаты выполненных исследований направлены на научное обоснование геофизического способа мониторинга процессов геокриологических изменений в основании автомобильных дорог. Для изучения процессов протаивания или промерзания мёрзлых пород, сопровождающихся изменением их электрической проводимости, предлагается импульсное электромагнитное зондирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта № 19-77-20130 «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мёрзлом основании // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. – 2017. – С. 282-283.
2. Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – vol. 11. – P. 237-339.
3. Webb J. P. Hierarchal vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – vol. 47. – P. 1244-1253.
4. Nechaev O.V., Shurina E.P., Botchev M.A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Computers & Mathematics with Applications. – 2008. – vol. 55. – P. 2346-2362.
5. Freund R.W., Nachtigal N.M. Software for simplified Lanczos and QMR algorithms. // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – vol. 19. – P. 319-341.

REFERENCES

1. Olenchenko, V.V., Kondratyev V.G. Geofizicheskie issledovaniya v predelakh uchastka deformatij avtodorogi, postroennoj na myorzlom osnovanii // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya. – 2017. – 282-283.
2. Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – vol. 11. – P. 237-339.
3. Webb J. P. Hierarchal vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – vol. 47. – P. 1244-1253.
4. Nechaev O.V. Shurina E.P. Botchev M.A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Computers & Mathematics with Applications. – 2008. – vol. 55. – P. 2346-2362.
5. Freund R.W., Nachtigal N.M. Software for simplified Lanczos and QMR algorithms. // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – vol. 19. – P. 319-341.

© О. В. Нечаев, К. Н. Даниловский, 2021

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАТУХАНИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ

Михаил Александрович Новиков

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

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

В работе при помощи численного алгоритма оценки сейсмического затухания в анизотропной трещиновато-пористой флюидонасыщенной среде исследуется влияние анизотропии фильтрационно-емкостных и упругих свойств на затухание, вызванное флюидопотоками между связанными трещинами. Алгоритм оценки затухания основан на решении системы уравнений Био пороупругой анизотропной среды. Для численного решения уравнений Био используется конечно-разностная схема на разнесенных сетках. Проведен ряд численных экспериментов по распространению сейсмической волны в трещиноватых средах различной степени связности, где трещины заполнены анизотропным материалом, обеспечивающим индуцированные волной флюидопотоки между связанными трещинами. По зарегистрированным сигналам построены численные оценки величины, обратной добротности, свидетельствующие о влиянии анизотропии заполняющего трещины материала на частотно-зависимое затухание.

Ключевые слова: модель Био, пороупругость, анизотропия, распространение сейсмических волн, сейсмическое затухание, конечно-разностный метод

NUMERICAL ALGORITHM OF SEISMIC ATTENUATION ESTIMATION IN ANISOTROPIC FRACTURED POROUS FLUID-SATURATED MEDIA

Mikhail A. Novikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., DSc, Senior Researcher, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

In our work we investigate the effect of transport and elastic properties anisotropy on seismic attenuation due to fracture-to-fracture wave-induced fluid flow using numerical algorithm of estimation of seismic wave attenuation in anisotropic fractured porous fluid-saturated media. Algorithm is based on numerical solution of anisotropic Biot equations using finite-difference scheme on staggered grid. We perform a set of numerical experiments to model wave propagation in fractured media with anisotropic fractured-filling material providing wave-induced fluid flow within interconnected fractures. Recorded signals are used for numerical estimation of inverse quality factor. Results demonstrate the effect of fracture-filling material anisotropy on seismic wave attenuation.

Keywords: Biot model, poroelasticity, anisotropy, seismic wave propagation, seismic attenuation, finite differences

Оценка транспортных свойств трещиноватых резервуаров и мобильность флюида в них является одной из актуальных задач в геофизике, поскольку достоверная информация об этих свойствах позволяет повысить эффективность разработки коллекторов углеводородов, захоронения углекислого газа [1, 2] и добычи геотермальной энергии [3, 4]. Затухание сейсмических волн является сейсмической характеристикой, имеющей большой потенциал применения для локализации и характеристики зон трещиноватости. При прохождении в такой среде сейсмическая волна создает перепады давления, приводящие к перетоку флюида в область с пониженным давлением и, следовательно, диссипации сейсмической энергии. Такие флюидопотоки называются индуцированными волной (от английского *wave-induced fluid flow*, WIFF) [5], в современных исследованиях их принято разделять на два типа. Первый тип – флюидопотоки между вмещающей средой и материалом в трещинах (в англоязычной литературе *fracture-to-background WIFF*, FB-WIFF), интенсивность которых в основном зависит от контраста физических свойств вмещающей породы и материала в трещинах. При наличии связанных трещин проявляются потоки второго типа – перетоки флюида между связанными трещинами (в англоязычной литературе *fracture-to-fracture WIFF*, FF-WIFF), зависящие от свойств материала в трещинах и степени связности трещин. Потоки первого типа наиболее интенсивно проявляют себя на низких частотах, в то время как потоки второго типа наиболее интенсивны на высоких частотах (порядка десятков кГц и выше). Таким образом, частотно-зависимое затухание вследствие потоков флюида, индуцированных сейсмической волной, может служить индикатором транспортных свойств трещиноватых резервуаров.

К сожалению, в последних теоретических исследованиях WIFF зачастую рассматриваются лишь простейшие трещиноватые модели, к примеру, ограничиваемые попарным пересечением трещин двух ориентаций [6]. Имеются работы, где используются более сложные трещиноватые модели [7], однако не обеспечиваются большие длины перколяции по связанным трещинам. Поскольку мобильность флюида в значительной обеспечивается существованием в среде длинных цепочек связанных трещин, в исследованиях нужно рассматривать среды с сильной глобальной связностью трещин. Нами ранее был проведен ряд численных экспериментов с использованием трещиноватых моделей с глобальной связностью трещин, обеспечивающих заданную длину перколяции [8]. Однако для материалов в трещинах характерна микромасштабная анизотропия транспортных свойств (проницаемости, извилистости), что не учитывается в большинстве работ. Таким образом, для выявления зависимостей между структурой трещиноватости среды и частотно-зависимым затуханием вследствие потоков флюида, индуцированных волной, необходимо разработать и использовать алгоритм численной оценки сейсмического затухания волн в трещиноватых средах с учетом анизотропии среды.

В данной работе с использованием разработанного алгоритма численного моделирования распространения сейсмической волны в анизотропной трещиновато-пористой флюидонасыщенной среде, основанного на численном решении уравнений Био методом конечных разностей на разнесенных сетках, проведен ряд численных экспериментов для изотропного и анизотропного наполнителя трещин. По результатам численного моделирования проведена численная оценка величины, обратной добротности. Результаты демонстрируют влияние анизотропии и связности трещин на частотно-зависимое затухание волны.

Рассматривается задача распространения плоской продольной волны в прямоугольной области, схематически изображенной на рис. 1. Волна распространяется в области, содержащей неоднородную подобласть, представленную трещиноватым слоем, в котором необходимо оценить частотно-зависимое затухание волны. Рассматриваемая область – пороупругая флюидонасыщенная среда, материал в трещинах в которой отличается высокой проницаемостью и пористостью по сравнению с вмещающей породой. Размер расчетной области в направлении оси Ox – $L_x = 1$ м, в направлении оси Oz L_z зависит от центральной частоты исходного сигнала. Граничные условия на границах $x = 0$ м и $x = L_x$ – периодические, на границах, параллельных оси $z = 0$ м и $z = L_z$ для избавления от отражений строятся идеально согласованные слои [13].

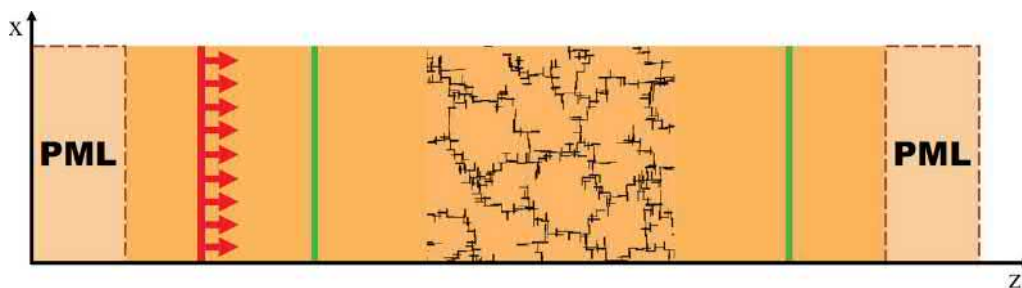


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области, содержащей трещиноватый участок. Красная линия – линия источников, зеленые линии – линии приемников

В рассматриваемой области решается система уравнений Био анизотропной пороупругой флюидонасыщенной среды в двумерной постановке [9,10]:

$$\begin{aligned}\rho_f \frac{T_x}{\phi} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\eta}{k_x} q_x &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \rho_f \frac{T_z}{\phi} \frac{\partial q_z}{\partial t} + \frac{\eta}{k_z} q_z &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial v_z}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial q_x}{\partial t}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial q_z}{\partial t} \\
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \alpha_x \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\
\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \alpha_z \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\
\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= c_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\
-\frac{\partial p}{\partial t} &= M \alpha_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + M \alpha_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right)
\end{aligned}$$

Уравнения Био описывают скорость смещения твердых частиц (v_x, v_z) , относительную скорость смещения флюида (q_x, q_z) , компоненты тензора напряжений в упругом скелете $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$, давление флюида p . В коэффициенты уравнений входят плотность флюида ρ_f , пористость ϕ , вязкость флюида η , плотность флюидонасыщенного скелета ρ , модуль взаимодействия между фазами M . Анизотропия выражается в параметрах извилистости T_x, T_z , проницаемости k_x, k_z (нижний индекс указывает на ось, в направлении которой определяется параметр). Наконец, в уравнениях присутствуют компоненты тензора жесткости неосушенного скелета c_{ij} анизотропные параметры Био-Уиллиса α_x, α_z . Уравнения Био аппроксимируются явной конечно-разностной схемой со вторым порядком по пространству и времени на сдвинутых сетках, где различные компоненты скоростей смещений и напряжений находятся в разных узлах сетки [11, 12].

Для оценки влияния анизотропии материала в трещинах на затухание, вызванное FF-WIFF, проводится ряд численных экспериментов распространения волны в трещиноватых средах, где связность трещин обеспечивает перколяцию на заданное расстояние, причем рассматриваются модели разной степени связности. Дискретные системы трещин (рис. 2) сформированы двумя семействами трещин взаимно перпендикулярных трещин (ориентированных в направлении осей координат), длина и ширина которых одинакова и составляет 30 мм и 4 мм, соответственно. Генерация систем трещин проводится с использованием метода имитации отжига, детали алгоритма представлены в [8]. Всего рассматривается 6 различных степеней связности (длин перколяции), по 10 реализаций на каждую степень. Во всех рассматриваемых моделях вмещающая среда по сравнению с материалом, заполняющим трещины, имеет крайне низкую проницаемость и низкую пористость, что обеспечивает практическое отсутствие флюидопотоков из вмещающей среды в трещины и наоборот и затухание волны происходит в основном за счет флюидопотоков в связанных трещинах. Отметим, что для наблюдения эффектов, вызванных интенсивными флюидопотоками в трещинах, необходимо рассматривать достаточно высокую частоту сигнала. Используемый в численных экспериментах шаг сетки по пространству в направлениях обоих

осей координат $\Delta x = \Delta z = 2$ мм, обеспечивает достаточное число точек на длину волны в рассматриваемом диапазоне центральных частот исходного сигнала от 1 до 10 кГц.

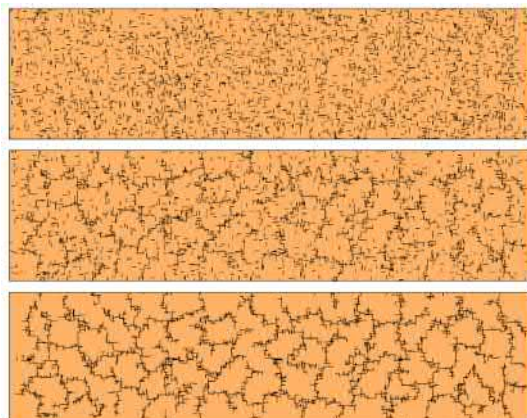


Рис. 2. Модели трещиноватой среды с разной длиной перколяции (возрастающей от верхней модели к нижней).

В первой серии экспериментов трещины заполнены анизотропным материалом, причем большая проницаемость, меньшая извилистость, и меньшая жесткость упругого скелета обеспечивается именно в направлении ориентации трещин. Физические свойства вмещающей породы, материала в трещинах, параллельных оси Ox , материала в трещинах, параллельных оси Oz , материала в пересечениях трещин разной ориентации указаны в таблице 1 (1-4 столбцы соответственно). Здесь и в дальнейших численных экспериментах плотность флюида 1000 кг/м^3 , вязкость флюида $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Физические свойства материалов реалистичны и соответствуют свойствам оолитового известняка до и после частичного растворения раствором углекислоты (рис. 3) [14].

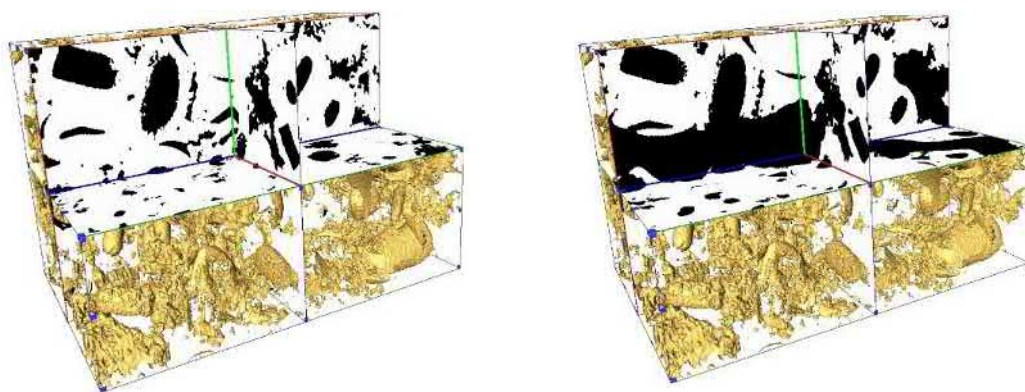


Рис. 3. Изображения известняка до насыщения раствором CO_2 (слева), и после (справа), полученные методом компьютерной томографии.

Черным цветом показано поровое пространство, белым – скелет, желтым – поверхность раздела.

Высокая анизотропия упругого скелета наполнителя трещин обуславливается влиянием химически активного раствора. Поскольку протекание раствора углекислоты происходит по трещинам вдоль них, частичное растворение породы-наполнителя оказывает наибольшее влияние именно на упругие свойства материала в направлении ориентации трещин, уменьшает извилистость порового пространства в этом направлении.

Физические свойства трещиноватой среды

Таблица 1

Параметр	Вмещающая порода	Анизотроп., трещины Вдоль Ох	Анизотроп., трещины Вдоль Oz	Анизотроп., пересечения трещин	Изотроп., мягкий	Изотроп., жесткий
Осушенный материал						
ϕ , кг/м ³	0.1	0.225	0.225	0.225	0.225	0.1425
k_x , м ²	10 ⁻¹⁵	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³
k_z , м ²	10 ⁻¹⁵	5.3·10 ⁻¹³	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³
T_x	1.83	1.17	1.83	1.17	1.17	1.83
T_z	1.83	1.83	1.17	1.17	1.17	1.83
α_x	0.2962	0.6896	0.6418	0.6915	0.7346	0.7346
α_z	0.2962	0.6418	0.6896	0.6915	0.7346	0.7346
Неосушенный материал						
ρ , кг/м ³	2485	2318	2318	2318	2318	2458
c_{11} , ГПа	69.097	38.958	46.432	38.958	38.958	46.432
c_{33} , ГПа	69.097	46.432	38.958	38.958	38.958	46.432
c_{13} , ГПа	7.159	19.811	19.811	19.811	16.337	23.81
c_{55} , ГПа	30.969	11.311	11.311	11.311	11.311	11.311
M , ГПа	20.1	9.4287	9.4287	9.4026	9.33	9.488

Результирующие поля давления флюида для моделей с различной степенью связности трещин представлены на рис. 4. Действительно, при крайне низкой проницаемости вмещающей среды значительные перепады давления наблюдаются лишь в трещинах. Причем перепады давления не наблюдаются в случае практически непересекающихся трещин (рис. 4, А), но сразу возникают при формировании кластеров протяженностью больше длины микротрещины (рис. 4, В). Перепады давления флюида более интенсивны в системах трещин, обладающих сильной связностью и едва различимы для последних степеней связности (поля давлений D, E и F на рис. 4.). Результаты свидетельствуют о наличии интенсивного FF-WIFF при сильной глобальной связности трещин.

Для оценки влияния анизотропии на сейсмическое затухание вследствие FF-WIFF проводится ряд численных экспериментов распространения волны в трещиноватой среде, где материал в трещинах заполнен изотропным

материалом. В частности, рассматривается две модели материала – мягкий материал, обладающий большими пористостью, проницаемостью и меньшей извилистостью и жесткий материал; свойства материалов указаны в таблице 1. (пятый и шестой столбцы, соответственно). Полученные в результате численных экспериментов поля давлений для первой и последней степеней связности трещин показаны на рис. 5. Здесь снова наблюдаются более интенсивные перепады давления для сильно связанных трещин, однако, при сравнении результатов для мягкого и жесткого наполнителя в случае второго перепада давления практически не наблюдаются и при наличии сильной глобальной связности.

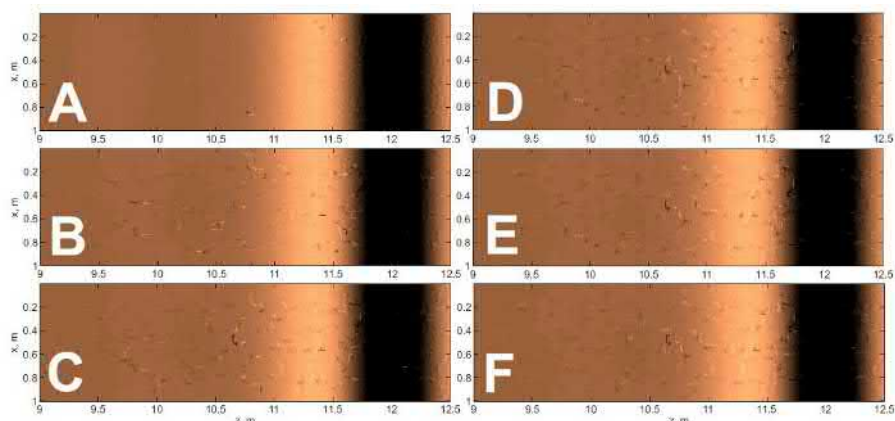


Рис. 4. Поле давления во флюиде в анизотропных трещиноватых средах с различной длиной перколяции при центральной частоте волны 3 кГц. Связность трещин растет от изображения А до изображения F

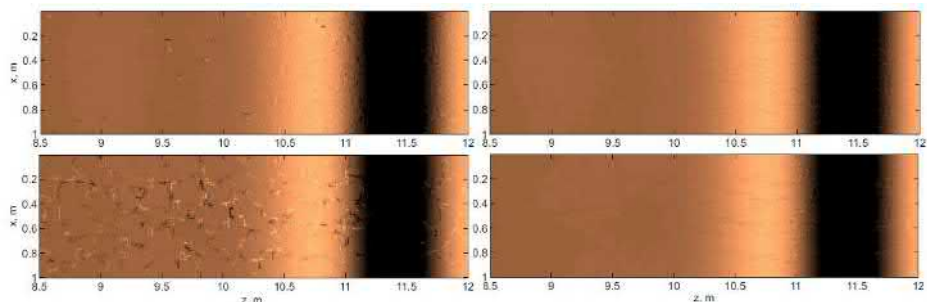


Рис. 5. Поле давления флюида в изотропных трещиноватых средах. Верхние изображения соответствуют наименьшей длине перколяции, нижние изображения – наибольшей. Изображения слева соответствуют мягкому наполнителю трещин, справа – жесткому. Центральная частота сигнала – 3 кГц

Наконец, зарегистрированные на линиях приемников (рис. 1.) трассы для всех проведенных численных экспериментов осредняются по реализациям и направлению оси Ox и используются при численной оценке величины $1/Q$, обратной добротности, характеризующей частотно-зависимое затухание волны.

Численная оценка величины $1/Q$ проводится при помощи деконволюции сигналов до и после прохождения через трещиноватую среду [15]. Результаты оценки представлены на рис. 6. С ростом связности трещин для всех трех моделей наполнителя трещин (анизотропный, изотропный мягкий, изотропный жесткий) наблюдается рост затухания во всем рассматриваемом частотном диапазоне. В целом, рост затухания также ожидаемо наблюдается и с ростом центральной частоты сигнала. Пик затухания вблизи 5 кГц для всех моделей может быть связан неоднородностью плотности трещин в модели в направлении оси Ox . Как и для перепадов давления, более значительный рост затухания наблюдается от практически непересекающихся трещин к системам, где начинают формироваться кластеры размера больше отдельных трещин. Практически на всем частотном диапазоне и для всех степеней связности наибольшее затухание волны происходит на системе трещин, заполненных мягким изотропным материалом. С другой стороны, жесткий материал в трещинах приводит к наименьшему затуханию при всех степенях связности трещин кроме случая практического отсутствия пересечений. Такой результат для непересекающихся трещин, где отсутствуют флюидопотоки между трещинами, может объясняться доминированием затухания, вызванного рассеянием, которое слабо зависит от проницаемости и прочих параметров. Ожидаемым результатом является то, что оценки затухания для анизотропного материала в трещинах заключены между оценками в случае жесткого и мягкого изотропных материалов. Однако затухание в случае анизотропии значительно отличается от затухания, полученного в случае изотропных наполнителей трещин, что свидетельствует о влиянии анизотропии фильтрационно-емкостных и упругих свойств среды на сейсмическое затухание.

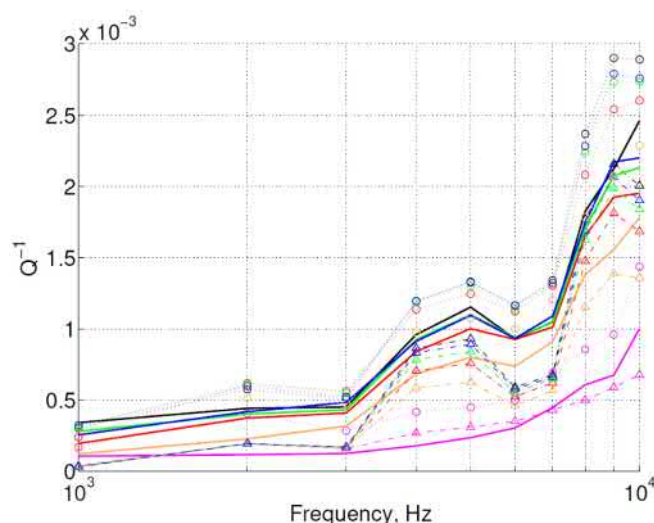


Рис. 6. Численная оценка величины, обратной добротности, для трещиноватых сред. Сплошные линии соответствуют оценкам для анизотропного наполнителя трещин, пунктирные с кружками – мягкого изотропного, штрихпунктирные с треугольниками – жесткого изотропного. Цвет линий соответствует длине перколяции модели, росту длины перколяции соответствует порядок цветов: розовый, желтый, красный, зеленый, синий, черный

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 20-45-540004 и гранта Президента РФ на поддержку молодых ученых – кандидатов наук МК-3947.2021.1.5. Моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben // *The Leading Edge*. – 2020. – Vol. 39. – № 12. – P. 857-863.
2. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiery D., Kervevan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics*. – 2020. – Vol. 88. – P. 101899.
3. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J. 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales // *Chemical Geology*. – 2018. – Vol. 481. – P. 23-37.
4. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka, T., Henninges, J., Sopher, D., Zhang, F. The First post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66. – № 1. – P. 62-84.
5. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 5. – P. 75A147-75A164.
6. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wang Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 65. – № 6. – P. 1649-1661.
7. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J. G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. – № 1. – P. 125-143.
8. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – Vol. 41. – № 8. – P. 1533-1544.
9. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. i. low-frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – Vol. 28. – P. 168-178.
10. De la Puente J. Seismic wave simulation for complex rheologies on unstructured meshes / PhD thesis. – Ludwig-Maximilians Universitat, Munich, Germany, 2008. – 171 p.
11. Masson Y. J., Pride S. R. Finite-difference modeling of biot's poroelastic equations across all frequencies // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 2. – P. N33-N41.
12. Новиков М.А., Базайкин Я.В., Лисица В.В., Козяев А.А. Моделирование волновых процессов в трещиновато-пористых средах: влияние связности трещин на поглощение сейсмической энергии // *Вычислительные методы и программирование*. – 2018. – Т. 19. – С. 235-252.
13. Lisitsa V. Optimal discretization of PML for elasticity problems // *Electronical transactions on Numerical Analysis*. – 2008. – Vol. 30. – P. 258-277.
14. Lebedev M., Zhang Y., Sarmadivaleh M., Barifcani A., Al-Khdheewi E., Iglauer S. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 66. – P. 106–119.

15. Caspari E., Novikov M., Lisitsa V., Barbosa N. D., Quintal B., Rubino J. G., Holliger K. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: A numerical modelling study // *Geophysical Prospecting*. – 2019. – Vol. 67. – P. 935-955.

REFERENCES

1. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben // *The Leading Edge*. – 2020. – Vol. 39. – № 12. – P. 857-863.
2. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiery D., Kervevan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics*. – 2020. – Vol. 88. – P. 101899.
3. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J. 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales // *Chemical Geology*. – 2018. – Vol. 481. – P. 23-37.
4. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka, T., Henniges, J., Sopher, D., Zhang, F. The First post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66. – № 1. – P. 62-84.
5. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 5. – P. 75A147-75A164.
6. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wang Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 65. – № 6. – P. 1649-1661.
7. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J. G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. – № 1. – P. 125-143.
8. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – Vol. 41. – № 8. – P. 1533-1544.
9. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. i. low-frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – Vol. 28. – P. 168-178.
10. De la Puente J. Seismic wave simulation for complex rheologies on unstructured meshes / PhD thesis. – Ludwig-Maximilians Universitat, Munich, Germany, 2008. – 171 p.
11. Masson Y. J., Pride S. R. Finite-difference modeling of biot's poroelastic equations across all frequencies // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 2. – P. N33-N41.
12. Novikov M.A., Bazajkin YA.V., Lisica V.V., Kozyaev A.A. Modelirovanie volnovykh processov v treshchinovato-poristykh sredah: vliyanie svyaznosti treshchin na pogloshchenie sejsmicheskoy energii // *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. – 2018. – T. 19. – S. 235-252.
13. Lisitsa V. Optimal discretization of PML for elasticity problems // *Electronical transactions on Numerical Analysis*. – 2008. – Vol. 30. – P. 258-277.
14. Lebedev M., Zhang Y., Sarmadivaleh M., Barifcani A., Al-Khdheewi E., Iglaue S. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 66. – P. 106-119.
15. Caspari E., Novikov M., Lisitsa V., Barbosa N. D., Quintal B., Rubino J. G., Holliger K. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: A numerical modelling study // *Geophysical Prospecting*. – 2019. – Vol. 67. – P. 935-955.

© M. A. Новиков, В. В. Лисица, 2021

ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В КЛАССЕ МОДЕЛЕЙ С ПЛАВНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ УЭС

Владислав Андреевич Окунев

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 1, студент, e-mail: v.okunev@g.nsu.ru

Андрей Юрьевич Соболев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к. т. н., старший научный сотрудник, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

В статье представлено модельное описание геоэлектрического строения околоскважинного пространства для интерпретации данных электромагнитного каротажа в классе моделей с плавным и кусочно-линейным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС). Были использованы готовые модули расчета АТЛАС МФМ, и библиотека для python, разработанная в ИНГГ СО РАН.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, АТЛАС МФМ, ВИКИЗ, распределение УЭС

INVERSION OF ELECTROMAGNETIC LOGGING DATA IN A CLASS OF MODELS WITH A SMOOTH RESISTIVITY DISTRIBUTION

Vladislav A. Okunev

Novosibirsk State University, 1 Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russia, Student, e-mail: v.okunev@g.nsu.ru

Andrey Yu. Sobolev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

The article presents an alternative geoelectric model of the near-borehole space for electromagnetic logging data inversion in the class of models with a smooth and piecewise linear distribution of the electrical resistivity. We used ready-made ATLAS MPhM calculation modules, a library for python developed at the IPGG SB RAS.

Keywords: electromagnetic logging, ATLAS MPhM, VIKIZ, electrical resistivity distribution

В промысловой геофизике задача добычи и разведки залежей нефти становится все сложнее и сложнее, что требует развития новых подходов для обработки данных геофизических исследований в скважинах. В современном мире различные методы каротажа используют совместно, что позволяет добиться высокой точности оценок параметров среды. Традиционная обработка данных электрического каротажа основывается на модельном подходе, когда среду описывают небольшим числом параметров, затем по этим параметрам рассчи-

тывается синтетический сигнал, который сравнивается с измеренным, и параметры модифицируют таким образом, чтобы минимизировать это расхождение.

Самая распространенная модель для описания околоскважинного пространства — цилиндрически-слоистая. Среду разбивают на небольшое количество кольцевых зон с постоянной проводимостью. Системы, разработанные в ИНГГ СО РАН (например, EMF Pro), используют именно такой подход [1].

Разными исследователями было неоднократно показано, что для плавной модели можно подобрать эквивалентную ступенчатую модель как электрического, так и электромагнитного каротажа [2], однако эти эквивалентные модели разные для разных методов, а полученные оценки значений параметров систематически искажены.

Для повышения достоверности интерпретации данных каротажа в работе создается прототип системы инверсии данных электромагнитного каротажа в классе моделей с плавным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС) и опробуется на синтетических данных.

АТЛАС МФМ — разрабатываемая в ИНГГ система, которая позволяет моделировать механические и гидродинамические процессы в околоскважинном пространстве [3]. На рисунке 1 представлен интерфейс АТЛАС МФМ. Слева приводятся параметры среды, развертка времени, а в центре и справа — рассчитанные распределения минерализации, водонасыщенности и УЭС с расстоянием от оси скважины.

В системе АТЛАС МФМ по заданным параметрам пласта и режима бурения моделируются геомеханические и гидродинамические процессы в околоскважинном пространстве [4], асчитываются распределения солёности и водонасыщенности, по заданным петрофизическим зависимостям, например закону Арчи-Дахнова [5], производится расчет УЭС и затем рассчитываются синтетические сигналы электрических и электромагнитных каротажных зондов [3].

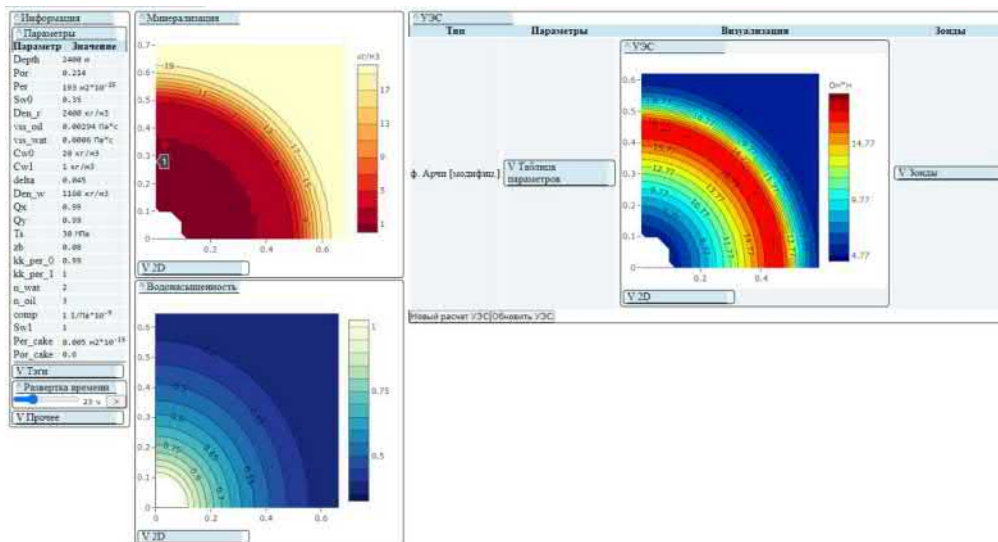


Рис. 1. Интерфейс системы АТЛАС МФМ.

Полученные таким образом псевдоэкспериментальные сигналы зондов интерпретировались как стандартным способом, когда распределение УЭС описывается кусочно-постоянной функцией, так и кусочно-линейными функций (рис. 2). В обоих случаях для заданного распределения УЭС рассчитываются значения фазовых и амплитудных сигналов ВИКИЗ (рис. 3), используя библиотеку расчета АТЛАС МФМ [6], и проводится подбор параметров моделей алгоритмом Нелдера-Мида в реализации библиотеки `Scipy.optimize` для языка Python [7] так, чтобы теоретические сигналы были близки к псевдоэкспериментальным. Из графика УЭС (рис. 2, слева) видно, что кусочно-линейная модель хорошо описывает сопротивление зоны проникновения. Но на графике удельной электрической проводимости, УЭП (рис. 2, справа) видно, что эта же модель плохо описывает окаймляющую зону. Кусочно-постоянная модель заметно грубее в обоих случаях.

На рис. 3 приведены сигналы зондов ВИКИЗ: разности фаз, пересчитанные в кажущееся сопротивление (слева), и относительные амплитуды (справа). Синие штрихи — это псевдоэкспериментальные значения показания зондов ВИКИЗ и погрешность измерения, желтая линия — теоретическая кривая для подобранной цилиндрически-слоистой модели, зеленая — для кусочно-линейной модели. Оптимальная цилиндрически-слоистая модель хуже описывает данные: отклонение теоретических значений зондов 0.5 и 0.7 м превышают погрешность измерений.

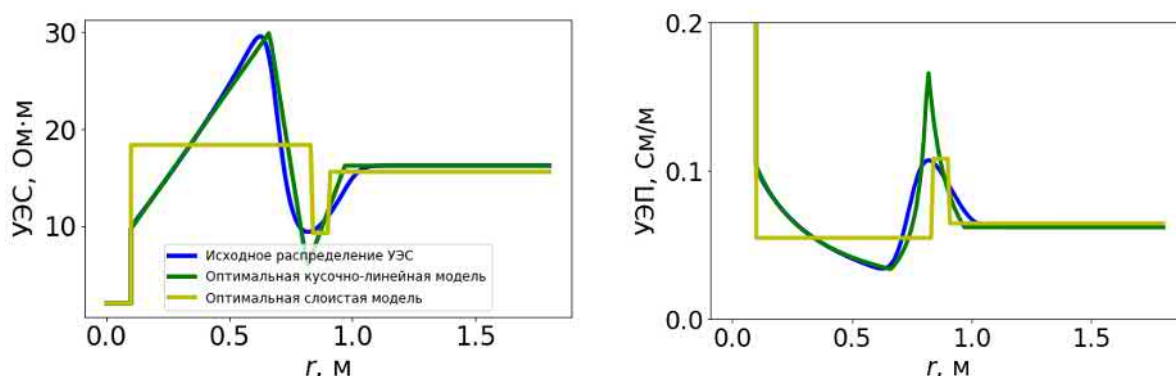


Рис. 2. Подобранные модели и исходное распределение УЭС (слева) и проводимости (справа) кусочно-линейной функцией

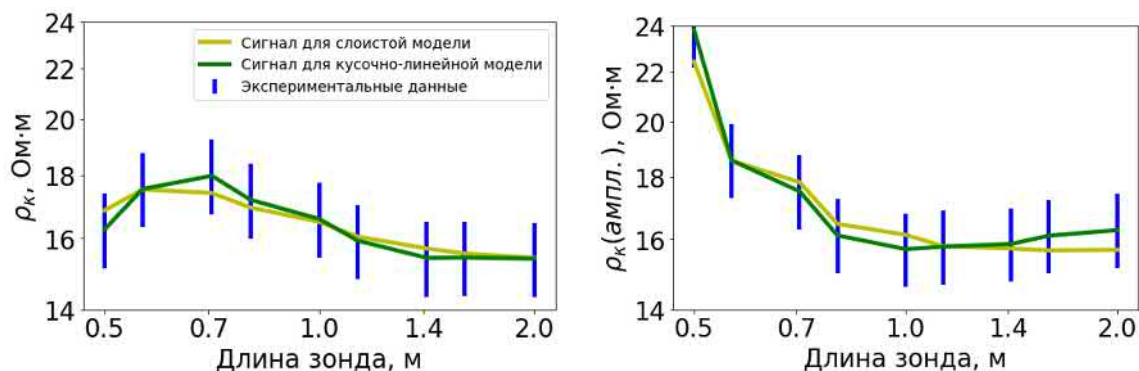


Рис. 3 Сигналы зондов ВИКИЗ для кусочно-линейной функции распределения

Исходя из вида кривых радиального распределения УЭС, получаемых в системе АТЛАС МФМ для широкого диапазона возможных параметров, был предложен вид сглаженной функции, описываемой тем же числом параметров, подобрано окно сглаживания. На рис. 4 приведены оптимальные слоистая и плавная модели, и исходное распределение УЭС. Также приведены рассчитанные сигналы зондов ВИКИЗ (рис. 5).

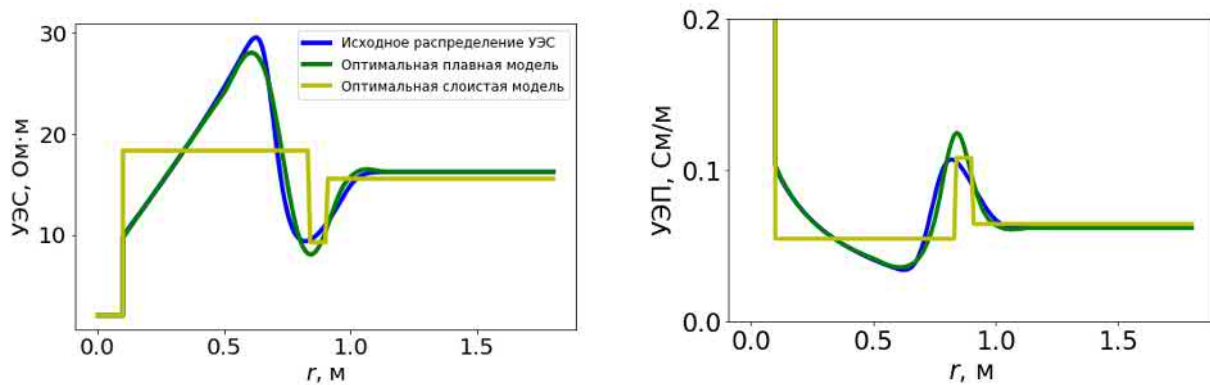


Рис. 4. Подобранные модели и исходное распределение УЭС (слева) и проводимости (справа) плавной функцией

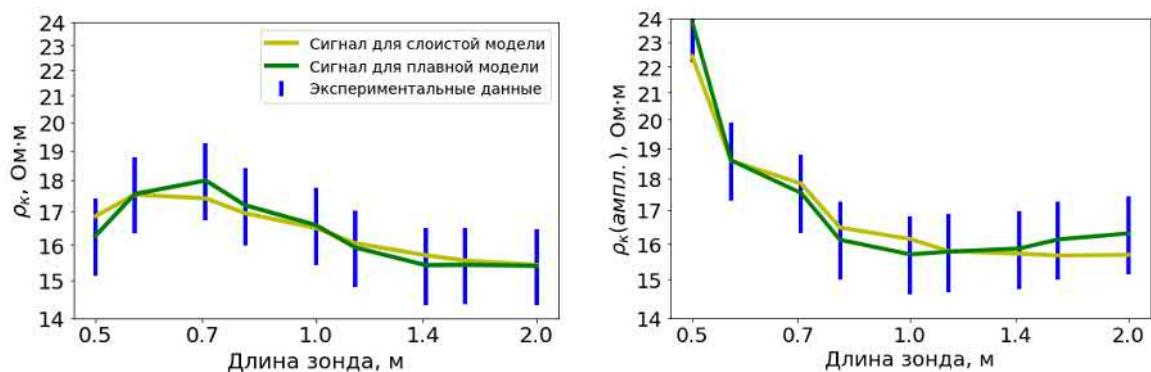


Рис. 5. Сигналы зондов ВИКИЗ для плавной функции распределения

Закключение. Создан в виде набора функций прототип системы инверсии данных электромагнитного каротажа в классе моделей с непрерывным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС). Рассчитаны синтетические сигналы ВИКИЗ в пласте заданных параметров, проведена интерпретация в классах кусочно-линейных и непрерывных (кусочно-линейной и плавной) функций распределения УЭС; показана возможность такого подхода.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ No 0331–2019–0015 «Реалистичные теоретические модели и программно–методическое обеспечение геоэлектрики гетерогенных геологических сред».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ельцов И.Н., Власов А.А., Соболев А.Ю., Фаге А.Н., Байкова М.А. Обработка, визуализация и интерпретация геофизических исследований в скважинах в системе EMF Pro: учеб. пособие / Новосибирск, 2016. – 94 с.
2. Антонов Ю. Н., Жмаев С. С. Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Метод. рекомендации. – 1979. – 104 с.
3. Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю., Суродина И.В. Многофизичные модели коллекторов: построение базы данных АТЛАС МФМ [Электронный ресурс] // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9-13 сентября 2019 г.): Тезисы докладов. – 2019. – С. 1-5.
4. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений. Геология и геофизика – 55(5-6) – 978-990.
5. Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций). НТВ Каротажник. – 2008. – № 10. – С. 81-101.
6. Черняк Н.М., Соболев А.Ю., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Построение цифровой модели коллектора с использованием реляционной базы многофизичных моделей прискважинной зоны. – 2020. – С. 710-717.
7. Gao F., Han L. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters // Computational Optimization and Applications – 2012. – 51:1. – P. 259-277.

REFERENCES

1. El'cov I.N., Vlasov A.A., Sobolev A.YU., Fage A.N., Bajkova M.A. Obrabotka, vizualizaciya i interpretaciya geofizicheskikh issledovanij v skvazhinah v sisteme EMF Pro: ucheb. posobie / Novosibirsk, 2016. – 94 s.
2. Antonov YU. N., ZHmaev S. S. Vysokochastotnoe indukcionnoe karotazhnoe izoparametricheskoe zondirovanie (VIKIZ). Metod. rekomendacii. – 1979. – 104 s.
3. Nesterova G.V., El'cov I.N., Sobolev A.YU., Surodina I.V. Mnogofizichnye modeli kollektorov: postroenie bazy dannyh ATLAS MFM [Elektronnyj resurs] // Geomodel'-2019: 21-ya konferenciya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdenij nefti i gaza (g. Gelendzhik, 9-13 sentyabrya 2019 g.): Tezisy dokladov. – 2019. – S. 1-5.
4. Yeltsov, I. N., Nazarova, L. A., Nazarov, L. A., Nesterova, G. V., Sobolev, A., & Epov, M. I. (2014). Geomechanics and fluid flow effects on electric well logs: Multiphysics modeling. Russian Geology and Geophysics – 55(5-6) – 775-783.
5. Nesterova G.V. Matematicheskie modeli elektroprovodnosti dvuhkomponentnyh sred i formula Archi (po materialam publikacij). NTV Karotazhnik. – 2008. – № 10. – S. 81-101.
6. CHernyak N.M., Sobolev A.YU., Nesterova G.V., El'cov I.N. Postroenie cifrovoj modeli kollektora s ispol'zovaniem relyacionnoj bazy mnogofizichnyh modelej priskvazhinnoj zony. – 2020. – S. 710-717.
7. Gao F., Han L. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters // Computational Optimization and Applications – 2012. – 51:1. – P. 259-277.

© В. А. Окунев, А. Ю. Соболев, 2021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОГО КОЛЛЕКТОРА

Михаил Николаевич Петров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3, инженер, тел. (383)330-49-53, e-mail: petrovmn.93@mail.ru

Галина Владимировна Нестерова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3, доктор технических наук, директор. Новосибирский государственный технический университет, зав. кафедрой геофизических систем, тел. (383)333-29-00, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

В работе рассматривается численная модель двухфазной фильтрации в трещиновато-пористом пласте, вскрываемом скважиной бурением на репрессии. Приводится оценка распределения пластового давления, водонасыщенности, концентрации солей в прискважинной зоне с учетом особенностей модели.

Ключевые слова: трещино-поровый коллектор, модель двойной пористости/проницаемости, фильтрация, деформирование

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE WELLBORE ZONE OF A FRACTURED RESERVOIR

Mikhail N. Petrov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: petrovmn.93@mail.ru

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, tel. (383)330-49-53, email: NesterovaGV@ipgg.nsc.ru

Igor N. Yeltsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Director, Novosibirsk State Technical University, Chair of the Geophysical Systems Department, tel. (383) (383)333-29-00, email: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

The paper considers a numerical model of two-phase filtration in a fractured reservoir, exposed by downhole drilling on overbalance. An assessment of the distribution of reservoir pressure, water saturation, salt concentration in the near-wellbore zone is given, taking into account the features of the model.

Keywords: fractured-porous reservoir, dual porosity / permeability model, filtration, deformation

Особенностью трещиновато-пористых коллекторов является наличие двух проводящих систем – блоков матрицы и трещин [1-8]. Таким образом для описания процессов фильтрации в такой среде необходимо разрабатывать модели двойной пористости/проницаемости. В настоящее время существует небольшое разнообразие таких моделей [1-8]. Различия заключаются в представлении геометрии блоков и трещин. Как например, распространённая модель Уоррена-Рута [2-5] описывает трещиновато-пористый пласт в виде блоков правильной формы, разделенных трещинами. Или модель Казени [1-3], где пласт имеет слоистую структуру с чередованием низкопроницаемых слоев (блоки) с высокопроницаемыми (трещины). Общая же идея заключается в том, что блоки и трещины имеют собственные значения пористости и проницаемости. При этом, поскольку проницаемость трещин, как правило, значительно превосходит проницаемость блоков, то основная фильтрация приходится именно на них. В то время как, блоки служат своего рода «источником» флюида в миграцию по трещинам [1,2].

Таким образом, в основные уравнения фильтрации добавляется функция «источника», которая характеризует обмен флюида между блоками и трещинами [1, 2]:

$$F = \rho k_1 (p_1 - p_2) G / \eta, \quad (1)$$

где ρ , η – обозначают плотность, и вязкость флюида, p_i – давление в блоках и трещинах (здесь и далее $i = 1$ – блоки матрицы, $i = 2$ – трещины), k_1 – проницаемость блоков.

Обмен характеризуется удельной поверхностью вещества блоков. Однако, установить точную геометрию блоков и трещинной системы геофизическими методами довольно затруднительно. При известных линейных размерах блока, ее можно определять, как [1,8]:

$$G = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2} \right), \quad (2)$$

где l_i – линейные размеры блоков в соответствующих направлениях.

На основании выше сказанного, в работе рассматривается модель нефтенасыщенного трещиновато-пористый пласта мощностью h , залегающего на глубине H , представленного в виде двух сплошных сред с различными значениями пористости ϕ_i и проницаемости k_i , которые определяют пространство трещин и блоков, связанные обменом флюида между собой.

Кроме того, любые процессы, связанные с разработкой месторождения, так или иначе приводят к изменению пластового давления, что, соответственно, приведет к изменениям в поле напряжений и деформированию пласта. Как

показывают исследования [9, 10], такие процессы отразятся на фильтрационных характеристиках породы.

Таким образом, в модели вводится зависимость коэффициента проницаемости от эффективного напряжения, которая предполагается в виде [11-16]:

$$k_i = k_i^0 \exp[\gamma(\sigma + P)], \quad (4)$$

где k_i^0 – начальная проницаемость блоков и трещин, σ - эффективное напряжение в пласте, $P = (1 - B)p_1 + Bp_2$, B - параметр Био.

С учетом сказанного ранее, фильтрация двухфазного флюида в такой постановке модели будет описываться уравнениями массопереноса с учетом обмена флюида между блоками и трещинами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi_i \rho S_{iw})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho S_{iw} \vec{v}_i) - (-1)^i S_{iw} F &= 0, \\ \frac{\partial(\phi_i \rho S_{ip})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho S_{ip} \vec{v}_i) - (-1)^i S_{ip} F &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

законом Дарси, с учетом деформирования среды:

$$\begin{aligned} \vec{v}_{iw} &= -(k_i / \eta_w) S_{iw}^{nw} \operatorname{grad}(p_i), \\ \vec{v}_{ip} &= -(k_i / \eta_{ip}) S_{ip}^{np} \operatorname{grad}(p_i), \end{aligned} \quad (6)$$

уравнения состояния флюида:

$$\rho(p_i) = \rho_0(1 + \beta p_i), \quad (7)$$

приращения пористости и давления, связанных линейной зависимостью:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_1^0 + \alpha_{11} \Delta p_1 - \alpha_{12} \Delta p_2, \\ \phi_2 &= \phi_2^0 - \alpha_{21} \Delta p_1 + \alpha_{22} \Delta p_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где коэффициенты α_{11} , α_{12} , α_{21} и α_{22} – сжимаемости матрицы и трещин.

Систему (5) - (8) можно привести к двум параболическим уравнениям:

$$\begin{aligned} (\beta \phi_1^0 + \alpha_{11}) \frac{\partial p_1}{\partial t} - \alpha_{21} \frac{\partial p_2}{\partial t} &= \frac{k_1^0}{\beta \eta_p} \operatorname{div}(K(s) Q(S_{i1}, S_{1p}) \operatorname{grad} p) - F, \\ (\beta \phi_2^0 + \alpha_{22}) \frac{\partial p_2}{\partial t} - \alpha_{12} \frac{\partial p_1}{\partial t} &= \frac{k_2^0}{\beta \eta_p} \operatorname{div}(K(s) Q(S_{21}, S_{2p}) \operatorname{grad} p) + F, \end{aligned} \quad (7)$$

где ϕ_i - пористость, S_{iw} - водонасыщенность, S_{ip} - нефтенасыщенность, $S_{iw} + S_{ip} = 1$, k_i - проницаемость, η_i - вязкость, p_i - давление, ρ - плотность, v_i - скорость, $Q(S_{i1}, S_{ip}) = S_{iw} + \eta_w S_{ip} / \eta_p$, β - сжимаемость флюида.

При этом изменение водонасыщенности описывается как:

$$\phi_i^0 \frac{\partial S_{iw}}{\partial t} = \frac{k_i^0}{\eta_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r K(s) S_{iw}^{nw} \frac{\partial p_i}{\partial r} \right) - S_{iw} F. \quad (8)$$

Уравнение солепереноса:

$$\phi_i^0 \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{k_i}{\eta_w} S_{iw}^{nw} \frac{\partial p_i}{\partial r} \frac{\partial C_i}{\partial r}. \quad (9)$$

Для описания деформационных процессов используются классические уравнения теории упругости: уравнение равновесия и закон Гука. Для осесимметричного случая в цилиндрической системе координат:

уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0, \quad (10)$$

закон Гука

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu) u_{r,r} + \lambda u_r / r - P, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda u_{r,r} + (\lambda + 2\mu) u_r / r - P, \end{aligned} \quad (11)$$

где u_r - смещение; σ_{rr} и $\sigma_{\theta\theta}$ - компоненты тензора напряжений.

Рассмотрим случай, когда описанный выше пласт вскрывают скважиной радиусом r_0 под давлением, превышающим пластовое $p_w > p_c$. Положим, что вскрытие пласта произошло мгновенно, и до этого обе системы (трещины и блоки) находились в равновесном состоянии, что дает нам начальные условия как:

$$\begin{aligned} p_1(r, 0) &= p_2(r, 0) = p_c, \\ S_{w1}(r, 0) &= S_{w2}(r, 0) = S_w^0, \\ C_1(r, 0) &= C_2(r, 0) = C^0. \end{aligned} \quad (12)$$

где p_c - пластовое давление, S_w^0 , C^0 - соответственно начальные пластовые значения водонасыщенности и солёности.

Проницаемость трещин значительно превышает проницаемость блоков, при этом как правило, трещинная пористость ниже пористости блоков. Для расчетов предположим, что блоки имеют следующие фильтрационные параметры $\phi_1 = 15\%$, $k_1 = 5$ мД, а для трещин соответственно $\phi_2 = 5\%$, $k_2 = 30$ мД. Превышение давления в скважине над пластовым составляет $p_w = 0.1 p_c$. Начальная водонасыщенность и соленость в пласте $S_w^0 = 0.15$, $C^0 = 20$ г/л, а для бурового раствора положим соответственно $S_w^0 = 1$, $C_w^0 = 1$ г/л.

Рассмотрим два случая. В первом, будем считать, что блоки имеют сообщение со скважиной, тогда имеем $S_{w1}(r_0, t) = 1, C_1(r_0, t) = C_w^0$, кроме того будем учитывать влияние обмена между блоками и трещинами, то есть также два случая, когда $G = 0.01$ и $G \approx 0$. В другом случае считаем, что блоки непроницаемы и не участвуют в процессе фильтрации, то есть $S_{w1}(r_0, t) = S_w^0, C_1(r_0, t) = C^0$ и нет обмена флюида.

На рис. 1 показаны распределения давления в блоках зеленой линией и трещинах, соответственно - синей линией в различные моменты времени 5 и 20 часов. Рис. 1.1 соответствует случаю, когда имеется обмен флюида между блоками и трещинами, что соответствует $G = 0.01$. Рис. 1.2 иллюстрирует ситуацию, когда обмен флюида между блоками и трещинами очень мал, т.е. $G \approx 0$. При этом на обоих рисунках красной пунктирной линией показано распределение давления в трещинах в случае непроницаемых блоков. Как видно основная фильтрация происходит по системам трещин, за счет их высокой проницаемости, при этом в случае низкого обмена флюида между системами, влияние блоков практически не заметно. Но при его наличии, за счет перетока, скорость фильтрации в трещинах падает.

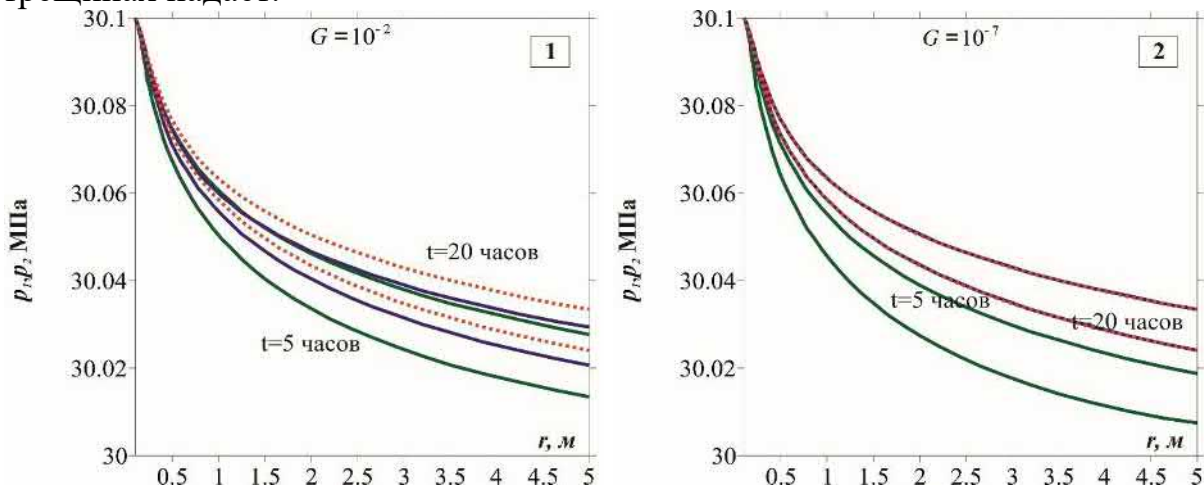


Рис. 1. Распределение давления в блоке (зеленый) и трещинах (синий) в различные моменты времени.

На рис. 2 показано распределение водонасыщенности в блоках и трещинах в случае, когда блоки имеют сообщение со скважиной, в различные моменты времени для случаев, когда $G = 0.01$ и $G \approx 0$.

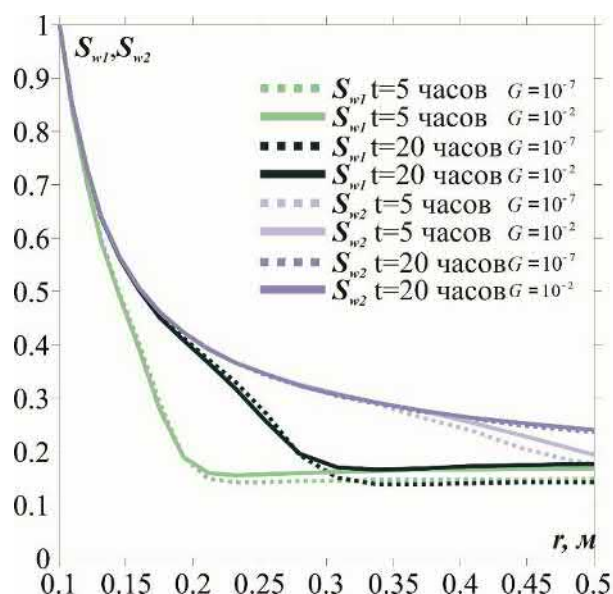


Рис. 2. Распределение водонасыщенности в блоках и трещинах в различный момент времени.

На рис. 3 показано радиальное распределение концентрации солей для блоков зеленой линией и трещин, соответственно - синей в различные моменты времени для случаев, когда есть приток $G = 0.01$ и практически отсутствует $G \approx 0$

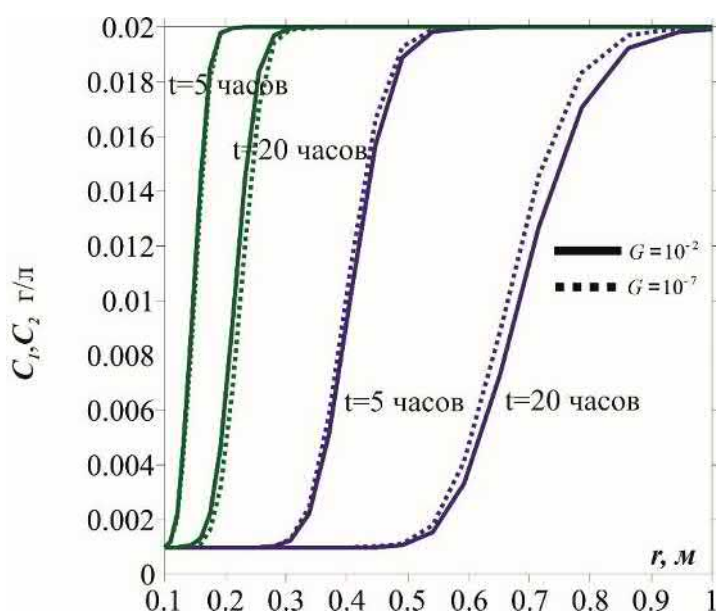


Рис. 3. Распределение концентрации солей для блоков и трещин в различные моменты времени

Показанная в работе модель позволяет оценить совместные гидродинамические и геомеханические процессы в прискважинной зоне трещиновато-пористого коллектора, вскрытого бурением на репрессии. Полученные

распределения давления показывают, что основная фильтрация происходит по системам трещин, при этом влияние блоков тем сильнее, чем выше флюидообмен между ними и трещинами, который определяется их удельной поверхностью и проницаемостью. Также были приведены радиальные распределения водонасыщенности и концентрации солей, по которым в дальнейшем можно будет построить профиль удельного электрического сопротивления прискважинной зоны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0015 «Реалистичные теоретические модели и программно-методическое обеспечение геоэлектрики гетерогенных геологических сред»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ПММ. – 1960. – Т.24, вып.5. – С.852-864.
2. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
3. Warren J. E., Root P. E. The behavior of naturally fractured reservoirs // Soc. Petrol. Eng. Journal – 1963 – Vol. 3. P. 245–255.
4. Куштанова Г. Г. Некоторые особенности нестационарной фильтрации в трещиновато-пористых коллекторах // Нефтегазовое дело. – 2007. – №1 – С. 1-9.
5. Черепанов С.С. Комплексное изучение трещиноватости карбонатных залежей методом Уоррена-Рута с использованием данных сейсмофациального анализа (на примере Турне-Фаменской залежи озерного месторождения). // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 6-12.
6. Щипанов А.А. Модель двухфазной фильтрации в деформируемом трещиновато-пористом пласте // Вестник ПНИПУ. – Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2004 – Т. 5. – С. 92-98.
7. Jing Lu, Jinbao Qu A new dual-permeability model for naturally fractured reservoirs // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 November , Abu Dhabi, UAE. – 2017. – P. 20. – SPE-188553-MS
8. Presho M., Wo S., Ginting V. Calibrated dual porosity, dual permeability modeling of fractured reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – № 77. – P. 326–337.
9. Chabezloo, S., Sulem, J., Guedon, S., Martineau, F. Effective stress law for the permeability of limestone // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2009. – Vol. 46. – №2. – P. 297-306.
10. Zoback, M.D., Nur, A. Permeability and effective stress // Bulletin of American Association of Petroleum Geol. – 1975. – Vol. 59. – P. 154-158.
11. Назаров Л.А., Назарова Л.А. Эволюция напряжений и проницаемости трещиновато-пористого породного массива в окрестности добычной скважины // ФТПРПИ. – 2016. – № 3. – С. 11-20.
12. Назарова Л.А., Петров М.Н. Эволюция геомеханических и гидродинамических полей в окрестности добывающей скважины в деформируемом трещиновато-пористом породном массиве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 4 т. – 2017. – Т. 3. – С. 221-226.

13. Петров М.Н., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Назарова Л.А. Численное моделирование расходных характеристик добывающей скважины в трещиновато-пористом пласте с учетом деформационных процессов // Каротажник. – 2019. – № 2 (296). – С. 34-44.
14. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // Доклады РАН. – 2012. – Т. 442, №6. – С. 677-680.
15. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 5. – С. 978-990.
16. Нестерова, Г.В., Ельцов, И.Н., Киндюк, В.А., Назаров, Л.А., Назарова, Л.А. Моделирование гидродинамических процессов в напряжённо-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. Сборник статей. – М.: «ЕАГЕ Геомодель». – 2014. – С. 327-344.

REFERENCES

1. Barenblatt G.I., Zheltov YU.P., Kochina I.N. Ob osnovnykh predstavleniyakh teorii odnorodnykh zhidkostey v treshchinovatykh porodakh // PMM. - 1960. - T.24, vyp.5. - S.852-864.
2. Golf-Rakht T.D. Osnovy neftepromyslovoy geologii i razrabotki treshchinovatykh kollektorov. - М.: Nedra, 1986. - 608 s.
3. Uorren Dzh. E., Rut P. E. Povedeniye treshchinovatykh kollektorov // Sots. Benzin. Eng. Zhurnal - 1963 - Tom. 3. S. 245–255.
4. Kushtanova G. G. Nekotoryye osobennosti nestatsionarnoy svyazi v treshchinovato-poristykh kollektorakh // Neftegazovoye delo. - 2007. - №1 - S. 1-9.
5. Cherepanov S.S. Kompleksnoye izucheniye treshchinovatosti karbonatnykh zalezhey metodom Uorrena-Ruta s ispol'zovaniyem dannykh seysmofatsial'nogo analiza (na primere Turne-Famenskoy zalezhi ozernogo mestorozhdeniya). // Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo. - 2015. - № 14. - S. 6-12.
6. Shchipanov A.A. Model' dvukhfaznoy reaktsii v deformiruyemom treshchinovato-poristom plaste // Vestnik PNIPU. - Geologiya, neftegazovoye i gornoye delo. - 2004 g. - T. 5. - S. 92-98.
7. TSzin Lu, TSzin'bao Tsyuy Novaya model' dvoynoy pronitsayemosti dlya treshchinovatykh kollektorov // Mezhdunarodnaya neftyanaya vystavka i konferentsiya v Abu-Dabi, 13-16 noyabrya, Abu-Dabi, OAE. - 2017. - S. 20. - SPE-188553-MS.
8. Presho M., Vo S., Ginting V. Kalibrovannaya dvoynaya poristost', modelirovaniye dvoynoy pronitsayemosti treshchinovatykh kollektorov // Zhurnal neftyanoy nauki i tekhniki - 2011 - № 77. S. 326–337.
9. Chabezloo, S., Sulem, J., Guedon, S., Martineau, F. Effektivnyy zakon napryazheniya dlya pronitsayemosti izvestnyaka // Int. J. Rock Mech. Minimum Sci - 2009. - Vyp. 46, №2. S. 297-306.
10. Zobak M.D., Nur A. Pronitsayemost' i effektivnyy stress // Vestnik Amerikanskoy asotsiatsii neftnykh geologov. - 1975. - Vyp. 59. S. 154-158.
11. Nazarov L.A., Nazarova L.A. Evolyutsiya napryazhennosti i pronitsayemosti treshchinovato-poristogo porodnogo massiva v okrestnostyakh dobyvayushchey skvazhiny // FTPrPI. - 2016. - № 3. - S. 11-20.
12. Nazarova L.A., Petrov M.N. Evolyutsiya geomekhanicheskikh i gidrodinamicheskikh poley v okrestnostyakh dobyvayushchey skvazhiny v deformiruyemom treshchinovato-poristom porodnom massive // Interekspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunar. nauch. kongr. (g. Novosibirsk, 17-21 aprelya 2017 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovaniye. Gornoye delo. Poisk i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geoekologiya": Sbornik materialov v 4 t. - 2017. - T. 3. - S. 221-226.

13. Petrov M.N., Nesterova G.V., Yel'tsov I.N., Nazarova L.A. Chislennoye modelirovaniye raskhodnykh kharakteristik dobyvayushchey skvazhiny v treshchinovato-poristom plaste s uchetom deformatsionnykh protsessov // Karotazhnik. - 2019. - № 2 (296). - S. 34-44
14. Yel'tsov I.N., Nazarov L.A., Nazarova L.A., Nesterova G.V., Epov M.I. Interpretatsiya geofizicheskikh izmereniy v skvazhinakh s uchetom gidrodinamicheskikh i geomekhanicheskikh protsessov v zone proniknoveniya // Doklady RAN. - 2012. - T. 442, №6. - S. 677-680.
15. Yel'tsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.YU., Epov M.I. Skvazhinnaya geoelektrika neftegazovykh plastov, raznorodnykh po repressii davleniya v neravnokomponentnom pole napryazheniy // Geologiya i geofizika. - 2014. - T. 55, № 5. - S. 978-990.
16. Nesterova, G.V., Yel'tsov, I.N., Kindyuk, V.A., Nazarov, L.A., Nazarova, L.A. Modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov v napryazhenno-deformirovannoy srede i geofizicheskikh prilozheniyakh // Petrofizika slozhnykh kollektorov: problemy i perspektivy 2014. Sbornik statey. - M.: «YEAGE Geomodel'», 2014. - S. 327-344.

© М. Н. Петров, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, 2021

БЫСТРОЕ РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА В ДВУМЕРНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МОДЕЛЯХ ПРИСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Алексей Михайлович Петров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник; АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, геолог 1 категории отдела геологии Западной Сибири, тел. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Кирилл Николаевич Даниловский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник; АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, инженер 1 категории отдела геолого-экономического анализа, тел. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Василий Васильевич Еременко

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: EremenkoVV@ipgg.sbras.ru

В статье рассматриваются результаты применения нового подхода к моделированию данных электрокаротажа нефтегазовых скважин с гальваническим и индукционным возбуждением, ориентированного на увеличение полноты извлечения информации о геологической среде и повышение оперативности интерпретации. Привлечение современных технологий машинного обучения позволяет разрабатывать алгоритмы моделирования сигналов электрокаротажа в детальных двумерных анизотропных геоэлектрических моделях. Разработанные алгоритмы характеризующиеся качественно новым уровнем быстродействия по сравнению с применяемыми сегодня подходами.

Ключевые слова: нефтяные коллекторы, геофизические исследования скважин, электрокаротаж, экспресс-моделирование, детальные геоэлектрические модели, машинное обучение, свёрточные нейронные сети

FAST RESISTIVITY LOGS SIMULATION IN TWO-DIMENSIONAL ANISOTROPIC NEAR-WELLBORE SPACE MODELS BASED ON NUMERICAL SIMULATION AND MACHINE LEARNING

Aleksei M. Petrov

Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyga ave., Junior Researcher; Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67, Krasny ave., geologist of the 1st category of the Western Siberia geology department, tel. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Kirill N. Danilovskiy

Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga ave., Junior Researcher; 67 Krasny ave., engineer of the 1st category of the geological and economic analysis department, tel. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Vasiliy V. Eremenko

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, student, tel. (383)330-45-05, e-mail: EremenkoVV@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of a new approach application for oil well galvanic and induction resistivity logs simulation to enhance the efficiency of geological environment parameters evaluation and to speed up the interpretation. The use of modern machine learning technologies allows us to create algorithms for resistivity logs simulation in high-detailed two-dimensional anisotropic geoelectric models. The developed algorithms are characterized by a qualitatively new level of performance compared to the approaches used today.

Keywords: oil reservoirs, well logging, resistivity logging, express-simulation, high-detailed geoelectric models, machine learning, convolutional neural networks

Введение

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) – одна из важнейших характеристик нефтяного коллектора, которая напрямую связана с его нефтенасыщенностью. Для оценки УЭС прискважинного пространства разработано большое количество методов каротажа на постоянном и переменном токе, при этом на территории СНГ широко применяются боковое каротажное зондирование (БКЗ), фокусированный боковой (БК) и низкочастотный индукционный (ИК) каротаж. На практике, из-за недостаточной производительности вычислительных устройств используются упрощенные подходы к интерпретации таких измерений, не учитывающие влияния вмещающих пород, анизотропии электрофизических свойств, неровностей стенки скважины, вытеснения непроводящим корпусом прибора бурового раствора и т.д.

В последние годы в самых различных областях науки и техники наблюдается активное внедрение технологий машинного обучения. Известны исследования по моделированию сигналов каротажных приборов с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [1, 2], однако представленные в этих работах алгоритмы работают в приближении вертикальной однородности среды, что делает невозможным их применение при интерпретации данных, измеренных в сложных разрезах. Расчет полноценных каротажных диаграмм в таких условиях могут обеспечить алгоритмы на основе свёрточных ИНС, которые успешно применяются в задачах обработки каротажных данных [3, 4].

В работе предлагается подход к экспресс-моделированию сигналов электрокаротажа на основе свёрточных ИНС, позволяющий конструировать алгоритмы решения прямых задач для конкретных геофизических приборов в детальных двумерных анизотропных моделях прискважинного пространства.

Обучающие выборки

Работоспособность и преимущества подхода демонстрируются на примере широко распространенного каротажного комплекса К1А-723 (НПФ «Геофизика», Уфа), рассчитанных с помощью конечно-элементного алгоритма комплекса AlondraWL [5] с учётом влияния скважины и вытеснения прибором более электропроводящего бурового раствора. Сигналы рассчитываются в моделях, сгенерированных специальным образом для учёта особенностей свойств среды и электрокаротажных сигналов.

Входные данные в обучающих выборках представлены пластовыми моделями с предзаданным распределением свойств. Каждая модель состоит из трёх типов слоёв: изотропных непроницаемых, изотропных проницаемых и анизотропных непроницаемых.

В общем случае скважина характеризуется радиусом ($r_{скв}$) и УЭС ($\rho_{скв}$) напротив каждого пласта. Проницаемые слои параметризуются значениями УЭС зоны проникновения ($\rho_{зп}$), неизменной части пласта ($\rho_{пласт}$), глубиной проникновения (h) и мощностью слоя (H), непроницаемые изотропные – значением УЭС (ρ) и мощностью, непроницаемые анизотропные – значениями горизонтального (ρ_h) и вертикального (ρ_v) УЭС и мощностью. Сигналы метода ИК нечувствительны к вертикальному УЭС отложений, что позволяет сократить обучающую выборку для этого метода.

В таблице 1 приведены диапазоны параметров геоэлектрических моделей на примере обучающей выборки для решения прямой задачи БК.

В большей части моделей ширина ЗП, натуральные логарифмы УЭС и толщин пластов распределялись равномерно с заданием минимального и максимального значений УЭС. Работоспособность алгоритмов на краях области аппроксимации требует дополнительного изучения, однако изначально широкий диапазон параметров с запасом охватывает условия, характерные для терригенного разреза на большом количестве месторождений и разных условий вскрытия. Также для увеличения точности в более узком целевом диапазоне параметров в обучающую выборку были добавлены модели, имитирующие конкретные геологические условия на месторождениях Западной Сибири.

Таблица 1

Диапазоны параметров геоэлектрических моделей из обучающей выборки
для решения прямой задачи БК

Скважина	$0.1 < \rho_{скв} < 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}, 0.07 < r_{скв} < 0.25 \text{ м}$	
Непроницаемые пласты	$0.2 < \rho_h < 2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $0.9 \cdot \rho_h < \rho_v < 9 \cdot \rho_h \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $0.1 < H < 10 \text{ м}$	
Проницаемые пласты	Зона проникновения	Пласт
	$0.95 \cdot \rho_{скв} < \rho < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $0.01 < h < 1.5 \text{ м}$	$0.5 < \rho < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $0.1 < H < 10 \text{ м}$

Архитектура и обучение ИНС

В качестве базовой архитектуры, используемой для разработки алгоритмов решения прямых задач электрокаротажа выбрана полносвёрточная ИНС, что позволяет учитывать влияние вмещающих пород и рассчитывать сигналы зондов в моделях произвольной мощности. Архитектура ИНС включает набор блоков, состоящих из свёрточных слоев (Conv) и слоев пакетной нормализации (BatchNorm), а также слоя подвыборки (MaxPool) для получения сигналов на выходе с шагом дискретизации, соответствующим реальным скважинным измерениям. Для зондирующих установок, представленных набором однотипных зондов, предлагается использовать общую предобработку входных данных. Это позволяет увеличить быстродействие алгоритма, а также сократить время обучения ИНС. Пример архитектуры ИНС для решения прямой задачи БКЗ приведен на рис. 1.

Обучение ИНС осуществляется алгоритмом Nadam [6] с последовательным уменьшением номинального шага градиентного спуска в зависимости от номера итерации для более эффективного поиска оптимальных значений свёрточных фильтров.

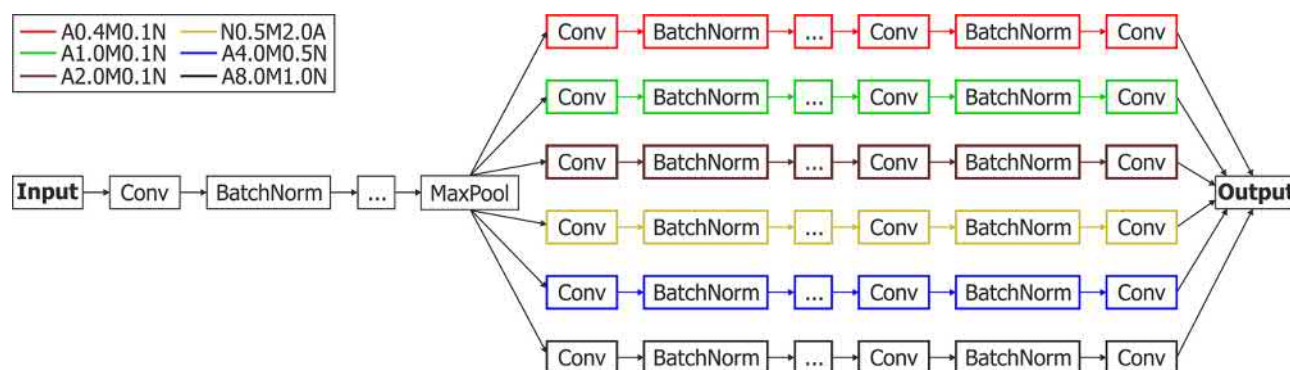


Рис. 1. Архитектура ИНС для независимого расчёта сигналов шести зондов БКЗ

Результаты

Точность моделирования сигналов с использованием алгоритмов на основе ИНС оценивалась как на тестовом наборе данных («валидационная выборка»), так и на моделях терригенных отложений, полученных при помощи инверсии реальных данных. Точность расчета сигналов БК и БКЗ оценивалось с использованием относительной невязки сигналов δ , сигналов ИК – с использованием абсолютной невязки f .

На рис. 2 приведено сравнение сигналов, рассчитанных с использованием численных и нейросетевых алгоритмов в детальной модели прискважинного пространства, характеризующейся высоким контрастом УЭС.

Как видно из приведенных данных, разработанные алгоритмы обеспечивают высокую точность аппроксимации сигналов: среднее значение невязки $\delta_{БКЗ}$

для данных БКЗ составляет 2.5%, лишь в отдельных точках превышая 5%. Данные БК в контрастном разрезе характеризуются более быстрым изменением с глубиной по сравнению с БКЗ, что отражается в увеличении средней поточечной невязки $\delta_{БК}$ до 3%. Средняя абсолютная невязка f рассчитанных данных ИК составляет 3.2 мСм/м, что существенно ниже погрешности измерений реальным прибором. В менее контрастных по сравнению с рассматриваемой моделью условиях точность расчета дополнительно увеличивается для всех методов. Таким образом, в характерных для терригенного разреза условиях достигнута практически значимая точность моделирования сигналов, позволяющая использовать разработанные алгоритмы для обработки практических данных без ущерба достоверности получаемых моделей среды.

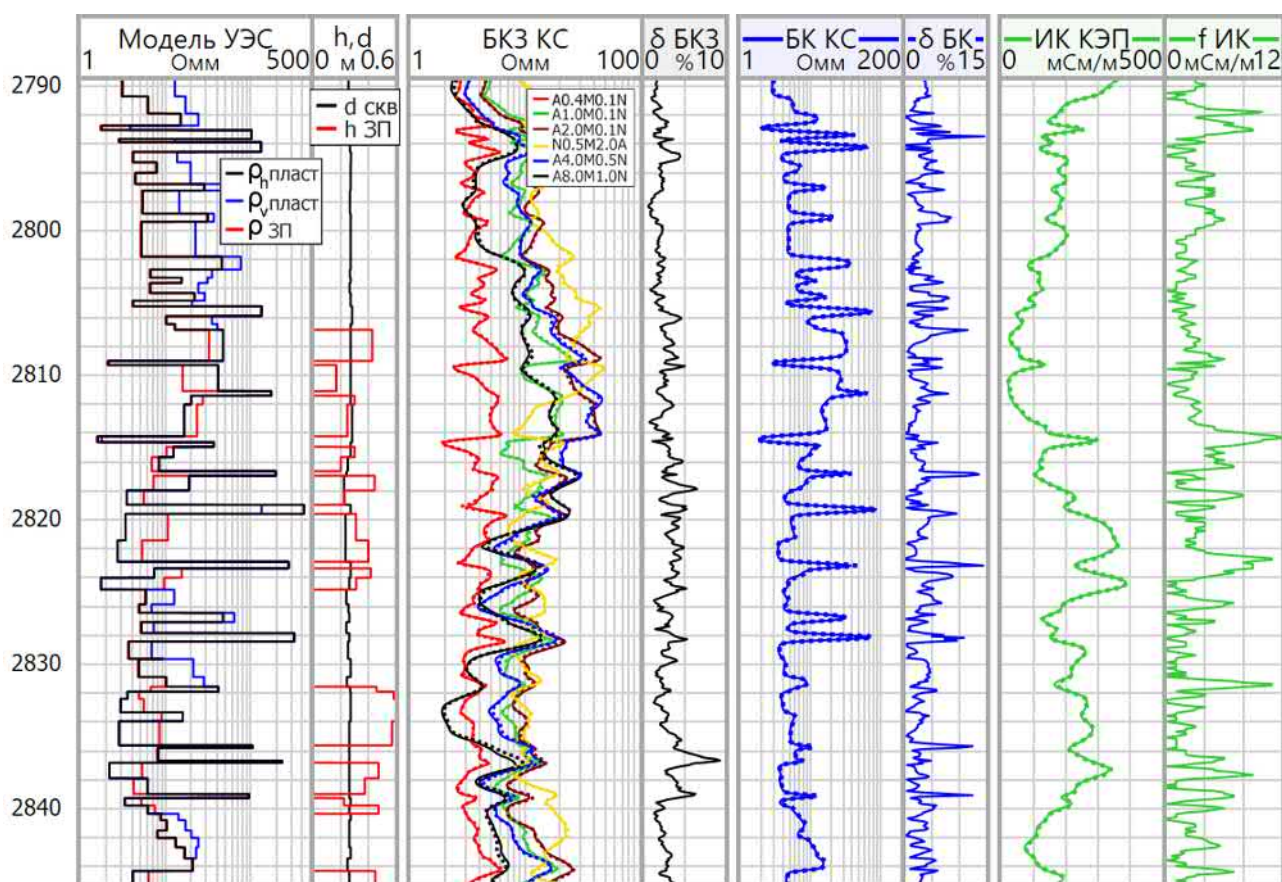


Рис. 2. Сравнение сигналов электрокаротажа, рассчитанных с использованием численных алгоритмов (пунктир) и с помощью ИНС (сплошные линии) в детальной двумерной анизотропной модели прискважинного пространства с высоким контрастом УЭС

Оценка производительности расчетов производилась в наборе моделей прискважинного пространства различной сложности с использованием рабочей станции на базе процессора Ryzen 9 3900X. Сигналы БК и ИК моделировались с использованием параллельных вычислений на всех 12 ядрах процессора. Численный алгоритм расчета сигналов БКЗ использует одно физическое ядро для

расчета каждого зонда. В табл. 2 приведены средние результаты по 10 замерам времени расчета профиля измерений протяженностью 131 м с шагом измерений 0.1 м (1301 точка по глубине) в модели, показанной на рис. 2.

Таблица 2

Производительность численных и нейросетевых алгоритмов в модели, приведенной на рис. 2

Каротажный метод	Численные алгоритмы (время расчета, с)		Нейросетевые алгоритмы (время расчета, с / ускорение, раз)	
	$d_{скв} = const$	$d_{скв} \neq const$	$d_{скв} = const$	$d_{скв} \neq const$
БКЗ (6 зондов)	3.21	5.51	0.094 / 34.1	0.094 / 58.6
ИК (1 зонд)	28.15	35.2	0.067 / 420.1	0.067 / 535.4
БК (1 зонд)	95.1	251.4	0.047 / 845.7	0.047 / 5349

Как видно из приведенных в таблице данных, разработанные нейросетевые алгоритмы обеспечивают быстроедействие в десятки-тысячи раз выше, чем численные. При этом, в отличие от численных алгоритмов, время расчета сигналов не зависит от геометрической сложности модели, а сами алгоритмы значительно менее требовательны к аппаратной части и обеспечивают сопоставимую с приведенной в таблице скорость расчета на менее производительных компьютерах. Аналогичные результаты получены для всех рассмотренных моделей.

Заключение

Предложен новый алгоритмический подход к моделированию сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях прискважинного пространства на основе сверхточных искусственных нейронных сетей. Подход позволяет разрабатывать алгоритмы решения прямых задач для конкретных методов скважинной электрометрии, характеризующиеся качественно более высокой производительностью вычислений по сравнению с алгоритмами на основе конечно-разностного и конечно-элементного подходов при небольшой потере точности.

На основе предлагаемого подхода программно реализованы алгоритмы экспресс-моделирования сигналов бокового каротажного зондирования, фокусированного бокового и низкочастотного индукционного каротажей в двумерных анизотропных средах блочного строения с малыми толщинами пластов, радиальным изменением УЭС, учетом неровностей стенки скважины и вытеснения бурового раствора корпусом прибора. Проведено тестирование разработанных алгоритмов с оценкой точности моделирования сигналов в характерных для терригенного разреза моделей. Установлено, что предлагаемые алгоритмы могут быть использованы для ускорения обработки и количественной интерпретации с применением инверсии на основе итерационной минимизации невязки без ущерба достоверности итоговых моделей среды.

Кардинальное увеличение скорости моделирования сигналов электрокаротажа открывает возможности для повышения оперативности и достоверности результатов их интерпретации за счет использования моделей среды, адекватных по сложности актуальным сегодня целевым геологическим объектам. При этом, предлагаемый подход к моделированию электрокаротажных сигналов является гибким и может в дальнейшем быть адаптирован для решения широкого круга геофизических задач.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного Проекта № 20-45-543003 «Методико-алгоритмическое обеспечение количественной интерпретации данных электрокаротажа нефтяных скважин на основе технологий машинного обучения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболев А.Ю., Ельцов И.Н., Симонов К.В. Нейросетевое моделирование сигналов ВИКИЗ // Каротажник. – 2006. – № 9. – С. 136-152.
2. Агбаш И.А., Соболев А.Ю. Построение быстрых аналогов прямых и обратных задач бокового электрического зондирования скважин с использованием технологии нейронных сетей // ГЕО-Сибирь-2016. Т. 1. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сб. материалов XII Международного научного конгресса, Новосибирск, 18-22 апреля 2016 г. – 2016. – С. 196-200.
3. Логинов Г.Н., Петров А.М. Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика. – 2019. – т. 60. – № 11. – С. 1650-1657.
4. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – Paper 15.
5. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // ГЕО-Сибирь-2018. Т. 4. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г. – 2018. – С. 90-98.
6. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Электронный ресурс] URL: <https://openreview.net/pdf/OM0jvwB8jIp57ZJjtNEZ.pdf>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sobolev A.Yu., Yeltsov I.N., Simonov K.V. Nejrosetevoe modelirovanie signalov VIKIZ // Karotazhnik. – 2006. – № 9. – S. 136-152.
2. Agbash I.A., Sobolev A.Yu. Postroenie bystrykh analogov pryamyh i obratnykh zadach bokovogo elektricheskogo zondirovaniya skvazhin s ispol'zovaniem tekhnologii nejronnyh setej // GEO-Sibir'-2016. T. 1. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Geoeкологиya: sb. materialov XII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 18-22 aprelya 2016 g. – 2016. – S. 196-200.

3. Loginov G.N., Petrov A.M. Avtomaticheskoe vydelenie geoelektricheskikh granic po dannym bokovogo karotazhnogo zondirovaniya s pomoshch'yu glubokoj svertochnoj nejronnoj seti // Geologiya i geofizika. – 2019. – t. 60. – № 11. – S. 1650-1657.

4. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – Paper 15.

5. Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V. Bystraya sovместnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovanij s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya // GEO-Sibir'-2018. T. 4. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 23-27 aprelya 2018 g. – 2018. – S. 90-98.

6. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Jelektronnyj resurs] URL: <https://openreview.net/pdf/OM0jvwB8jIp57ZJjtNEZ.pdf/>.

© А. М. Петров, К. Н. Даниловский, В. В. Еременко, 2021

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Валерий Викторович Плоткин

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

С помощью численных экспериментов рассматриваются возможности применения метода декомпозиции расчетной области при решении прямых задач магнитотеллурического зондирования.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, метод Треффца, декомпозиция расчетной области

APPLICATION OF CALCULATION REGION DECOMPOSITION IN SOLVING MAGNETOTELLURIC SOUNDING PROBLEMS

Valery V. Plotkin

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

Using numerical experiments, possibilities of application the decomposition method of the calculation region in solving direct problems of the magnetotelluric sounding are considered.

Key words: the magnetotelluric sounding, the Trefftz method, the calculation region decomposition

Одним из методов изучения глубинных структур электропроводности Земли является магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) [1, 2]. Из-за сложного геоэлектрического строения геологической среды часто возникает необходимость использования 3D-моделей среды. Для расчетов поля в ней можно воспользоваться, в частности, методом Треффца [3, 4]. Взятая модель среды представляется набором параллелепипедов, в которых она однородна. Понятно, что с уменьшением размеров параллелепипедов и увеличением их количества точность расчетов будет возрастать. Однако при этом существенно увеличиваются и необходимые для расчетов вычислительные мощности. Один из вариантов преодоления возникающих трудностей связан с применением метода декомпозиции расчетной области на подобласти [5]. Расчеты поля в подобласти меньших размеров требуют меньших вычислительных ресурсов. Основанием этого подхода является затухание в проводящей среде аномальных полей, создаваемых 3D-неоднородностями, с увеличением расстояния от них. Вполне можно говорить о локальности влияния 3D-неоднородностей. Размеры области влияния, по всей видимости, определяются параметрами скин-слоя в среде вблизи вторичного источника поля.

В данной работе предполагается рассмотреть возможность решения прямой задачи МТЗ, используя декомпозицию всей расчетной области на субдомены (подобласти) - ограниченные по горизонтали участки полигона, включающие по вертикали все слои в расчетной области.

Алгоритм решения задачи основан на применении метода итераций. В каждом субдомене по методу Треффца рассчитывается электромагнитное поле, которое запоминается в соответствующих точках всей (глобальной) сетки расчетной области. Смещая субдомен по горизонтали, повторяем расчеты, пока не будет определено электромагнитное поле во всей расчетной области и в итоге получены результаты данной итерации. Подобные итерации повторяются, пока не будут выполнены условия сходимости вычислительного процесса.

Смещения субдоменов в итерациях проводятся с использованием их наложения друг на друга по горизонтали. В зависимости от степени наложения меняется количество субдоменов и полное время решения задачи, сходимость процесса и его скорость. В последовательных итерациях используются разные схемы смещений субдоменов - сначала, например, ряд смещений вдоль одной из горизонтальных осей, а затем такой же ряд смещений после перехода по другой горизонтальной оси. В качестве первого субдомена можно взять любой, находящийся в углах полигона. В итоге так можно выбрать 8 разных схем смещений субдоменов.

Приведем граничные условия задачи определения поля в субдоменах. На нижней грани это условия затухания поля в подстилающей среде. На боковых гранях поставлены условия периодичности поля (3D-неоднородность внутри субдомена), более подробно эти условия и их применимость описаны в [4]. На верхней грани субдомена задаются горизонтальные компоненты магнитного поля. Указанные условия полностью определяют единственное решение задачи в субдомене.

Для первой итерации необходимо задать компоненты магнитного поля на поверхности полигона. В качестве такого поля мы используем решение задачи МТЗ для горизонтально-слоистой среды, в частности, фоновой или полученной усреднением исходной модели среды по горизонтальным координатам.

Сходимость вычислительного процесса после проведенных итераций устанавливается по изменениям поля на земной поверхности или кривых МТЗ в нескольких пунктах на полигоне. Поле на земной поверхности, полученное после данной итерации, мы определяем с помощью усреднения результатов всех предшествующих итераций.

Для апробации нашего подхода мы провели численное моделирование с фоновой средой из двух слоев с удельными сопротивлениями 49.4 и 18.2 Ом·м, мощностями 10.3 и 11.6 км (сверху вниз) и подстилающей средой 5 Ом·м. Верхние слои содержат латеральные неоднородности, распределение которых и тестируемая модель 3D-среды показаны на рис. 1. Ось OX направлена на север, ось OY - на восток и ось OZ - вертикально вниз. Размеры полигона по осям OX и OY составляют 17.3 км и 21.7 км соответственно.

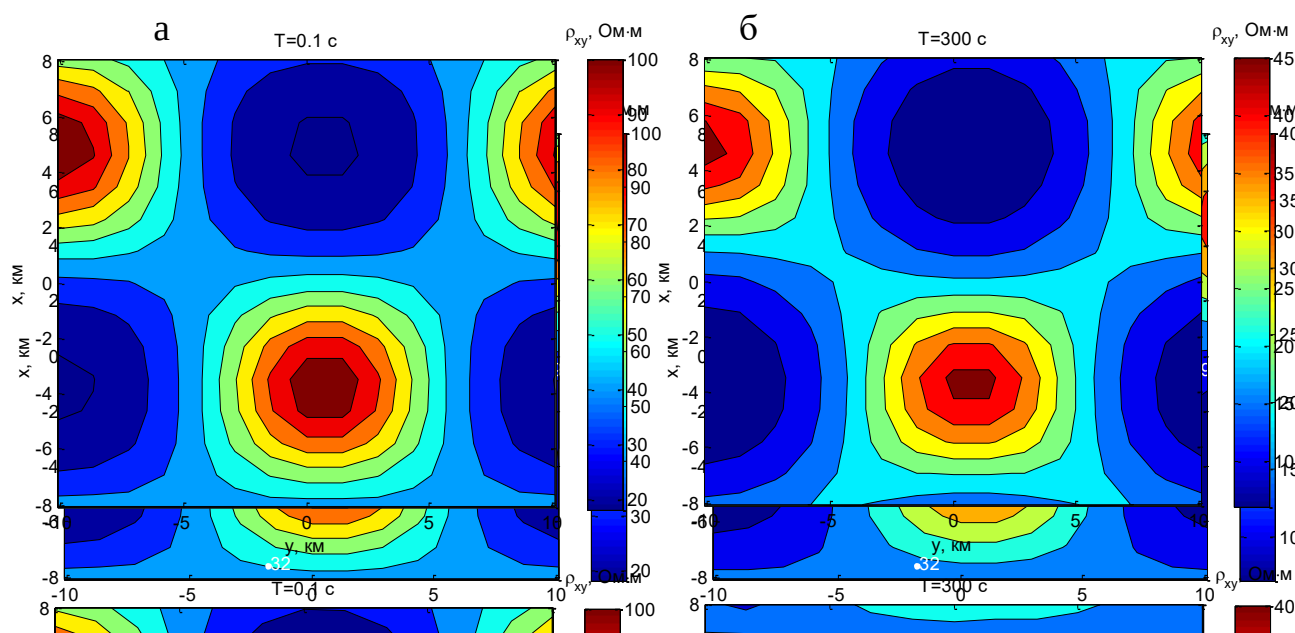


Рис. 1. Латеральное распределение удельных сопротивлений в тестируемой модели 3D-среды (расположение пунктов МТЗ показано белым цветом)

Fig. 1. Lateral resistivity distribution in the 3D medium model under test (MTS locations shown in white)

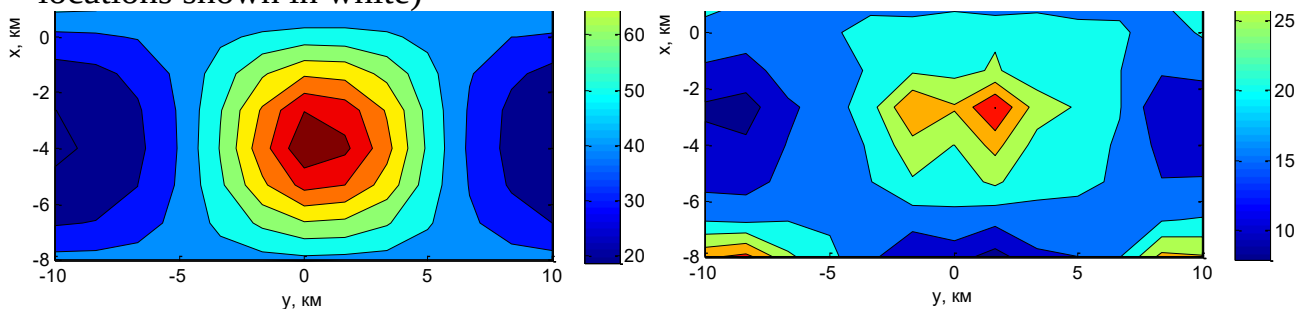


Рис. 2. Распределения кажущихся сопротивлений ρ_{xy} для двух периодов по расчетам без (а, б) и с применением (в, г) декомпозиции расчетной области

Fig. 2. Distribution of apparent resistivities ρ_{xy} for two periods according to calculations without (а, б) and using (в, г) decomposition of the calculation region

Были проведены расчеты поля для указанной модели среды на одной и той же сетке без применения и с использованием декомпозиции расчетной области. Для

сравнения результатов после 8 итераций на рис. 2 показаны полученные латеральные распределения ρ_{xy} , а на рис. 3 кривые кажущихся сопротивлений. Глобальная сетка взята с разбиением области по горизонтальным осям координат на 13x13 параллелепипедов (это позволяет выполнять оба варианта расчетов на одном и том же компьютере). Субдомены содержат по 5x5 упомянутых параллелепипедов. Данное разбиение применяется в каждом из слоев 3D-модели среды. При декомпозиции расчетной области выполняются смещения субдомена на 2 параллелепипеда (соответственно наложение их друг на друга составляет 3 параллелепипеда).

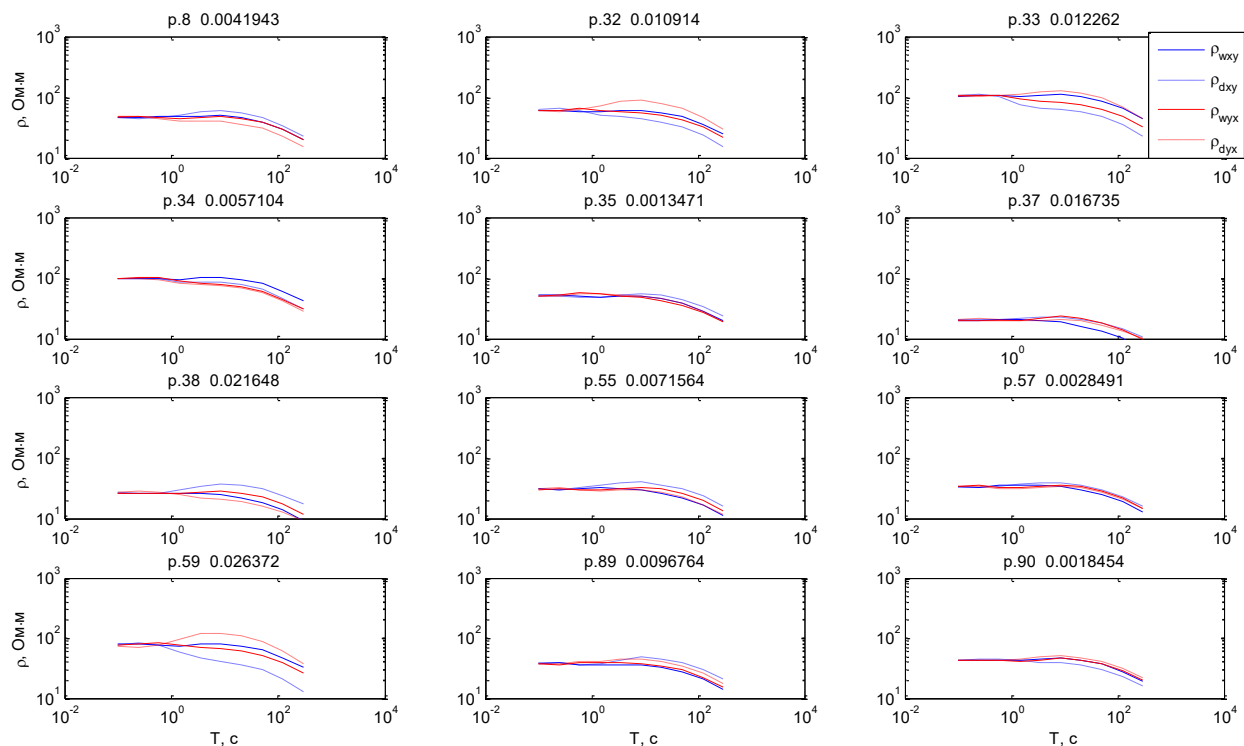


Рис. 3. Кривые кажущихся сопротивлений в пунктах МТЗ по расчетам без (ρ_{wxy} , ρ_{wyx}) и с применением (ρ_{dxy} , ρ_{dyx}) декомпозиции расчетной области (указаны номера пунктов и относительная погрешность расчетов)

Время счета варианта без декомпозиции на субдомены с использованием разреженных матриц в Матлабе составило 5 часов, без разреженных матриц 23 минуты. Наконец, без разреженных матриц, но с применением декомпозиции расчетной области время счета 15 минут на 8 итераций. Следует подчеркнуть, что вариант декомпозиции расчетной области позволяет на компьютере с той же памятью при расчетах существенно увеличить ее размеры по горизонтали. На рис. 4. отражена сходимость итераций при декомпозиции расчетной области. Представлены изменения (в относительных единицах) различных компонент

поля во всех точках полигона на земной поверхности при обеих независимых поляризациях первичной волны. Можно утверждать, что процесс сходится, но его скорость зависит от соотношения параметров субдоменов и их смещений с размерами области влияния 3D-неоднородности в заданной модели среды. Для сравнения на рис. 5 представлены изменения сходимости итераций и распределения кажущихся сопротивлений при расчетах с другими параметрами субдоменов и их смещений. С увеличением размерности субдомена время счета увеличивается. При размере субдомена 11x11 и смещении на 2 шага расчетное время 265 минут.

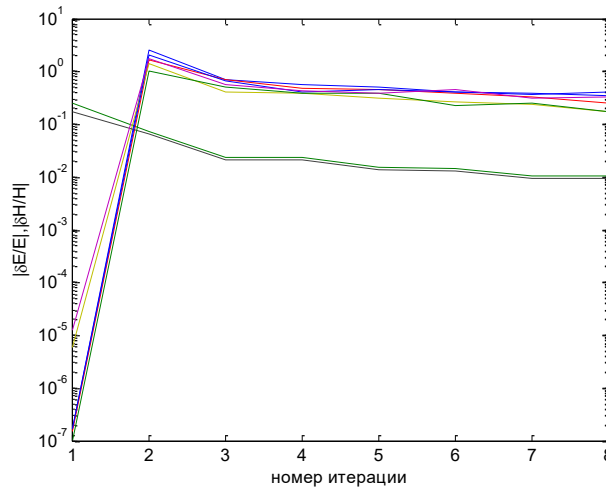


Рис. 4. Относительная погрешность расчетов различных компонент поля для 2-х поляризаций первичной волны в зависимости от номера итераций

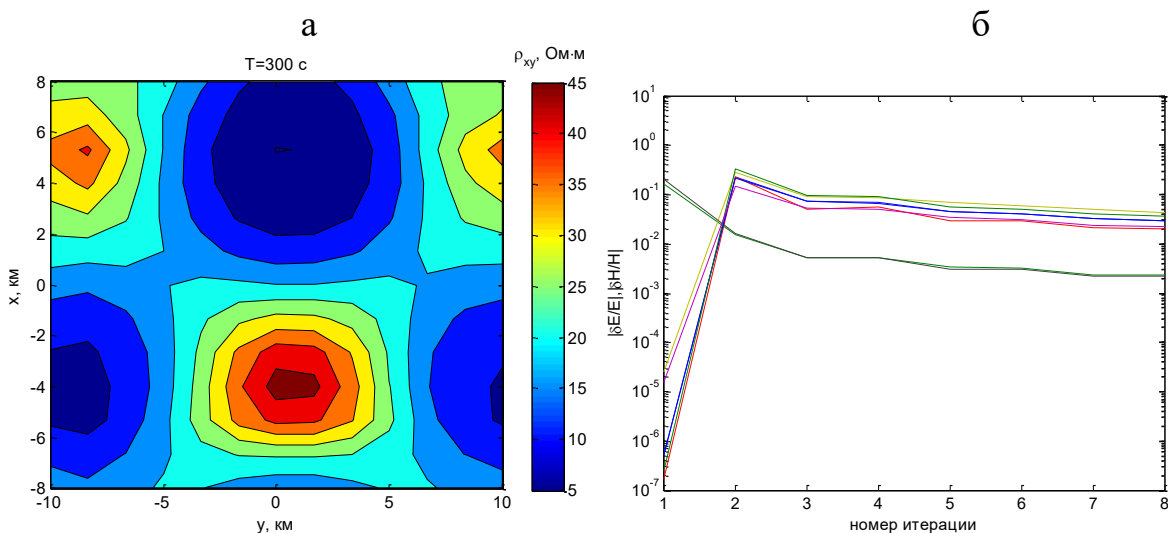


Рис. 5. Относительная погрешность расчетов различных компонент поля для двух поляризаций первичной волны в зависимости от номера итераций (а) и распределение кажущихся сопротивлений ρ_{xy} (б) с применением декомпозиции расчетной области, субдомен 11x11, смещение на 2 шага

Как видно из распределений, приведенных на рис. 2, для периода $T=0.1$ с карты кажущихся сопротивлений совпадают с хорошей точностью. Это также видно по поведению кривых кажущихся сопротивлений на коротких периодах во всех выбранных пунктах МТЗ, приведенных на рис. 3. Однако для периода $T=300$ с можно говорить о совпадении распределений и кривых кажущихся сопротивлений лишь в общих чертах. Это связано с соотношением параметров субдоменов и их смещений с размером области влияния 3D-неоднородности. В частности, с увеличением размерности субдомена до 11×11 при смещении в 2 шага сходство карт кажущихся сопротивлений для периода $T=300$ с лучше (сравни рис. 2б и рис. 5б), существенно уменьшаются и погрешности в расчетах кривых кажущихся сопротивлений (рис 6).

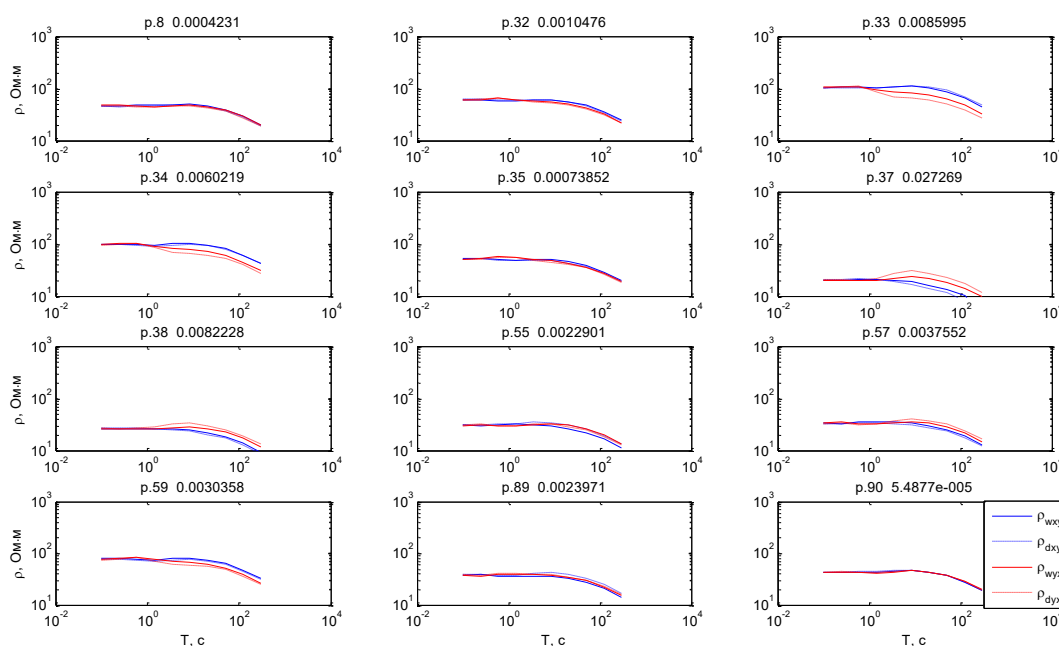


Рис. 6. Кривые кажущихся сопротивлений в пунктах МТЗ по расчетам без (ρ_{wxy} , ρ_{wyx}) и с применением (ρ_{dxy} , ρ_{dyx}) декомпозиции расчетной области (указаны номера пунктов и относительная погрешность расчетов), субдоменов 11×11 , смещение на 2 шага

Заключение

Таким образом, применяя метод декомпозиции расчетной области, можно свести решение прямой задачи МТЗ для полигона больших размеров к расчетам нескольких задач меньшей размерности. Это уменьшает требования к памяти компьютера, но требует увеличения времени всех расчетов.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0015.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 668 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. – 320 с.
3. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. – 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 15-26.
4. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 7. – С. 1381-1390.
5. Xiong Z. Domain decomposition for 3D electromagnetic modeling // Earth Planets Space. – 1999. – V. 51. – P. 1013-1018.

REFERENCES

1. Berdichevskiy M.N., Dmitriev V.I. Modeli i metody magnitotelluriki. – M.: Nauchnyi mir, 2009. – 668 s.
2. Zhdanov M.S. Elektrorazvedka. – M.: Nedra, 1986. – 320 s.
3. Egorov I.V. Metod Treffca dlya resheniya trexmernyx pryamyx i obratnyx zadach geoel-ektriki // Fizika Zemli. – 2011. T. 47. – № 2. – S. 15-26.
4. Plotkin V.V., Gubin D.I. Uchet pripoverhnostnyh neodnorodnostei nad gorizonta-’no-sloistym razrezom pri magnitotelluricheskom zondirovanii // Geologiya i geofizika. – 2015. – T. 56. – № 7. – S. 1381-1390.
5. Xiong Z. Domain decomposition for 3D electromagnetic modeling // Earth Planets Space. – 1999. – V. 51. – P. 1013-1018.

© В. В. Плоткин, 2021

СЕЙСМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СТВОРЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ПРОФИЛЯ 3-ДВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Павел Олегович Полянский

Алтае-Саянский филиал Федерального Исследовательского Центра “Единая Геофизическая служба” РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник; тел. +7-913-894-5139, e-mail: PPavel6.10@gmail.com

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Федерального Исследовательского Центра “Единая Геофизическая служба” РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор технических наук, директор филиала; тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Александр Сергеевич Сальников

Акционерное Общество “Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья”, 630091, Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом сейсморазведки, тел.: +7(383)-222-62-13, e-mail: assalnikov@mail.ru

Сделана цифровая обработка преломленных волн по Северо-Восточному участку профиля 3-ДВ методом динамического пересчета. Построены временные разрезы и скоростная модель, отображающая структуру преломляющих границ в верхней части земной коры. Доказано, что в Аян-Юряхском блоке в интервале глубин 0-1.5 км преломляющие горизонты являются границами в осадочном чехле, а в зоне Иньяли-Дебинского блока преломляющая граница на глубине ~1.0 км не является литологической. По пониженным значениям V_p/V_s (1.66-1.70) в Иньяли-Дебинском блоке и в пределах Оротукано-Балыгычанского поднятия на глубинах ниже 1.0 км зафиксированы слои, перспективные на месторождения рудных полезных ископаемых.

Ключевые слова: Цифровая обработка преломленных волн, опорный геофизический профиль 3-ДВ, временной разрез, верхняя часть земной коры, скоростная модель

SEISMIC MODEL OF THE UPPER EARTH'S CRUST ON NORTH-EAST PART OF TRAVERSE 3-DV BASED ON RESULTS OF HEAD WAVES DIGITAL PROCESSING

Pavel O. Polyansky

Altay-Sayan branch of Federal Research Center “United Geophysical Survey” RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, tel. +7-913-894-5139, e-mail: PPavel6.10@gmail.com;

Alexander F. Emanov

Altay-Sayan branch of Federal Research Center “United Geophysical Survey” RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, branch director; tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru;

Alexandr S. Salnikov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Krasny Prospect 67, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of department of exploration seismology, tel.: +7 (383)-222-62-13, e-mail: assalnikov@mail.ru.

Digital processing of refracted waves data, which are registered on North-East part of profile 3-DV, is done. Time sections and velocity model are formed. It is proved, that refraction horizons on depth interval of 0-1.5 km are geologic boundaries in sedimentary cover on Ayan-Yuryakh tectonic block. Refraction boundary on depth of ~1.0 km is not lithologic border on Inyaly-Debin block. Layers, which are potentially productive for ore mineral resources, are subtracted by low values of V_p/V_s (1.66-1.70) on depth below 1.0 km, on Inyaly-Debin block and Orotukan-Balygychan elevation.

Keywords: Digital processing of head waves, reference geophysical traverse 3-DV, time section, upper Earth's crust, velocity model

Введение

Для определения скоростного строения земной коры на опорном профиле 3-ДВ используются сейсмические методы ГСЗ, КМПВ и МОВ-ОГТ, основанные на регистрации отраженных и преломленных сейсмических волн. Наибольшая детальность исследований - по данным отраженных волн ОГТ. Но в этих данных, помимо отраженных, присутствуют и записи преломленных волн, которые дают уникальную возможность определить сейсмическую структуру верхней части земной коры (до глубин ~ 3 км). При этом, на опорных профилях, ручная обработка преломленных волн, зарегистрированных системой ОГТ, невозможна из-за очень высокой кратности по опорным волнам (~100 и выше) и большой протяженности участков (до 1000 км). Метод динамического пересчета головных волн [2, 5] используется в автоматической цифровой обработке таких данных и дает возможность построения временных разрезов и динамических годографов преломленных волн. Представленное исследование является продолжением работы [6] и посвящено изучению свойств преломляющих границ в верхней части земной коры в створе Северо-Восточного участка опорного профиля 3-ДВ [1, 8, 10] с использованием не только продольных, но и поперечных головных волн.

Цифровая обработка данных преломленных волн

Метод динамического пересчета [2] позволяет выделить сигналы волн, нагоняющие годографы которых параллельны, и подавить случайные помехи и сигналы волн, нагоняющие годографы которых не параллельны. Для получения временных разрезов и перехода к скоростным моделям реализован граф автоматизированной обработки данных, включающий следующие этапы:

1. Контроль изменения областей прослеживания головных волн на профиле. Процедура осуществляется по системе нагоняющих динамических годографов, получаемых пересчетом в $i=\text{const}$, (i - номер источника). Затем по профилю выполняется автоматическая проверка условий неизменности области прослеживания опорной волны сравнением ее кажущейся скорости на трёх базах между

центром области прослеживания и верхней границей и между центром и нижней границей области прослеживания. При близких значениях скоростей вдоль профиля, мы имеем дело с одной и той же волной в первых вступлениях, а при возникновении устойчивых различий область прослеживания проверяется по динамическим годографам в диалоговом режиме [3]. На рис.1а и рис. 1б показаны результаты разделения областей прослеживания волн в интервале профиля 2100-2270 км (Аян-Юряхский тектонический блок). На рис.1в – сейсмограмма, с областями прослеживания преломленных волн в зоне Иньяли-Дебинского блока (2270-2400 км). На рис.1г – волновое поле в области Среднеканского блока (2400-2550 км). Области прослеживания продольных преломленных волн (P_1 , P_2 , P_3) на рис.1 показаны цветными линиями. Значения кажущейся скорости каждой волны указаны на рис. 1 надписями такого же цвета, как и линия, отображающая область прослеживания этой волны.

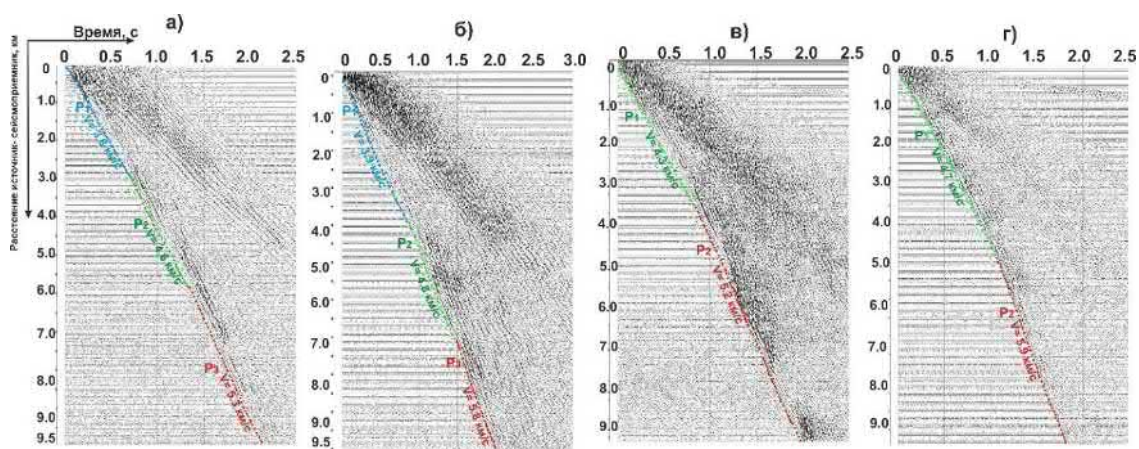


Рис. 1. Примеры разделения областей прослеживания преломленных волн на Северо-Восточном участке профиля 3-ДВ.

2. Определив области прослеживания, появляется возможность строить временные разрезы, осуществляя динамический пересчет поля целевой волны. На рис. 2 представлен временной разрез по всей длине Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ. В первых вступлениях временного разреза выделены продольные преломленные волны, а в последующих фиксируются поперечные преломленные волны.

По двум временным разрезам, построенным на разных базах в области прослеживания одних и тех же волн, оценены значения граничной скорости продольных и поперечных преломленных волн в пределах тектонических структур, пересекаемых Северо-Восточным участком. Графики значений граничной скорости показаны на рис. 3.

3. Контроль рефракции волн на Северо-Восточном участке профиля. Влияние рефракции на сигналы преломленных волн при динамическом пересчете эквивалентно низкочастотной фильтрации: низкие частоты скользят вдоль

преломляющей границы, а высокие частоты проникают вниз в соответствии с градиентом скорости в подстилающей толще [3]. Чем выше коэффициент рефракции тем заметнее эффект низкочастотной фильтрации [7]. Оценено латеральное изменение частотного спектра сигналов, выделенных в результате динамического пересчета преломленных волн: на рис. 4 красными линиями выделены значения “верхней” и “нижней” частоты спектров трасс временного разреза, а черными линиями показаны значения “верхней” и “нижней” частоты спектров исходных сейсмических трасс, которые характеризуются теми же значениями расстояний источник-сейсмоприемник, что и трассы временного разреза. Границы спектров определялись по доле 0.75 от максимальной амплитуды спектра, [7].

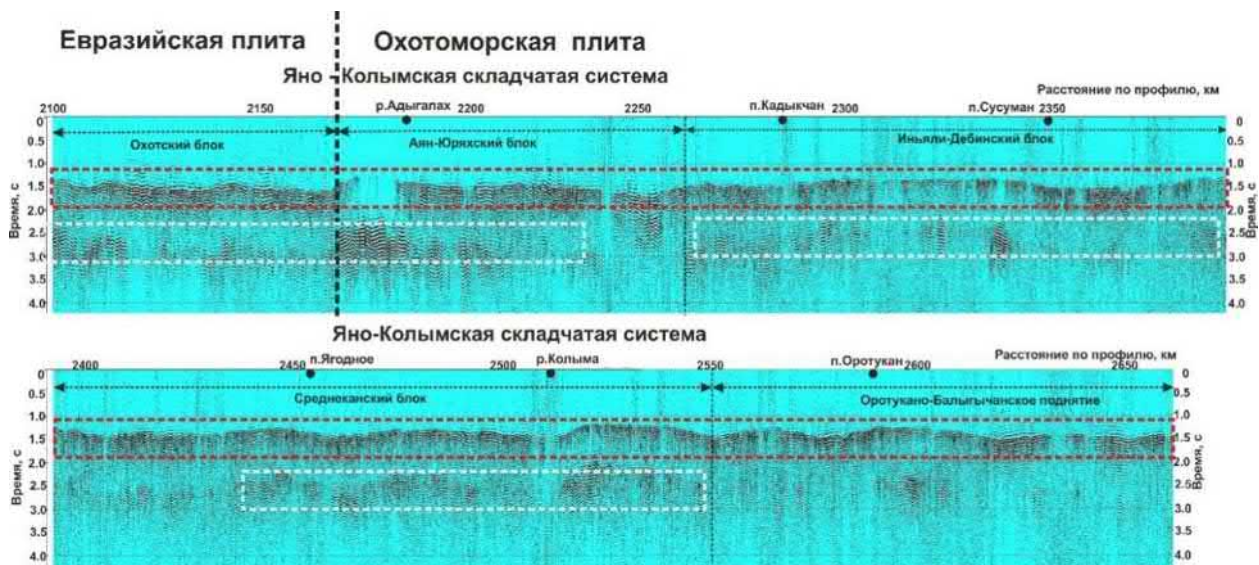


Рис. 2. Временной разрез по Северо-Восточному участку профиля 3-ДВ (база пересчета $L_p = 7$ км)

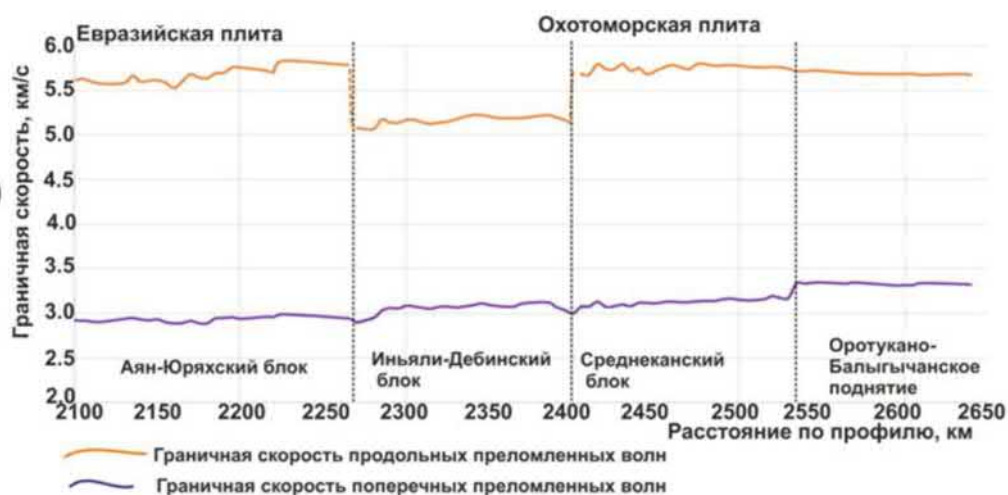


Рис. 3. Изменение граничной скорости продольных и поперечных преломленных волн на Северо-Восточном участке профиля 3-ДВ

В пределах Аян-Юряхского блока зафиксированы наибольшие значения разности между “верхней” частотой когерентных сигналов и “верхней” частотой сигналов исходных трасс, составляющие 7-10 Гц. В остальных частях профиля, значения разности частот не превышают 2-4 Гц. В [3, 9] дано обоснование алгоритма оценки коэффициентов рефракции на Северо-Западном участке.

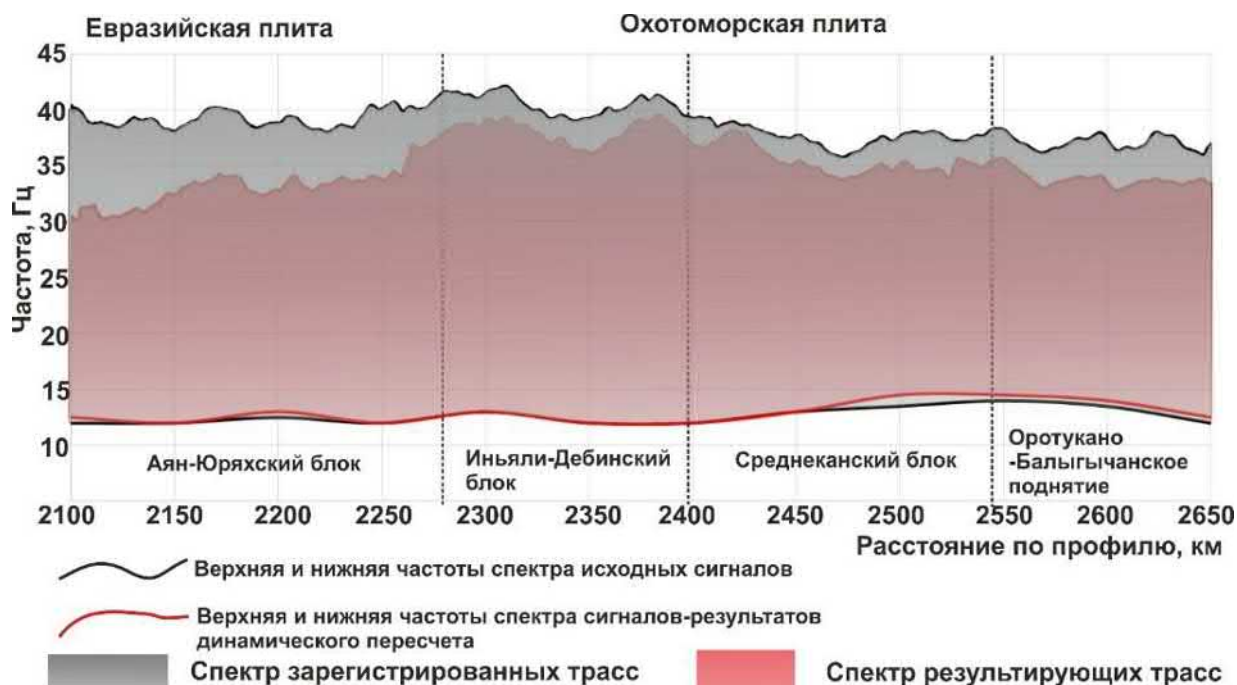


Рис. 4. Частотный состав сейсмических сигналов на Северо-Восточном участке профиля.

4. Получение скоростной модели и интерпретация результатов. На рис.5 представлен сейсмический разрез по всей длине Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ. Методика перехода от временного разреза к скоростной модели основана на последовательном построении преломляющих границ "сверху вниз" с учетом рефракции в толщах между ними [3]. На построенном разрезе верхней части коры отчетливо выделяются блоки, разделяемые разломами — границами тектонических структур.

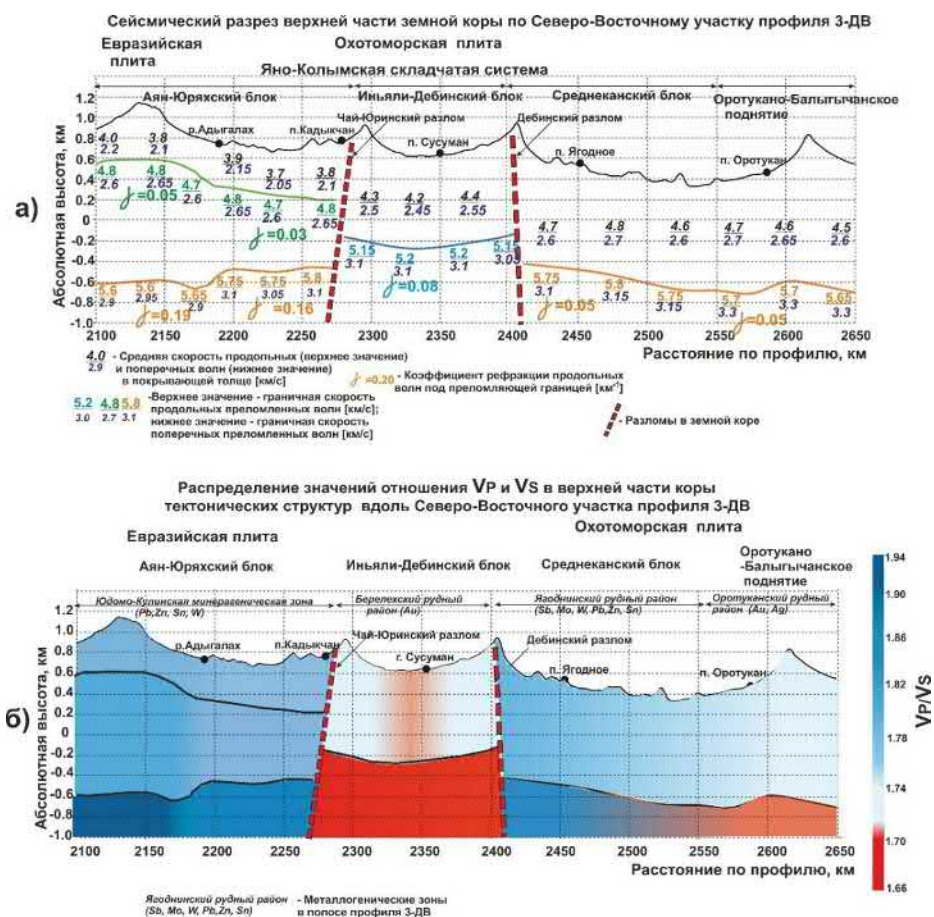


Рис. 5. Скоростное строение верхней части земной коры по Северо-Восточному участку профиля 3-ДВ:

а) модель в значениях скорости Р- и S- волн. б) модель верхней части коры в значениях V_p/V_s .

Сейсмическое строение Аян-Юряхского блока (2100-2270 км) в интервале -1.0÷1.0 км представлено двумя сейсмическими горизонтами с подстилающим их полупространством. Верхний горизонт, между отметками 0.8-0.2 км характеризуется скоростью продольных волн ~3.8-4.0 км/с и скоростью поперечных волн 2.05-2.2 км/с. Отношение скоростей продольных и поперечных волн (V_p/V_s) составляет 1.80-1.82. В промежуточном слое, скорость продольных волн составляет 4.6-4.8 км/с, также выявлен незначительный ее рост с глубиной – коэффициент рефракции составляет 0.03-0.05 км⁻¹. При этом, граничная скорость поперечных преломленных волн – 2.6-2.65 км/с. Соответственно, значения V_p/V_s изменяются в диапазоне 1.81-1.84. Вторая преломляющая граница, залегающая между отметками ~-0.5÷(~-0.6 км), характеризуется достаточно высокой граничной скоростью продольных волн – 5.6-5.8 км/с, а граничная скорость поперечных волн изменяется от 2.9 км/с до 3.1 км/с. Следует также отметить наличие значительной рефракции продольных волн (0.16-0.19 км⁻¹) под этой преломляющей границей. При этом здесь фиксируются самые высокие в этом блоке значения V_p/V_s , составляющие 1.88-1.93. Такие значения отношения V_p/V_s (от 1.8 и выше)

характерны для осадочных пород [4]. Также и по геологическим данным [1] – Аян-Юрхский блок представляет собой осадочный чехол, сложенный породами пермского и триасового возрастов общей мощностью свыше 5 км. Вычисленные значения скорости продольных волн в двух верхних слоях характерны для широкого спектра осадочных пород. Поэтому, вероятно, первая преломляющая граница является литологическим разделом в осадочном бассейне. Вторая преломляющая граница характеризуется значениями скоростей наиболее плотных осадочных пород, таких как конгломерат, известняк, доломит или брекчия. При этом, сильная рефракция может свидетельствовать о неоднородном составе этой толщи.

В интервале между отметками 2270 км и 2410 км, Северо-Восточный участок профиля пересекает Иньяли-Дебинский тектонический блок, ограниченный с юго-запада Чай-Юринским разломом [10], а с востока – Дебинским разломом (см. рис.5). Верхняя часть земной коры представлена двумя толщами, граница между которыми расположена на абсолютной отметке глубин ~ -0.2 км. Скорость продольных волн в верхнем слое – 4.2-4.4 км/с, а в нижнем – 5.2-5.3 км/с, при этом присутствует небольшая рефракция продольных волн в подстилающей толще (~ 0.08 км⁻¹). Скорость поперечных преломленных волн в верхней толще, составляет ~ 2.5 км/с. Граничная скорость S-волн составляет ~ 3.1 км/с. По геологическим данным, верхняя часть коры Иньяли-Дебинского блока характеризуется сложным строением – трещиноватыми, смятыми в складки осадочными породами, и большим количеством интрузий гранитоидов [1, 10]. Соответственно, границы раздела пород разного состава и возраста предположительно имеют сложный рельеф. Фиксируемая на глубинном разрезе преломляющая граница плавной формы залегает несогласно со складками, поэтому, не является ни литологической, ни стратиграфической. При этом, в покрывающей толще зафиксированы пониженные значения V_P/V_S , изменяющиеся от 1.71 до 1.73, а подстилающая толща характеризуется еще более низкими значениями отношения скоростей (1.66-1.68). Полученные столь низкие значения подтверждают геологические предположения. При этом, вычисленные значения отношения скоростей также могут быть связаны с присутствием в верхней части коры золоторудных месторождений, [1, 10].

В верхней коре зон Среднеканского блока и Оротукано-Балыгычанского поднятия (интервал профиля 2400-2650 км) зафиксирована одна преломляющая граница, на отметках $-0.4 \div -0.7$ км. Скорость продольных волн в покрывающей толще изменяется от 4.5 до 4.7 км/с, а граничные скорости составляют 5.7-5.8 км/с для продольных преломленных волн, и 3.1-3.3 км/с для поперечных преломленных волн. Скорость Р-волн убывает по латерали в направлении Оротукано-Балыгычанского блока, а скорость S-волн – возрастает. Значения V_P/V_S в покрывающей толще изменяются от 1.77-1.80 в Среднеканском блоке до 1.73-1.74 в пределах Оротукано-Балыгычанского поднятия. В толще под преломляющей границей величина V_P/V_S принимает значения 1.82-1.85 и 1.71-1.72, соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии / Горячев Н.А. // Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. – 1998. 210 с.
2. Еманов А. Ф., Селезнев В.С., Коршик Н.А. Динамический пересчет головных волн при обработке данных сейсморазведки // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 10. – С. 1031-1045.
3. Еманов А.Ф. Сейсмическая модель верхней части земной коры Юго-Восточной границы Сибирской платформы / Еманов А.Ф., Полянский П.О., Сальников А.С. // Физика Земли. – 2021. – №3. – С.130-146.
4. Кашубин С.Н. Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях / Кашубин С.Н., Сакулина Т.С., Павленкова Н.И., Лукашин Ю.П. // Технологии сейсморазведки. – 2011. - №4. – С. 88-102.
5. Крылов С.В., Сергеев В.Н. Свойства головных волн и новые возможности автоматизации их обработки // Геология и геофизика. – 1985. – № 4. – С. 92-102.
6. Полянский П.О., Сальников А.С., Еманов А.Ф., Жабин В.В. Временные разрезы головных волн верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (Северо-восточный участок) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – №2. – С.86-95.
7. Полянский П.О., Еманов А.Ф., Сальников А.С. Динамический пересчет головных волн на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ: особенности методики и интерпретация временных разрезов // Геофизические исследования. – 2018. – т. 19. – №2. – С. 5-33.
8. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Шibaев С.В., Тимофеев В.Ю., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е. Особенности сейсмического строения области сочленения Евразийской и Охотоморской плит на Востоке России (в створе опорного профиля 3-ДВ) // Геология и геофизика. – 2016. – Т.57. – №11. – С.2044-2058.
9. Старобинец А.Е., Старобинец М.Е. Цифровая обработка и интерпретация данных метода преломленных волн. – М.: Недра, 1983. – 207 с.
10. Чехов А.Д. Глубинные разломы Иньяли-Дебинского синклинория и некоторые особенности размещения магматических образований и оруденения / Чехов А.Д. // Новые данные по геологии Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1976. – С. 34-48.

REFERENCES

1. Gorjachev N.A. Geologija mezozojskih zoloto-kvarcevyh zhil'nyh pojasov Severo-Vostoka Azii / Gorjachev N.A. // Magadan: SVKNII DVO RAN. – 1998. 210 s.
2. Emanov A. F, Celeznev V.C, Kopshik N.A. Dinamicheskij pereschet golovnyh voln pri obrabotke dannyh sejsmorazvedki // Geologija i geofizika. – 2008. – T. 49, № 10. – S. 1031-1045.
3. Emanov A.F. Sejsmicheskaja model' verhnjej chasti zemnoj kory Jugo-Vostochnoj granicy Sibirskoj platformy / Emanov A.F., Poljanskij P.O., Sal'nikov A.S. // Fizika Zemli. – 2021. – №3. – S.130-146.
4. Kashubin S.N. Osobennosti volnovyh polej prodol'nyh i poperechnyh voln pri glubinnym sejsmicheskim issledovanijah na akvatorijah / Kashubin S.N., Sakulina T.S., Pavlenkova N.I., Lukashin Ju.P. // Tehnologii sejsmorazvedki. – 2011. – №4. – S. 88-102.
5. Krylov S.V., Sergeev V.N. Svoystva golovnyh voln i novye vozmozhnosti avtomatizacii ih obrabotki // Geologija i geofizika. – 1985. – № 4. – S. 92-102.
6. Poljanskij P.O., Sal'nikov A.S., Emanov A.F., Zhabin V.V. Vremennye razrezy golovnyh voln verhnjej chasti zemnoj kory na opornom profile 3-DV (Severo-vostochnyj uchastok) // Geologija i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. – 2016. – №2. – S.86-95.
7. Polyanskij P.O., Emanov A.F., Sal'nikov A.S. Dinamicheskij pereschet golovnyh voln na Central'nom uchastke opornogo profilya 3-DV: osobennosti metodiki i interpretaciya vremennyh razrezov // Geofizicheskie issledovaniya. – 2018. – t. 19. – №2. – S. 5-33.

8. Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Sal'nikov A.S., Shibaev S.V., Timofeev V.Ju., Lisejkin A.V., Shenmajer A.E. Osobennosti seismicheskogo stroenija oblasti sochlenenija Evrazijskoj i Ohotomorskoj plit na Vostoke Rossii (v stvore opornogo profilja 3-DV) // Geologija i geofizika. – 2016. – T.57. – №11. – S.2044-2058.
9. Starobinec A.E., Starobinec M.E. Cifrovaja obrabotka i interpretacija dannyh metoda prelomlennyh voln. – M.: Nedra, 1983. – 207 s.
10. Chehov A.D. Glubinnye razlomy In'jali-Debinskogo sinklinorija i nekotorye osobennosti razmeshhenija magmaticheskikh obrazovanij i orudnenenija / Chehov A.D. // Novye dannye po geologii Severo-Vostoka SSSR. Magadan: SVKNII DVNC AN SSSR, 1976. – S. 34-48.

© П. О. Полянский, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников, 2021

ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МИГРАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОЮРСКОГО КОМПЛЕКСА

Максим Игоревич Протасов

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, доцент кафедры мат. методов геофизики; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, ведущий научный сотрудник, тел. (383) 330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Александрович Литвиченко

ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ», 625048, Россия, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 14, руководитель направления по моделированию сейсмоданных, e-mail: litvichenko.da@gazpromneft-ntc.ru

В работе представлены результаты апробации нескольких процедур миграции с акцентом на возможности объектно-ориентированного построения изображений доюрского комплекса (ДЮК). Численные примеры рассчитаны для синтетических данных, полученных для реалистичной сейсмической модели ДЮК, построенной по реальным данным из Западной Сибири.

Ключевые слова: объектно-ориентированная миграция, сейсмические данные, доюрский комплекс

POSSIBILITIES OF OBJECT-ORIENTED MIGRATION FOR IMAGING THE PRE-JURASSIC DEPOSITS

Maxim I. Protasov

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor of the Mathematical Methods of Geophysics Department; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Scientist, tel. (383) 330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.nsc.ru

Dmitry A. Litvichenko

LLC GAZPROMNEFT NTC, 14, 50 years of October St., Tyumen, 625048, Russia, Head of Seismic Data Modeling, e-mail: litvichenko.da@gazpromneft-ntc.ru

The paper presents the results of testing several migration procedures with an emphasis on the possibility of object-oriented imaging of the pre-Jurassic deposits. Numerical examples are calculated for synthetic data obtained for a realistic seismic model of pre-Jurassic deposits, built from real data from Western Siberia.

Key words: object-oriented imaging, seismic data, pre-jurassic deposits

Описание процедур миграции. В работе применяются три процедуры глубинной миграции и один вариант временной миграции. Все алгоритмы используют отдельные Гауссовы пучки вместо стандартного разложения волнового поля, а также пучки в качестве весов для суммирования сейсмических данных.

Первый алгоритм является аналогом миграции по Гауссовым пучкам, ставшей промышленным стандартом [2], поэтому далее этот алгоритм условно называется «стандартным». Основная особенность состоит в построении идентичных Гауссовых пучков на поверхности наблюдений, что приводит к возможности разделить миграцию на две части: процесс суммирования данных с весами или разложения данных по пучкам и процесс отображения разложенных данных в глубину, т.е. процесс миграции [3]. В целом такой подход позволил создать технологическую версию миграции, которая по вычислительным затратам сопоставима с промышленной реализацией миграции Кирхгоффа, но при этом превосходит по качеству.

Другой алгоритм представляет собой модификацию первого, в которой Гауссовы пучки также трассируются с поверхности наблюдения, но они не являются идентичными на поверхности наблюдения, а имеют одинаковую ширину во всех точках изображения. При этом условия визуализации реализованы в координатах системы наблюдения. Такой алгоритм вычислительно дороже «стандартного», поскольку исчезает возможность эффективной реализации декомпозиции данных [3]. Однако по сравнению с первым алгоритмом он имеет лучшее отношение сигнал/шум на конечном изображении, и поэтому его можно использовать, например, для миграции достаточно зашумленных данных. Далее этот алгоритм условно называется «оптимизированным», поскольку является таковым с точки зрения отношения вычислительные затраты/качество изображения.

Ещё один алгоритм используется в качестве объектно-ориентированной миграции (как в глубинной, так и во временной области) [1], которая позволяет строить изображения целевых объектов с высоким разрешением и отношением сигнал/шум. Для достижения таких результатов используется трассирование Гауссовых пучков из целевой области к системе наблюдения так, что они выбираются наиболее узконаправленными в точках изображения. При этом обеспечивается равномерность разрешающей способности по всему разрезу, что достигается автоматическим выбором весов внутри алгоритма так, что в точках изображения выбираются одинаковые Гауссовы пучки, а на поверхности наблюдения эти Гауссовы пучки различны в зависимости от глубины и углов наклона. Максимальная же разрешающая способность достигается за счёт доступной в сейсмических данных минимизации ширины Гауссова пучка в точках изображения. Амплитуда изображения в таком случае вычисляется автоматически равномерно для каждой точки изображения. Дополнительно, поскольку процедура реализуется в структурных углах, можно контролировать геометрию элементов разреза, подвергаемых усилению или подавлению, при этом происходит подавление артефактов миграции, связанных с ограниченностью апертуры и наличием когерентных волн-помех. Т.е. такой алгоритм построения изображений по Гауссовым пучкам «выбирает» когерентные события и максимально фокусирует энергию в точку изображения, и поэтому изображения по Гауссовым пучкам получаются с высоким разрешением и соотношением сигнал/шум.

Численные примеры на модели доюрского комплекса. Глубинно-скоростная модель, содержащая доюрский комплекс, была построена на основании

реальных данных бурения и геологической интерпретации предыдущих лет [4]. В начальную геологическую модель были включены различные структурные элементы, которые могут быть потенциальными объектами при поиске залежей нефти в доюрском комплексе. Скоростные характеристики среды были определены по информации со скважин, вскрывших палеозойские отложения. Для этой модели были рассчитаны сейсмические данные [4], которые используются для исследования возможностей построения изображений доюрских отложений.

На основе этих данных и исходной модели созданы две миграционные модели: первая – это горизонтально-слоистая, не учитывающая латеральные вариации; вторая близка по кинематическим характеристикам к исходной модели, но не совпадает с ней, а является результатом имитации процесса построения глубинно-скоростной модели при обработке реальных сейсмических данных, поэтому условно называется «уточнённой». Также из этих моделей сделаны аналогии для временной миграции посредством соответствующих преобразований глубина-время.

Далее миграция синтетических данных производится в созданных моделях с использованием описанных алгоритмов построения изображений. Результаты временной объектно-ориентированной миграции в одномерной и «уточнённой» моделях представлены на рис. 1. Видно, что структуры выше доюрского комплекса не содержат существенных латеральных вариаций, поэтому достаточно чётко прослеживаются на временных изображениях для обеих моделей, подтверждая факт достаточности временной обработки сейсмических данных для многих месторождений Западной Сибири. Необходимо отметить высокое качество изображений этой части модели, которое достигнуто за счёт описанных выше свойств объектно-ориентированной миграции. Однако, несмотря на последнее обстоятельство, изображение доюрского комплекса структурно практически отсутствует для одномерной модели и представляет искажённую, частично дефокусированную картину для «уточнённой» модели. В то же время использование глубинной миграции позволят получить в целом сфокусированные структурно корректные изображения доюрского комплекса (рис. 2, 3), что указывает на необходимость глубинной обработки сейсмических данных. При этом влияние точности модели для построения изображений доюрского комплекса существенно, что отчасти демонстрируют результаты на рис. 2, где приведены разрезы, полученные в одномерной модели и «уточнённой». Это подчёркивает необходимость построения кинематически корректной миграционной модели современными средствами скоростного анализа.

Получив достаточно хорошую скоростную модель необходимо построить максимально качественное изображение. С этой целью описанными выше тремя алгоритмами реализована миграция синтетических данных в «уточнённой» скоростной модели (Рис. 2б, Рис., Рис. 3б, 3в).

Сравнение этих результатов в целом показывает, что большую часть модели доюрского комплекса все алгоритмы восстанавливают. Но при детальном сравнении видно, что худшие результаты получены с использованием «стандартной» глубинной миграции с разложением данных по Гауссовым пучкам. Более

хорошая прослеживаемость горизонтов видна на разрезах, полученных с использованием «оптимизированной» глубинной миграции с фокусировкой Гауссовых пучков в глубине. Разрез на рис. 3б дополнительно осложнены интерференцией с высокоамплитудными частично кратными волнами – помехами, которые представляются в виде горизонтальных осей синфазной, секущих наклонные оси, ассоциированные с заложённой в модель “геологией”.

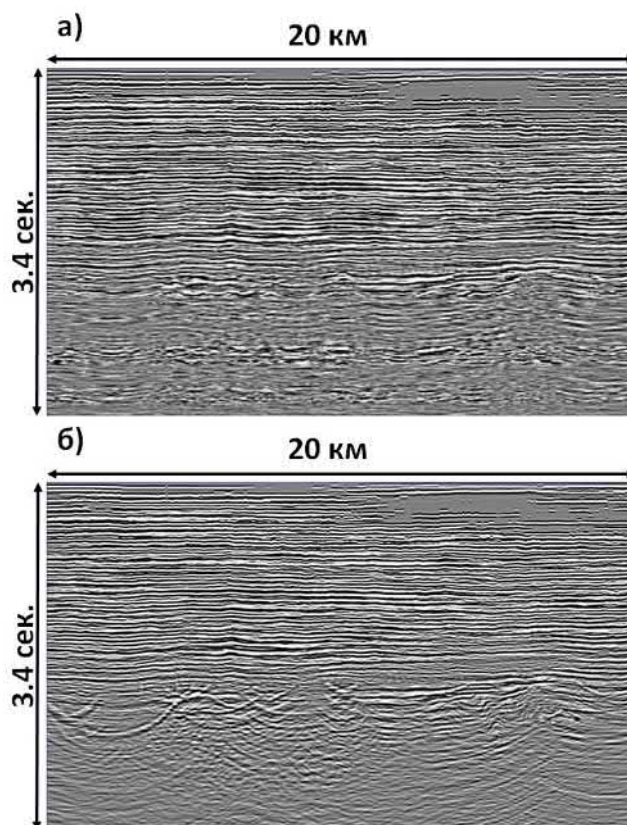


Рис. 1. Мигрированный разрез с использованием временной объектно-ориентированной миграции для фиксированного угла открытия:
а) – результат миграции в одномерной модели, б) – результат миграции в «уточнённой» скоростной модели

Однако видимый период когерентных осей синфазности на рисунках 3б и 3в меньше, чем на 3а, что может свидетельствовать о более высокой несущей частоте. Более того разрез на рис. 3б, полученный глубинной объектно-ориентированной миграцией для фиксированного угла открытия 10^0 , по прослеживаемости сравним, и во многих местах превосходит результаты, представленные на рисунке 3в. Такое качество изображений достигнуто во многом за счёт описанных выше свойств объектно-ориентированной миграции. Но определённую роль сыграл тот факт, что используется только один угол открытия. Данные используются те, что попадают в ширину Гауссова пучка. Для двух других миграций ситуация аналогична, но различие в ширине Гауссова пучка и соответственно

количестве данных. Поэтому с этой точки зрения имеет смысл сравнить результат объектно-ориентированной миграции для фиксированного угла открытия с результатами «стандартной» и «оптимизированной» миграции для фиксированного выноса (Рис. 4). Сравнение результатов показывает: хотя разрешение возрастает (сказывается неточность модели и эффект понижения частоты на дальних выносах) по сравнению с суммарными разрезами, но снижается прослеживаемость и отношение сигнал/шум, поэтому такие изображения не используются для интерпретации и не являются продуктом обработки. Напротив, результаты объектно-ориентированной миграции для фиксированного угла открытия выглядят перспективными, содержащими детальную информацию о всём разрезе. Детальное сравнение изображений доюрского комплекса, полученных «оптимизированной» миграцией и объектно-ориентированной миграцией наглядно демонстрирует преимущества последней. Видна более детальная картина доюрского комплекса с лучшим восстановлением его объектов, более хорошей прослеживаемостью горизонтов при достаточно высоком отношении сигнал/помеха.

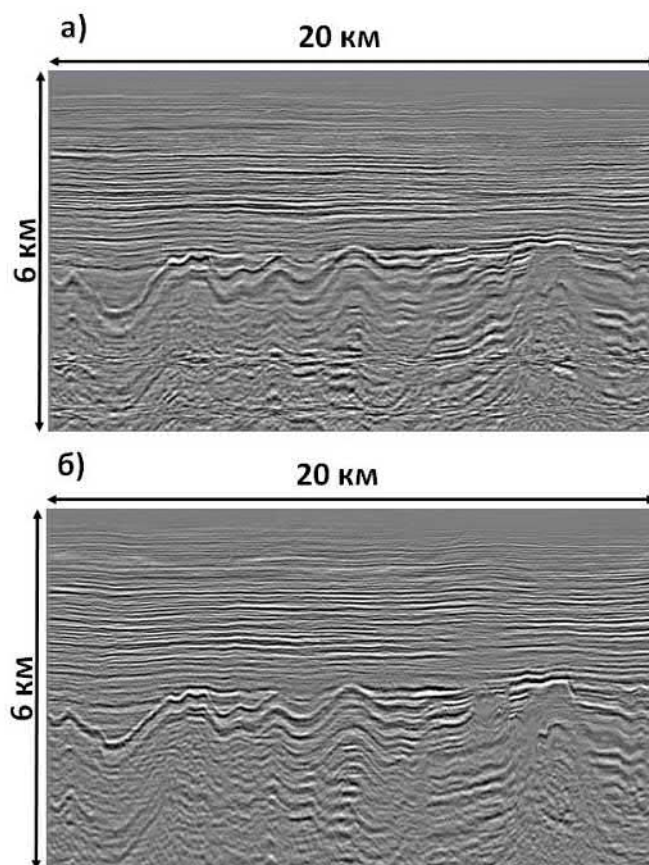


Рис. 2. Мигрированный разрез с использованием «стандартной» глубинной миграции с разложением данных по Гауссовым пучкам: а) – результат миграции в одномерной модели, б) – результат миграции в «уточнённой» скоростной модели.

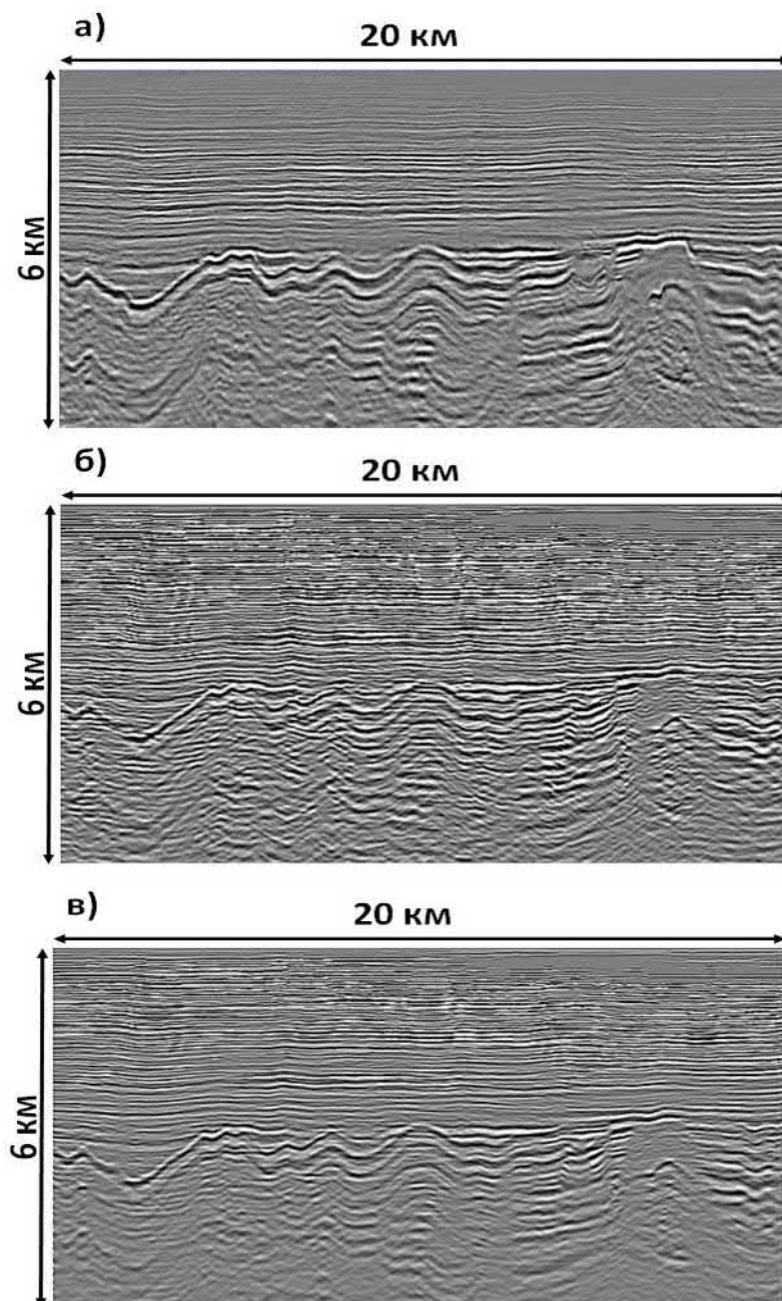


Рис. 3. Результаты миграции в «уточнённой» скоростной модели:
а) – суммарный разрез с использованием «оптимизированной» глубинной миграции с фокусировкой Гауссовых пучков в глубине; б), в) разрезы с использованием глубинной объектно-ориентированной миграции для фиксированного угла открытия: б) - 00, в) - 100.

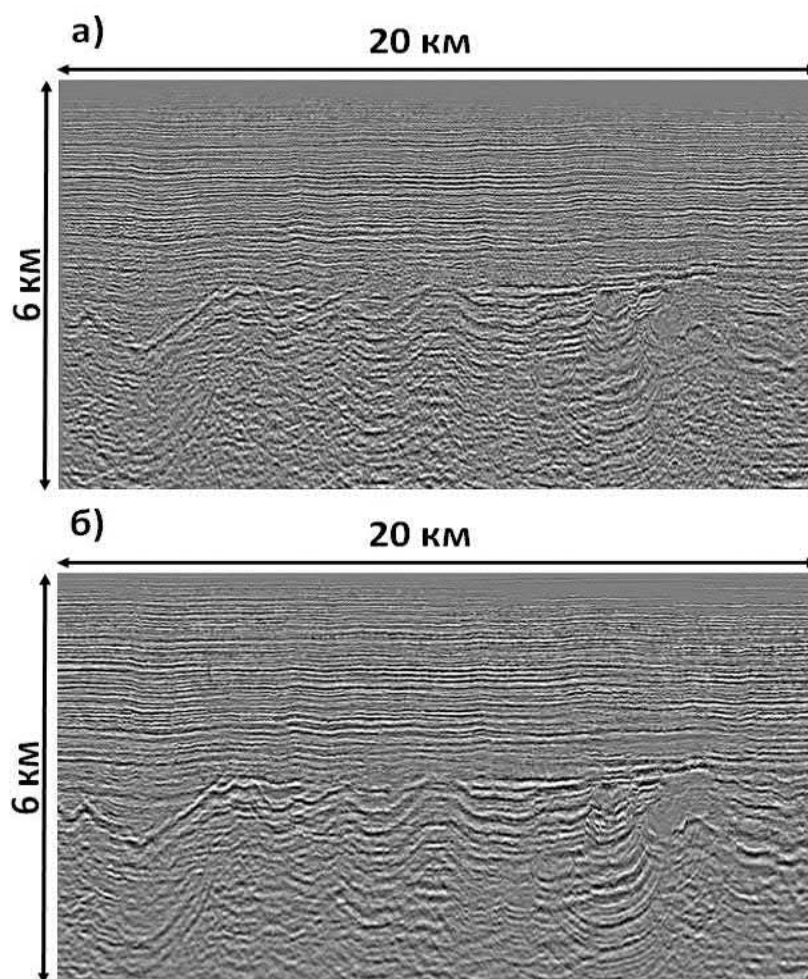


Рис. 4. Результаты миграции в «уточнённой» скоростной модели: а) – разрез с использованием «стандартной» глубинной миграции с разложением данных по Гауссовым пучкам для фиксированного выноса; б) – мигрированный разрез с использованием «оптимизированной» глубинной миграции с фокусировкой Гауссовых пучков в глубине для фиксированного выноса.

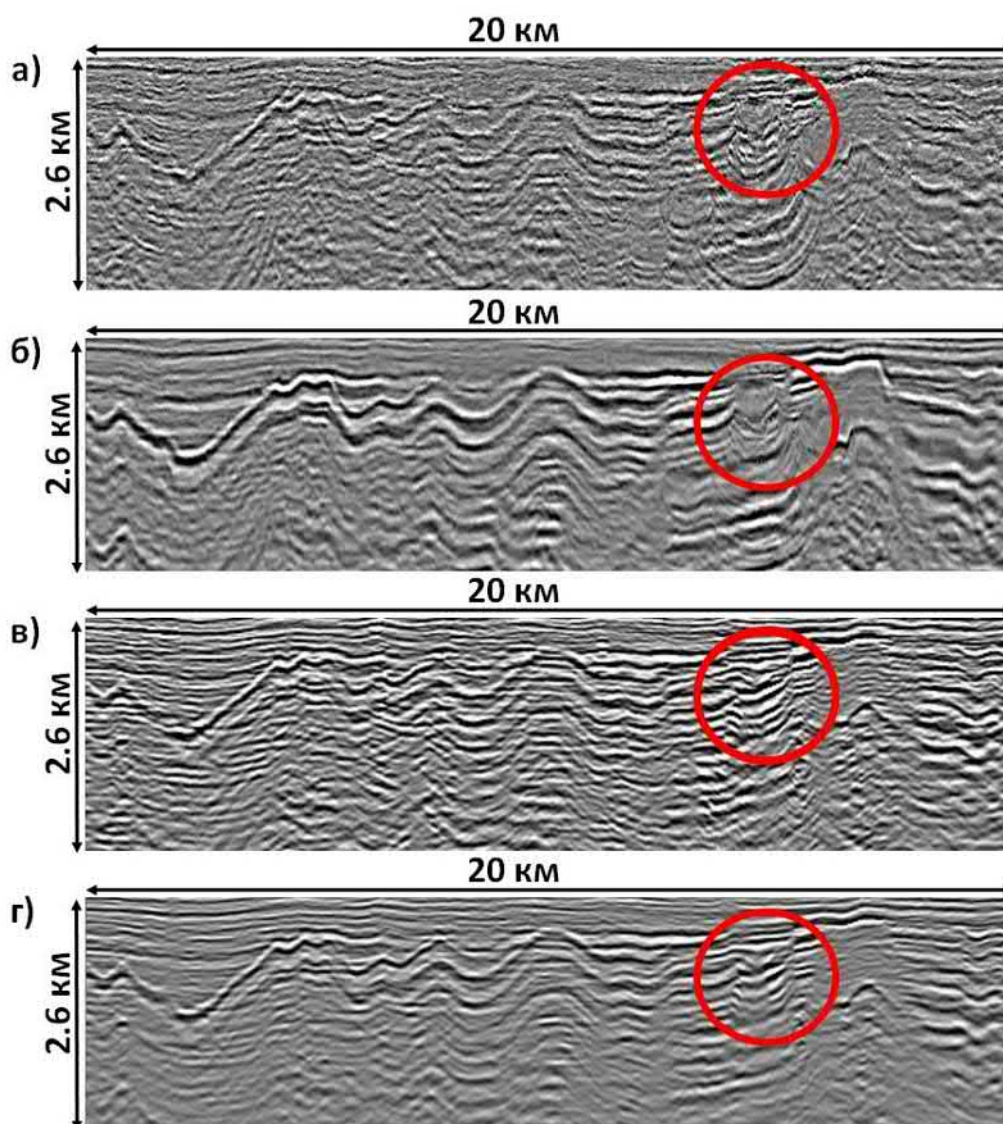


Рис. 5. Изображения доюрского комплекса в «уточнённой» скоростной модели: а) – суммарный разрез с использованием «оптимизированной» глубинной миграции; б) – разрез с использованием «оптимизированной» глубинной миграции для фиксированного выноса; в), г) – разрезы с использованием глубинной объектно-ориентированной миграции для фиксированного угла открытия: в) - 00, г) - 100.

Заключение

В работе проведено исследование алгоритмов миграции на предмет построения качественных изображений доюрского комплекса. Показана недостаточность временной обработки сейсмических данных и необходимость глубинной обработки для построения кинематически корректных изображений доюрских отложений, включая построение качественной глубинно-скоростной модели. Также проведено сравнение различных миграционных алгоритмов, основанных

на Гауссовых пучках, и выявлено, что объектно-ориентированная миграция даёт наиболее качественные результаты, а именно она восстанавливает детальное изображение объектов доюрского комплекса с хорошей прослеживаемостью горизонтов при достаточно высоком отношении сигнал/помеха.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-45-540004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протасов М.И., Чеверда В.А. Построение сейсмических изображений в истинных амплитудах /Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 4. – С. 528-532.
2. Hill N. R. Prestack Gaussian-beam depth migration // Geophysics. – 2001. – V.66. – P. 1240–1250.
3. Protasov M.I., Tcheverda V.A., Pravduhin A.P. 3D true-amplitude anisotropic elastic Gaussian beam depth migration of 3D irregular data // Journal of seismic exploration. – 2019. – V.28. – P.121-146.
4. Voronovicheva E.M., Litvichenko D.A., Pavlovskiy Y.V., Shevchenko A.A., Romanchenko I.V., Lisitsa V.V., Cheverda V.A. and Vishnevsky D.M. 3D Seismic Modeling for Studying the Pre-Jurassic Complex of the Tomsk Region // Geomodel-2019. Geomodel 2019: International conference and exhibition “Geomodel 2019”: EAGE Extended Abstracts, Gelendzhik, 9–13 Sep 2019. – Gelendzhik: EAGE, 2019. – P.1–6.

REFERENCES

1. Protasov M.I., Cheverda V.A. Postroyeniye seysmicheskikh izobrazheniy v istinnykh amplitudakh /Doklady RAN. – 2006. – T. 407. – № 4. – S. 528-532.
2. Hill N. R. Prestack Gaussian-beam depth migration // Geophysics. – 2001. – V.66. – P. 1240–1250.
3. Protasov M.I., Tcheverda V.A., Pravduhin A.P. 3D true-amplitude anisotropic elastic Gaussian beam depth migration of 3D irregular data // Journal of seismic exploration. – 2019. – V.28. – P.121-146.
4. Voronovicheva E.M., Litvichenko D.A., Pavlovskiy Y.V., Shevchenko A.A., Romanchenko I.V., Lisitsa V.V., Cheverda V.A. and Vishnevsky D.M. 3D Seismic Modeling for Studying the Pre-Jurassic Complex of the Tomsk Region // Geomodel-2019. Geomodel 2019: International conference and exhibition “Geomodel 2019”: EAGE Extended Abstracts, Gelendzhik, 9–13 Sep 2019. – Gelendzhik: EAGE, 2019. – P.1–6.

© М. И. Протасов, Д. А. Литвиченко, 2021

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ ЛУЧЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Максим Игоревич Протасов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, ведущий научный сотрудник, тел. (383) 330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Александрович Неклюдов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, старший научный сотрудник, тел. (383) 330-27-96, e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

В работе представлены алгоритмы расчёта частотно-зависимых лучей. Рассматриваются три варианта параметризации сейсмических моделей: сеточная модель, сеточная модель с заданными на сетке границами геологических тел, модель, заданная явными функциями. В статье представлены анализ алгоритмов трассирования частотно-зависимых лучей, определены оптимальные алгоритмы для каждой параметризации модели, а также их сравнение с результатами стандартной лучевой теории и конечно-разностного моделирования.

Ключевые слова: частотно-зависимые лучи, параметризация модели, лучевая теория.

METHODS FOR CALCULATION OF FREQUENCY DEPENDENT RAYS DEPENDING ON THE MODEL PARAMETRIZATION

Maxim I. Protasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Scientist, tel. (383) 330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.nsc.ru

Dmitry A. Neklyudov

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

The paper presents algorithms for calculating frequency-dependent rays. Three variants for the parametrization of seismic models are considered: a grid model, a grid model with the boundaries of geological bodies specified on the grid, and a model specified by explicit functions. The paper presents an analysis of frequency-dependent ray tracing algorithms, determines the optimal algorithms for each model parameterization, as well as their comparison with the results of standard ray theory and finite-difference modeling.

Keywords: frequency-dependent rays, model parameterization, ray theory

Сеточная модель и методы частотно-зависимого трассирования. Сеточное представление модели является наиболее используемой в практике моделирования и обработки сейсмических данных. Соответственно большинство исследователей разрабатывает алгоритмы, включая алгоритмы частотно-зависимого трассирования, ориентированные на такую параметризацию модели.

В статье [10] показано, что время пробега волны в ограниченном диапазоне частот связано с объемным интегралом от медленности по волновому пути между источником и приемником, где волновой путь зависит от частоты. Т. Фореманом предложен способ “извлечения” частотно-зависимых лучей из решения уравнения Гельмгольца [6]. Такой подход даёт точные частотно-зависимые лучи, но требует решения уравнения Гельмгольца, что вычислительно существенно дороже, чем трассирование лучей. Известны несколько попыток получить частотно-зависимые решения, оставаясь при этом в рамках схемы трассирования лучей. В работе [4] используется приближение к уравнению Гельмгольца, где рассчитывается медленность, которая зависит от частоты, и далее применяется стандартное лучевое трассирование. Основной недостаток данного подхода в том, что решение на низких частотах зависит от решения на высоких частотах, что дополнительно может приводить к численно неустойчивому решению.

Наиболее привлекательными с практической точки зрения являются подходы, предложенные в работах [8, 9] и [3]. В работе [3] предложено использовать сглаживание модели. Однако, обычное сглаживание приводит к противоречивой схеме в том смысле, что модель сглаженной скорости является кинематически некорректной. Поэтому используя простой и эффективный метод возмущений, эффект сглаживания компенсируется [3]. Это происходит за счёт того, что времена пробега рассчитываются в исходной скоростной модели, тогда как сам луч, его геометрия рассчитываются в сглаженной модели. В этом случае, если связать размер ядра сглаживания с частотой через зону Френеля, то можно получить упрощённую аппроксимацию расчёта частотно-зависимых лучей. На примере модели Sigsbee (Рис. 1) хорошо видно, что такой подход даёт более корректное описание времён пробега волн при прохождении через соляное тело сложной формы, на котором проявляются ограничения стандартного лучевого трассирования.

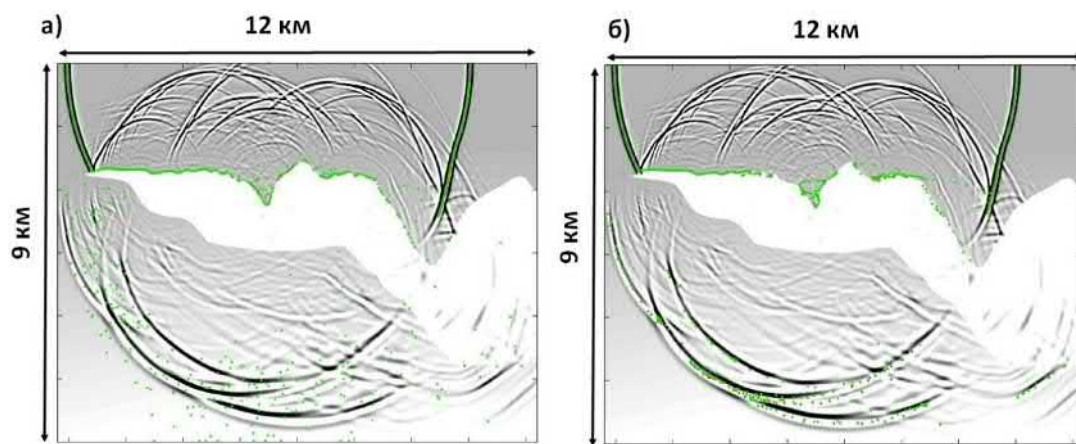


Рис. 1. Снимок волнового поля в модели Sigsbee после прохождения волны от источника через соляное тело и времена пробега (зелёным), рассчитанные лучевым методом (а) и метод возмущений со сглаживанием модели (б).

Однако разные уровни сглаживания дают корректное описание времен разных частей волнового поля, что означает, что сглаживание для разных частей модели и волнового поля в нём разное.

Учёт этих эффектов осуществляется в другом подходе [8]. А. Ломакс разработал алгоритм частотно-зависимого трассирования лучей, основанный на локальном сглаживании в пределах длины волны в процессе трассирования. Этим методом осредняется скоростная модель в плоскости, перпендикулярной к лучу, с использованием весовой функции, ширина которой пропорциональна длине волны. Теоретический анализ указанного метода произведен позже в работе [9], он приводит к несколько иным весовым функциям, чем в представленных А. Ломаксом ранее. Пример на модели Sigsbee демонстрирует эффективность алгоритма Ломакса. На рис. 2б изображены времена пробега лучевым методом (чёрным), частотно-зависимым трассированием Ломакса (красным) и времена пробега, снятые с сейсмограммы, посчитанной конечно-разностным моделированием. Как видно из рисунка, годограф, рассчитанный на основе частотно-зависимых лучей, непрерывен и совпадает с годографом снятым с сейсмограммы, тогда как поле времён лучевого метода заметно отличается и является нерегулярным. Также видно, что поле частотно-зависимых лучей регулярно и не имеет зон тени (рис. 2а). При этом вычислительные затраты превышают в два-три раза затраты, необходимые для стандартного трассирования.

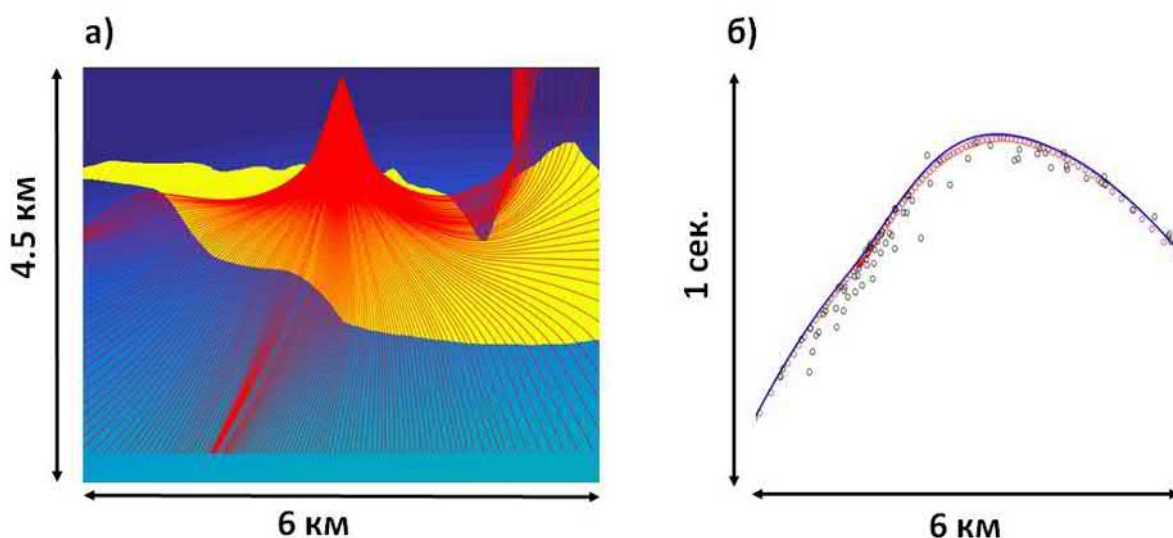


Рис. 2. а) Частотно-зависимые лучи, посчитанные на основе локального осреднения Ломакса в модели Sigsbee2A. б). Времена пробега лучевым методом (чёрным), частотно-зависимым трассированием Ломакса (красным) и времена пробега, снятые с сейсмограммы, посчитанной конечно-разностным моделированием.

Представленные результаты и анализ описанных работ указывает на то, что эмпирический метод А. Ломакса является наиболее подходящим алгоритмом частотно-зависимого трассирования лучей для сеточной модели.

Частотно-зависимое трассирование в модели с контрастными границами. Во многих реалистичных геологических моделях лучевой метод достаточно хорошо работает в большей части модели, а проблема с трассированием является локализованной. Пример с высокоскоростными соляными включениями показывает, что трудности с лучевым методом возникают на контрастной границе соляного тела, тогда как в остальной модели лучевой метод достаточно хорошо описывает процесс распространения волн. Поэтому логично и более практически целесообразно в рамках сеточной модели задать границу соляного тела, и проблему трассирования решать на этой границе [7].

Хотя метод локального сглаживания скорости выглядит наиболее предпочтительным для сеточной модели, тем не менее, ни в одном из исследований [8, 9] не рассматривается распространение волн через контрастные нерегулярные границы. Решение проблемы численной неустойчивости решения при переходе через контрастную границу посвящена работа [7], где введено сглаживание нормали к границе, однако частотно-зависимая природа волн не рассмотрена. В работе [2] описывается частотно-зависимое трассирование лучей через нерегулярные границы раздела сред. Этот подход основан на использовании граничных интегралов так, что вне границ – это обычная трассировка лучей, а на границе – способ сглаживания в пределах длины волны. При этом сглаживается не скорость, а граница. Это сглаживание зависит от френелевского объема, который, в свою очередь, зависит от частоты и угла падения луча на границу. На основе этих работ можно сделать вывод, что такого рода сглаживание во многом решает задачу частотно-зависимого трассирования в моделях с контрастными границами и является оптимальным с точки зрения достижения цели с минимальными численными затратами.

Ниже представлен пример, демонстрирующий эффективность описанного подхода. На рис. 3, б изображены сейсмограммы волнового поля, рассчитанные с использованием конечно-разностной схемы (серым), и времена пробега, рассчитанные на основе частотно-зависимых решений, для частоты 10 Гц (чёрным). Как видно из рисунка, годограф, рассчитанный на основе частотно-зависимых лучей, непрерывен. Также видны практически идеальные совпадения волн с максимальной энергией с частотно-зависимыми временами пробега. Обращает на себя внимание тот факт, что поле частотно-зависимых лучей регулярно и не имеет зон тени, что соответствует непрерывности фронта волны после прохождения через границу соли. При таких результатах требуемые для этого вычислительные ресурсы превышают необходимые для стандартного трассирования приблизительно на 20 процентов.

Объектно-ориентированные модели, заданные явными функциями, и частотно-зависимые лучи. В случае, когда сейсмические работы проводятся на локализованном в пространстве объекте относительно небольшого размера, например, около-скважинное пространство, угольный пласт и т.д., модель среды

удобно представить в виде набора слоев, разделенных неплоскими поверхностями. Поскольку слои по мощности можно задать небольшими, соответствующими геологическим, таким образом, что изменчивость свойств по глубине внутри слоя практически отсутствует, то в каждом слое задается функция «медленности» (величина обратная скорости) $S_j(x, y)$, которая зависит от латеральных координат x, y , но не зависит от глубины z . При этом $S_j(x, y)$ может определяться явно, например, через полиномы Чебышева 3-й степени. Каждая из поверхностей $Z_j(x, y)$, разделяющих слои, также может быть описана полиномами Чебышева аналогично со своими коэффициентами разложения. Использование полиномов для параметризации модели позволяет получить значительные вычислительные преимущества: времена пробега и их производные по параметрам, определяющим луч, вычисляются аналитически. При этом при решении обратных задач такое представление модели позволяет существенно уменьшить число искомых параметров по сравнению с распространённым сеточным представлением модели, что приводит к более быстрому, надёжному и устойчивому решению обратных задач.

Поскольку алгоритм стандартного трассирования для такого представления модели решается с использованием минимизации функционала, поэтому для учета ограниченности спектра реального зондирующего сигнала наиболее подходящей и оптимальной для такого представления модели является адаптация [1] подхода, предложенного в работе [5]. Суть подхода заключается в том, что вместо функционала Ферма рассматривается модифицированная целевая функция, в которой ко времени пробега вдоль луча добавляется еще одно слагаемое, характеризующее его длину. Тогда появляется положительная константа – регуляризирующая постоянная, которая определяет меру отклонения искомого луча, в общем случае изгибающегося от прямой линии. Основная идея, заложенная в выборе этого параметра, заключается в том, чтобы получать луч с наименьшей длиной из всех лучей, принадлежащих френелевскому объему, приуроченному к стандартному высокочастотному лучу.

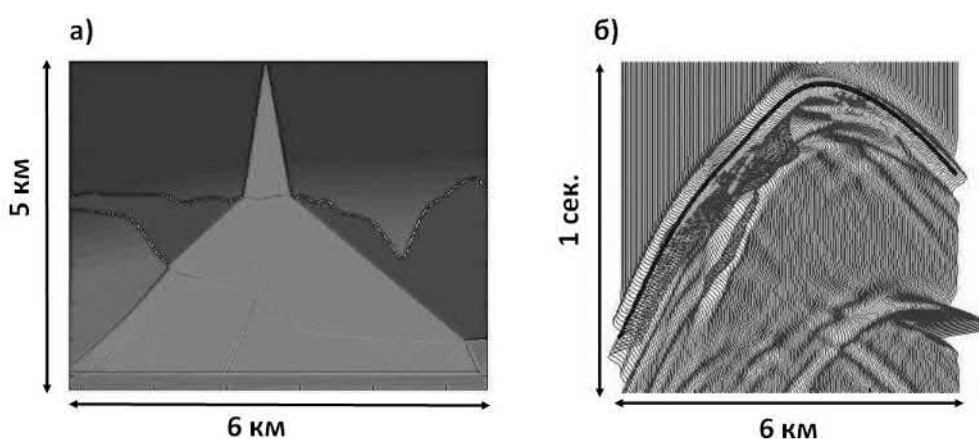


Рис. 3. а) Частотно-зависимые лучи, посчитанные на основе сглаживания границы для частоты 10 Гц в модели Sigsbee2A. б). Сейсмограмма конечно-разностного моделирования и частотно-зависимые времена пробега (чёрным) для частоты 10 Гц

На рис.4 приведено сравнение результатов описанного метода построения частотно-зависимых лучей с аналитическими решениями лучевого метода для трёхслойной модели с однородными слоями и горизонтальными границами. Как можно видеть, поведение построенных лучей существенно различается в той области, где они подходят под большими углами падения к горизонтальным границам на глубине 1 км и 2 км. Причем различие становится более очевидным и сильным при уменьшении частоты. Такое различие в поведении лучей объясняется неадекватностью описания реального физического процесса распространения волн лучевым методом в окрестности критического угла падения. Тогда как частотно-зависимые лучи, построенные описанным способом, призваны более корректно аппроксимировать решение волнового уравнения. Поэтому в задачах, где необходимо считать лучи, проходящие под большими углами падения через границы, например, при межскважинном просвечивании, важно учитывать подобные эффекты и использовать частотно-зависимые лучи.

Закключение. В работе рассмотрены три варианта параметризации сейсмических моделей: сеточная модель, сеточная модель с заданными на сетке границами геологических тел, модель, заданная явными функциями. Представлены и обоснованы оптимальные практические алгоритмы трассирования частотно-зависимых лучей для каждой из моделей. Численные результаты демонстрируют возможности и необходимость использования частотно-зависимых лучей в рамках описанных моделей при решении конкретных практических задач.

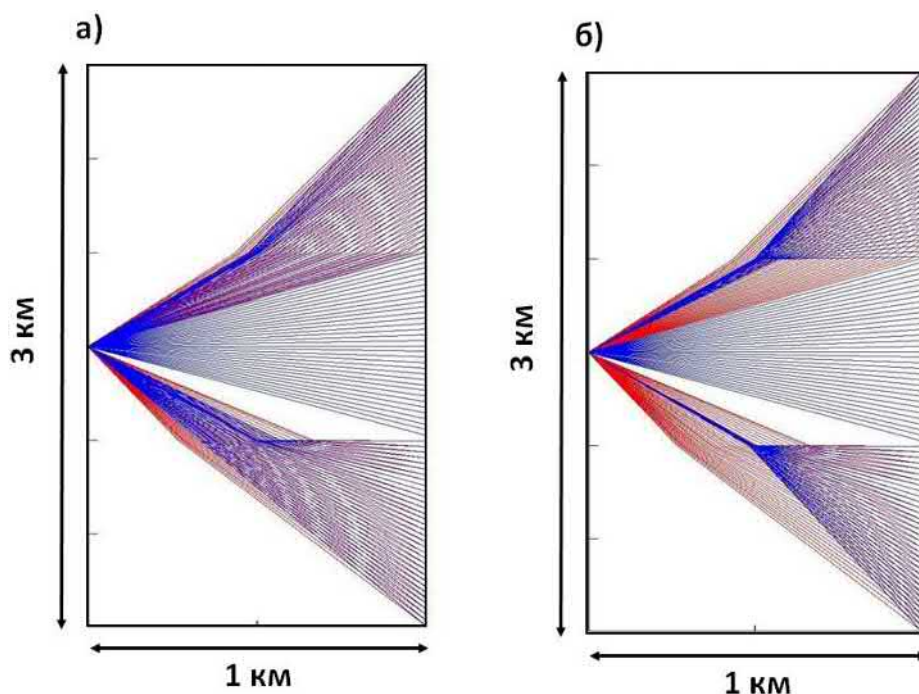


Рис. 4. Лучи в трёхслойной модели. Стандартные лучи (красным), частотно-зависимые (синим): а) – 30 Гц, б) – 0.03 Гц

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта №20-55-26003. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and GACR, project number 20-55-26003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неклюдов Д.А., Протасов М.И. «Волновое» трассирование лучей для трёхмерной межскважинной томографии / Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С.32-38.
2. Протасов М.И., Осипов К.С. Частотно-зависимое лучевое трассирование для неплоских границ / Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. – С.25-31.
3. Baina R., Zamboni R., Lambaré G. How to Cope with Smoothing Effect in Ray Based PSDM? // EAGE-2006. 68th EAGE Conference and Exhibition: International conference and exhibition “EAGE-2006”: EAGE Extended Abstracts, Vienna, 12–15 June 2006. – Vienna: EAGE, 2006. – cp-2-00177.
4. Biondi B. Solving the frequency dependent eikonal equation // SEG-1992. 72nd SEG Annual International Meeting: International conference and exhibition “SEG-1992”: SEG Expanded Abstracts, New Orleans, 25–29 October 1992. – New Orleans: SEG, 1992. – P. 1315-1319.
5. Bube K.P., Washbourne J.K. Wave tracing: ray tracing for the propagation of band-limited signals: Part 1 – Theory // Geophysics. – 2008. – V. 73. – P. VE377-VE384.
6. Foreman T. L. An exact ray theoretical formulation of the Helmholtz equation // Journal Acoustical Society of America. – 1989. – V. 86(1). – P. 234-246.
7. Hobro J.W.D., Nichols D., and Fletcher R. Direct representation of complex, high-contrast velocity features in Kirchhoff PreSDM velocity models // EAGE-2008. 70th EAGE Conference and Exhibition: International conference and exhibition “EAGE-2008”: EAGE Extended Abstracts, Roma, 9–12 June 2008. – Roma: EAGE, 2008. – F030.
8. Lomax A. The wavelength-smoothing method for approximating broad-band wave propagation through complicated velocity structures // Geophys. J. Intern. – 1994. – V. 117. – P. 313–334.
9. Lomax A., Snieder R. Estimation of finite-frequency waveforms through wavelength-dependent averaging of velocity // Geophys. J. Intern. – 1996. – V. 126. – P. 369–381.
10. Woodward M. Wave-equation tomography // Geophysics. – 1992. – V. 57. – P. 15–26.

REFERENCES

1. Neklyudov D.A., Protasov M.I. «Volnovoye» trassirovaniye luchey dlya trokhmernoy mezhskvazhinnoy tomografii / Tekhnologii seysmorazvedki. – 2016. – № 2. – S.32-38.
2. Protasov M.I., Osipov K.S. Chastotno-zavisimoye luchevoye trassirovaniye dlya neploskikh granits / Tekhnologii seysmorazvedki. – 2014. – № 3. – S.25-31.
3. Baina R., Zamboni R., Lambaré G. How to Cope with Smoothing Effect in Ray Based PSDM? // EAGE-2006. 68th EAGE Conference and Exhibition: International conference and exhibition “EAGE-2006”: EAGE Extended Abstracts, Vienna, 12–15 June 2006. – Vienna: EAGE, 2006. – cp-2-00177.
4. Biondi B. Solving the frequency dependent eikonal equation // SEG-1992. 72nd SEG Annual International Meeting: International conference and exhibition “SEG-1992”: SEG Expanded Abstracts, New Orleans, 25–29 October 1992. – New Orleans: SEG, 1992. – P. 1315-1319.
5. Bube K.P., Washbourne J.K. Wave tracing: ray tracing for the propagation of band-limited signals: Part 1 – Theory // Geophysics. – 2008. – V. 73. – P. VE377-VE384.
6. Foreman T. L. An exact ray theoretical formulation of the Helmholtz equation // Journal Acoustical Society of America. – 1989. – V. 86(1). – P. 234-246.
7. Hobro J.W.D., Nichols D., and Fletcher R. Direct representation of complex, high-contrast velocity features in Kirchhoff PreSDM velocity models // EAGE-2008. 70th EAGE Conference and

Exhibition: International conference and exhibition “EAGE-2008”: EAGE Extended Abstracts, Roma, 9–12 June 2008. – Roma: EAGE, 2008. – F030.

8. Lomax A. The wavelength-smoothing method for approximating broad-band wave propagation through complicated velocity structures // Geophys. J. Intern. – 1994. – V. 117. – P. 313–334.

9. Lomax A., Snieder R. Estimation of finite-frequency waveforms through wavelength-dependent averaging of velocity // Geophys. J. Intern. – 1996. – V. 126. – P. 369–381.

10. Woodward M. Wave-equation tomography // Geophysics. – 1992. – V. 57. – P. 15–26.

© *М. И. Протасов, Д. А. Неклюдов, 2021*

РЕДУКЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В МАТРИЦЕ ПОРОДЫ

Дмитрий Игоревич Прохоров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, младший научный сотрудник, e-mail: ProkhorovDI@ipgg.sbras.ru; Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 4, аспирант

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, заведующий лабораторией, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Ярослав Владимирович Базайкин

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 4, заведующий лабораторией, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

В статье описано применение алгоритма редукции цифровых изображений для ускорения вычисления персистентных диаграмм, которые описывают изменения топологии порового пространства породы в процессе растворения. Показана зависимость эффективности алгоритма редукции от свойств образца горной породы и величины дискретного шага времени.

Ключевые слова: персистентные гомологии, редукция цифровых изображений, химическое растворение

DIGITAL IMAGE REDUCTION FOR EFFICIENT COMPUTATION TOPOLOGICAL CHANGES IN THE ROCK MATRIX

Dmitriy I. Prokhorov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuga Ave., junior researcher, e-mail: ProkhorovDI@ipgg.sbras.ru; Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Akademika Koptuga Ave., Ph.D. student

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuga Ave., laboratory head, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Yaroslav V. Bazaikin

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Akademika Koptuga Ave., laboratory head, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

The article describes the application of the digital image reduction algorithm to speed up the calculation of persistent diagrams that describe changes in the topology of the pore space of the rock matrix during the dissolution process. The dependence of the efficiency of the reduction algorithm on the properties of the rock sample and the value of the discrete time step is shown.

Keywords: persistent homology, digital image reduction, chemical dissolution

Оценка характеристик процесса, выражающегося в изменении порового пространства породы с течением времени – одна из актуальных задач нашего времени. Потребность в такой оценке возникает, например, при кислотной обработке пласта [1, 2], при захоронении углекислого газа в карбонатных пластах [3, 4], при биологически-активированной кальцитизации сыпучих материалов [5] и др. Динамику этого процесса можно выразить как набор последовательных цифровых изображений горной породы, где последовательность отвечает дискретному времени, а каждое цифровое изображение представляет пространственную дискретизацию породы, например, томографическое изображение. В вычислительной топологии такая последовательность (если она монотонна) называется фильтрацией, и естественной мыслью является подсчет топологических инвариантов фильтрации, называемых персистентными числами Бетти. Одним из преимуществ персистентных чисел Бетти является то, что они оценивают топологическую сложность фильтрации (т.е. количество относительных гомологических циклов, взятых по отношению к уровню фильтрации). Другое свойство, очень важное для приложений, – их устойчивость по отношению к возмущению фильтрации. Это значит, что небольшая погрешность в данных ведет к небольшой погрешности в персистентной диаграмме (персистентная диаграмма сводит в себе всю необходимую информацию о персистентных числах Бетти).

В трехмерном пространстве только 0, 1 и 2-мерные числа Бетти не равны нулю. При этом вычисление 0 и 2-мерных, основанное на системе непересекающихся множеств и двойственности цифровых пространства, не требует больших вычислительных ресурсов. Совсем другая ситуация с одномерными, для их вычисления используется алгоритм Эдельсбруннера-Летшера-Зомородяна, который имеет кубическую сложность от размера изображения.

Основной идеей данной работы является использование алгоритма редукции цифрового изображения, согласованного с алгоритмом Эдельсбруннера-Летшера-Зомородяна вычисления персистентных диаграмм. Редукция базируется на ретракции цифрового изображения с дополнительным условием на сохранение фильтрации.

Для получения топологической модели вводится функция, которая по исходному значению вокселя определяет его новое бинарное значение. Таким образом, получается изображение, где каждый воксель имеет один из двух цветов 0 или 1. Один цвет соответствует породе, другой порам.

Затем, в зависимости от того структуру чего нужно изучить, выбирается цвет. Каждому вокселю данного цвета ставится в соответствие его топологическая модель. *Воксель* – куб с центром в точке с полуцелочисленными координатами и длиной ребра 1. Конечное множество вокселей образует топологическое пространство X , топология на котором может задаваться несколькими способами: *6-связность* – соседями вокселя являются только те воксели, которые имеют с ним общую грань, *26-связность* – соседями вокселя являются воксели,

имеющие с ним общую грань, ребро или вершину. Данное топологическое пространство называется *трехмерным цифровым изображением*.

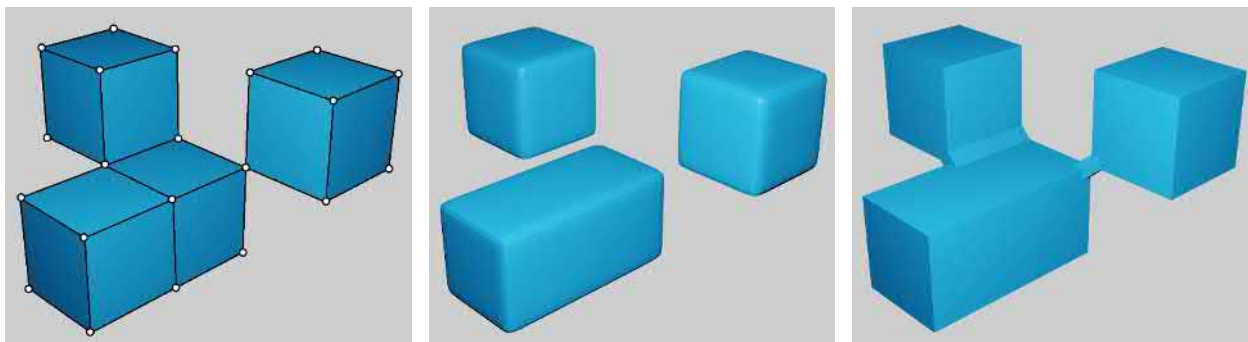


Рис. 1. Исходное изображение (слева) и его представления с 6-связностью (центр), 26-связностью (справа)

При численном моделировании связность пространства напрямую зависит от выбора численного метода и зачастую соответствует 6-связности, поскольку при использовании метода конечных разностей и метода конечных объемов потоки определяются через грани ячеек, а решение в ячейках, имеющих общее ребро или вершину напрямую не связано [6, 7]. Поэтому, воксели, входящие в дополнение (матрица породы) имеет 26-связность.

Эволюция изображения X , например, динамика расширения порового пространства задает *фильтрацию* - вложенную последовательность изображений $X^0 \subseteq X^1 \subseteq \dots \subseteq X^m$. Для каждой пары индексов $0 \leq i < j \leq m$ вложение $X^i \subseteq X^j$ индуцирует гомоморфизм p -мерных групп гомологий:

$$f_p^{i,j} : H_p(X^i) \rightarrow H_p(X^j)$$

Персистентной группой размерности p называется образ рассмотренного выше гомоморфизма: $H_p^{i,j} = \text{Im}(f_p^{i,j})$. Соответственно, ранг этой группы $\beta_p^{i,j}$ называется *p -мерным персистентным числом Бетти*.

Как было сказано выше, для вычисления персистентных диаграмм используется алгоритм с кубической сложностью, поэтому уменьшение количества входных данных значительно увеличивает скорость вычислений.

Алгоритм редукции основан на ретракции. Ретракция вокселя означает удаление его свободной грани. Наш алгоритм представляет собой версию алгоритма, описанного в [8], адаптированную для трехмерных цифровых изображений с 6-связностью.

Алгоритм принимает на вход цифровое изображение, которое представляет фильтрацию $\{X\}_0^m$. Он последовательно удаляет воксели в соответствии с описанными ниже правилами, начиная с вокселей, имеющих значение m , и заканчивая 1. Все условия проверяются в окрестности вокселя размером $3 \times 3 \times 3$.

1. Количество компонент связности изображения X^i при удалении текущего вокселя не изменяется.

2. Количество компонент связности дополнения изображения X^i при удалении текущего вокселя не изменяется.

3. Эйлерова характеристика изображения X^i при удалении текущего вокселя не изменяется.

4. Текущий воксель не находится ни в одном параллелепипеде, состоящем из вокселей X^m с размером $1 \times 1 \times 2$ или $1 \times 2 \times 2$ или $2 \times 2 \times 2$, который содержит воксели с большим значением.

Если воксель был удален, алгоритм перепроверяет его соседей.

Легко доказать, что алгоритм редукции имеет линейную сложность по числу вокселей в изображении. Проверка правил имеет константную сложность, и каждый воксель проверяется не более семи раз, потому что у него только шесть соседей.

В первой серии экспериментов мы использовали образцы, полученные методом усеченного гауссового поля [9]. Рассматривалась простая модель растворения матрицы; скорость реакции была постоянной всюду. Таким образом, граница раздела между жидкостью и твердым телом двигалась с постоянной нормальной скоростью. Это движение моделировалось методом level-set [7] со скоростью растворения 0,1 шаг пространства за временной шаг. Моделирование происходило в течение 100 шагов.

Статистическая модель определялась двумя параметрами: пористостью (φ , единицы) и длиной корреляции (λ , воксели). Для каждой пары параметров $\varphi = \{0.05, 0.1, 0.15, 0.2\}$ и $\lambda = \{5, 10, 15, 20\}$ мы построили 100 реализаций. Таким образом, всего мы сгенерировали 1600 изображений 250^3 вокселей каждое. Другой параметр, используемый для измерения эффективности алгоритма - количество шагов фильтрации. Мы сгруппировали последовательные шаги по два, пять и десять, так чтобы получить фильтрации с 10, 20, 50 и 100 шагами.

Результаты показаны на графиках ниже. Видно, что ускорение уменьшается с ростом пористости и уменьшением длины корреляции. Это объясняется тем, что при таких параметрах формируется более сложная топологическая структура. Также, в силу 4-го правила редукции, меньшее количество шагов фильтрации положительно влияет на коэффициент ускорения.

Другая серия экспериментов была проведена для образцов, полученных в результате лабораторных экспериментов по растворению карбонатов, как описано в [10]. Микро-КТ изображения имели размер 1000^3 вокселей с размером вокселя 5,2 мкм. Для каждого эксперимента имелось десять изображений, представляющих динамику растворения.

Мы вырезали из образцов фрагменты с наиболее выраженной динамикой растворения. Размер фрагментов – $400 \times 340 \times 400$ из образца АН $260 \times 320 \times 400$ из АЛ.

Результаты показаны в табл. 1. Ускорение для реальных экспериментов не хуже, чем для статистических образцов.

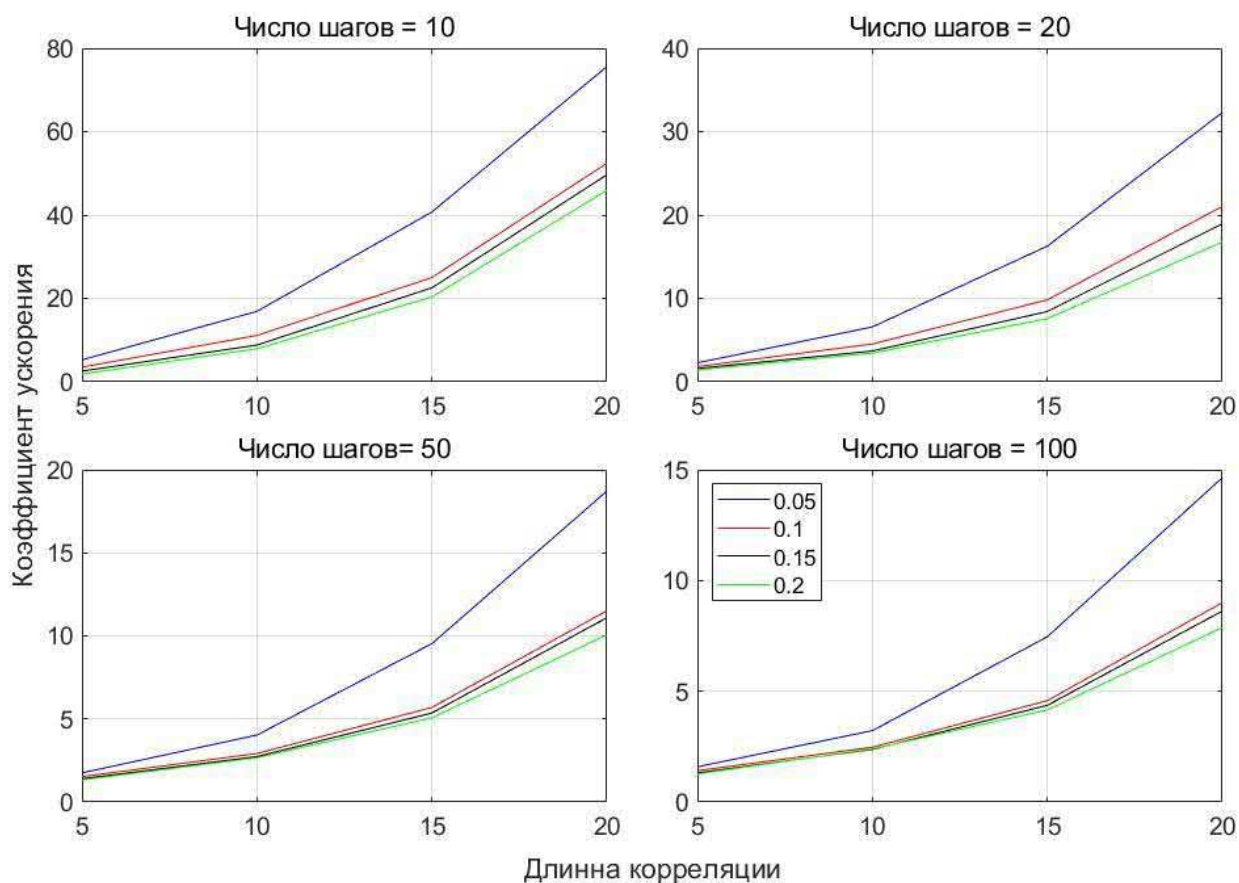


Рис. 2. Ускорение, полученное с помощью алгоритма редукции в зависимости усредненное по параметрам изображений (цветом показана различная пористость)

Таблица 1

Результаты для реальных экспериментов

Образец	АН	АЛ
Время работы алгоритма Эдельсбруннера без редукции (с.)	2485	445
Время работы алгоритма редукции (с.)	240	101
Время работы алгоритма Эдельсбруннера с редукцией (с.)	35	15
Кoeffициент ускорения	71	30

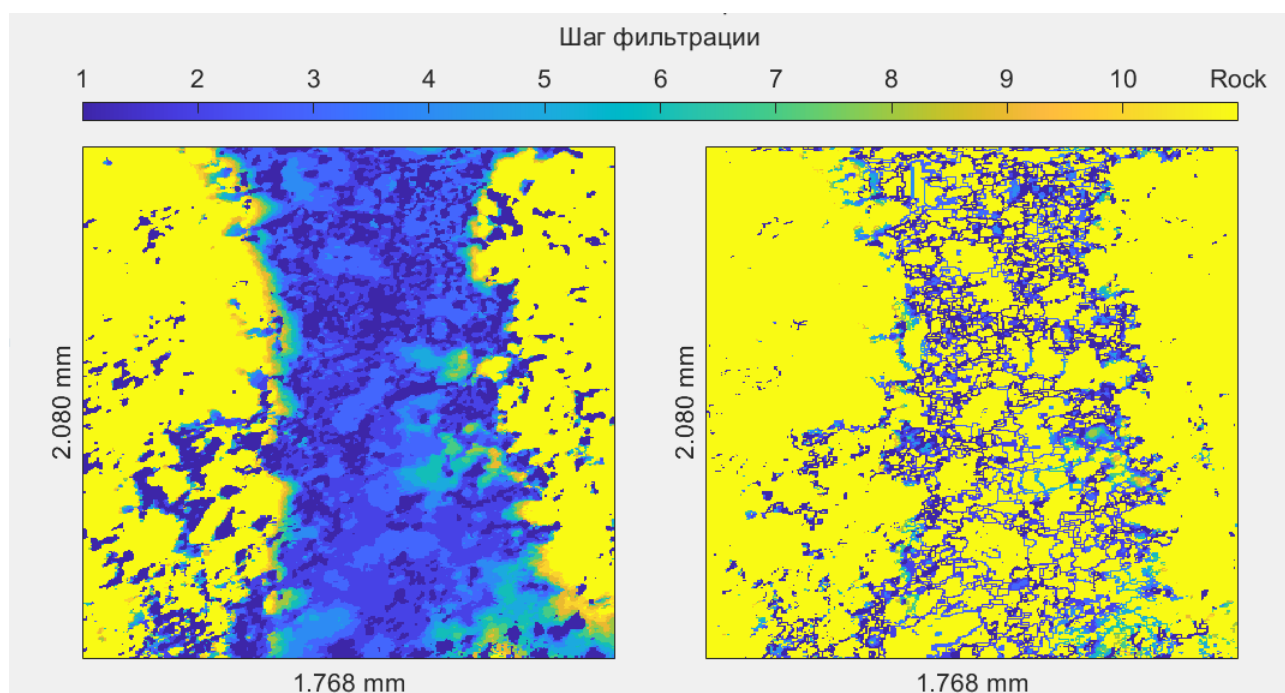


Рис. 3. Вертикальный срез образца АН до и после редукции

Мы показали, что использование алгоритма редукции ускоряет алгоритм Эдельсбруннера до 70 раз. Коэффициент ускорения зависит от сложности структуры порового пространства и динамики процесса растворения породы. Более того, использование алгоритма редукции позволяет вычислять числа Бетти для образцов размером до 500^3 вокселей с использованием одного вычислительного узла в течение приемлемого времени (менее 15 минут (на машине с Intel (R) Core (TM) i7-3770K CPU 3.5 GHz и 32 GB RAM)).

В будущем мы хотели бы изучить другие методы сокращения входных данных для алгоритма Эдельсбруннера, такие как коредукция и поиск ациклического комплекса. Тогда мы сможем найти наиболее эффективную комбинацию методов для цифровых изображений горных пород. Это позволит нам быстро решать задачи топологической оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ghommem M., Zhao W., Dyer S., Qiu X., Brady D. Carbonate acidizing: modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – 131. – P.18–33.
2. McLeod H.O. Matrix acidizing // *Journal of Petroleum Technology*. – 1984. – 36. – N 12. – P.2055–2069.
3. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka T., Henninges J., Sopher D., Zhang F. The first postinjection seismic monitor survey at the Ketzin pilot CO₂ storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – 66. – N 1. – P.62–84.
4. Vanorio T., Mavko G., Vialle S., Spratt K. The rock physics basis for 4D seismic monitoring of CO₂ fate: are we there yet? // *The Leading Edge*. – 2010. – 29. – N 2. – P.113–240.

5. Cui M.-J., Zheng J.-J., Zhang R.-J., Lai H.-J., Zhang J. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand // *Acta Geotechnica*. – 2017. – 12. – N 5. – P.971–986.
6. Гадильшина К.А., Хачкова Т.С., Лисица В.В. Численное моделирование химического взаимодействия флюида с горной породой // *Вычислительные методы и программирование*. – 2019. – 20. – С.457–470.
7. Васильев Р.В., Герке К.М., Карсанина М.В., Корост Д.В. Решение уравнения Стокса в трехмерной геометрии конечно-разностным методом // *Математическое моделирование*. – 2015. – 27. – No 6. – С.67–80.
8. P. Dlotko, H.Wagner, Simplification of complexes for persistent homology computations // *Homology, Homotopy and Applications*. – 2014. – 16. – P.49–63.
9. Hyman J.D., Winter C.L. Stochastic generation of explicit pore structures by thresholding Gaussian random fields // *Journal of Computational Physics*. – 2014. – 277. – P.16–31.
10. Al-Khulaifi Y., Lin Q., Blunt M.J., Bijeljic B. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multi-mineral carbonate at reservoir conditions: impact of physical and chemical heterogeneity // *Water Resources Research*. – 2019. – 55(4). – DOI:10.1029/2018WR024137.

REFERENCES

1. Ghommem M., Zhao W., Dyer S., Qiu X., Brady D. Carbonate acidizing: modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – 131. – P.18–33.
2. McLeod H.O. Matrix acidizing // *Journal of Petroleum Technology*. – 1984. – 36. – N 12. – P.2055–2069.
3. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka T., Henniges J., Sopher D., Zhang F. The first postinjection seismic monitor survey at the Ketzin pilot CO₂ storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – 66. – N 1. – P.62–84.
4. Vanorio T., Mavko G., Vialle S., Spratt K. The rock physics basis for 4D seismic monitoring of CO₂ fate: are we there yet? // *The Leading Edge*. – 2010. – 29. – N 2. – P.113–240.
5. Cui M.-J., Zheng J.-J., Zhang R.-J., Lai H.-J., Zhang J. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand // *Acta Geotechnica*. – 2017. – 12. – N 5. – P.971–986.
6. Gady'l'shina K.A., Hachkova T.S., Lisica V.V. Численное моделирование химического взаимодействия флюида с горной породой // *Вычислительные методы и программирование*. – 2019. – 20. – С.457–470.
7. Васильев Р.В., Герке К.М., Карсанина М.В., Корост Д.В. Решение уравнения Стокса в трехмерной геометрии конечно-разностным методом // *Математическое моделирование*. – 2015. – 27. – No 6. – С.67–80.
8. P. Dlotko, H.Wagner, Simplification of complexes for persistent homology computations // *Homology, Homotopy and Applications*. – 2014. – 16. – P.49–63.
9. Hyman J.D., Winter C.L. Stochastic generation of explicit pore structures by thresholding Gaussian random fields // *Journal of Computational Physics*. – 2014. – 277. – P.16–31.
10. Al-Khulaifi Y., Lin Q., Blunt M.J., Bijeljic B. Pore-scale dissolution by CO₂ saturated brine in a multi-mineral carbonate at reservoir conditions: impact of physical and chemical heterogeneity // *Water Resources Research*. – 2019. – 55(4). – DOI:10.1029/2018WR024137.

© Д. И. Прохоров, В. В. Лисица, Я. В. Базайкин, 2021

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МУЙСКОЙ ВПАДИНЫ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АРХИВНЫХ ДАННЫХ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

Айдиса Михайловна Санчаа

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, тел. 8(383)330-49-54, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник, тел. 8(383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты переинтерпретации архивных данных вертикальных электрических зондирований по Муйской впадине Байкальского рифта. Для верификации полученных данных выполнено двумерное математическое моделирование.

Ключевые слова: Муйская впадина, вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), геоэлектрическое строение, БАМ

GEOELECTRICAL STRUCTURE OF BAIKAL RIFT MUYSKAYA BASIN BASED ON ARCHIVAL GEOELECTRICAL DATA INTERPRETATION

Aidisa M. Sanchaa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Leading Scientist, tel.: +7-913-920-17-48, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Associate Professor, Chief Scientist. tel.: +7-913-890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of reinterpretation of the archive data of the vertical electric soundings on the Muyskaya depression of the Baikal Rift. Two-dimensional mathematical modeling was performed to verify the obtained data.

Keywords: Muyskaya basin, geoelectric structure, vertical electric sounding (VES), BAM (Baikal-Amur Mainline)

Один из наиболее сложных участков трассы БАМ проходит в южной части Муйской впадины. Актуальность полученных новых результатов о строении впадины связана с начатой в 2013 г. реконструкцией и модернизацией инфраструктуры этой магистрали. В последнее время значительно увеличился экспорт в страны АТР, поэтому перегружены и устарели коммуникации Транс-

сибирской железной дороги. Кроме того, для роста экономики России назрела необходимость развивать территории, прилегающие к БАМу, богатые полезными ископаемыми.

Муйская впадина расположена на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой зоны. По своей морфологии, геолого-тектоническому глубинному строению она значительно отличается от других зрелых кайнозойских впадин рифтовой зоны. Она является ярким примером еще не завершенного слияния субпараллельных депрессий в единую рифтовую структуру. В настоящее время активные современные тектонические процессы продолжают влиять на формирование впадины. Впадина вытянута в широтном направлении и имеет размеры примерно 90*45 км. Ее продольными ограничениями являются Северо-Муйское сбросо-сводовое и Южно-Муйское сводово-блоковое поднятия, поперечными – горные блоковые сооружения Верхнеангарско-Муйской и Муйско-Чарской межвпадинных перемычек.

Так как депрессия не является единой структурой, она объединяет несколько котловин различной величины. Выделяется локальная Улан-Макитская котловина, соединённая с основной территорией впадины только узким перешейком на юго-западе. Остальная часть Муйской впадины разделена продольной перемычкой на две тектонически изолированные впадины. Из них северная Парамская котловина ограничена с юга вдоль течения р. Муя выходами кристаллических пород на поверхность. Обширная южная часть называется Муйско-Куандинской котловиной [1]. Таким образом, по геологическим данным Муйская впадина фактически объединяет три отдельных депрессии: Парамскую, Муйско-Куандинскую, Улан-Макитскую. Внутривпадинная перемычка, разделяющая Парамскую и Муйско-Куандинскую котловины, сложена архейскими породами. Она субшироотно протягивается в виде узкой (4-8 км) низкогорной гряды (рис. 1). Её южный склон обрешан линией сброса, вертикальный разброс блоков по которому превышает 1000 м. Муйско-Куандинская котловина имеет сложную конфигурацию, с выходами пород фундамента на поверхность, выполнена рыхлыми отложениями, максимальная мощность которых отмечается у северного борта, западнее р. Витим. Северная Парамская котловина, имеет более простое строение. Наибольшее прогибание её фундамента предполагается ближе к северному ограничению, в то время как на юге мощность осадков плавно уменьшается к межвпадинной перемычке, возвышающейся всего на 20-400 м над аккумулятивной поверхностью [2].

Из всех кайнозойских впадин северо-восточного Прибайкалья Муйская имеет наиболее сложное разломно-блоковое строение, определяемое разрывными нарушениями различных направлений. Судя по всему, активизация тектонических движений в плиоцен-четвертичное время коснулась многих ранее существующих дизъюнктивов и вместе с новообразованными разрывными нарушениями они составили существующую ныне активную сеть разломов. Палеосейсмологические данные свидетельствуют о высокой сейсмической активности Муйской впадины в прошлом. В период инструментальных наблюдений за 1950-2020 гг. непосредственно в Муйской депрессии произошло одно из

сильнейших в Восточной Сибири за последние сто лет Муйское землетрясение (1957 г., с $M = 7,9$). В настоящее время по сравнению с другими районами северо-восточного Прибайкалья сейсмическая активность впадины снижена.

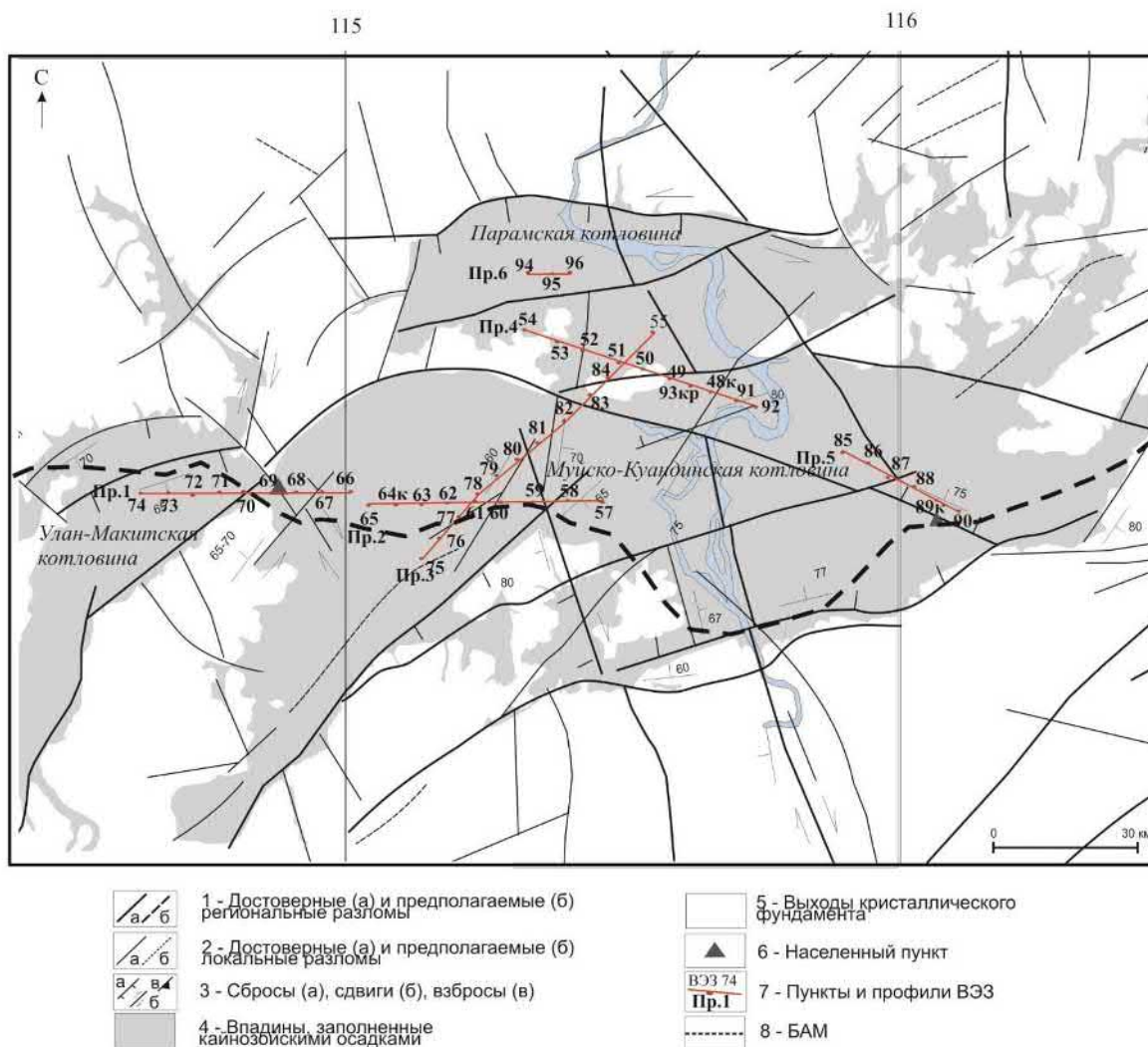


Рис. 1. Расположение профилей ВЭЗ на фрагменте карты разломно-блокового строения в Муйской впадине (по материалам Луниной О.В.)

Комплексные геофизические исследования Муйской депрессии связаны со строительством Байкало-Амурской магистрали (БАМ) и были выполнены в 80-е гг. прошлого века. По результатам этих работ мощность кайнозойских отложений депрессии оценивается крайне неоднозначно. Например, по гравитационным данным Ю.А. Зорина [3] она составляет 2100 м; на основании результатов совместной интерпретации гравиметрии МТЗ, ВЭЗ (1975-1980 гг) снижена до 1200 м; по данным детального ГСЗ, проведенному Б.П. Мишенькиным в 1981-1983 гг., достигает 1800 м. В связи с чем актуально ещё раз рассмотреть

архивные данные электроразведки с привлечением современных программных средств.

В данной работе для построения геоэлектрической модели были привлечены архивные данные ВЭЗ, полученные в 1981-1983 гг. Муйской электроразведочной партией. Измерения выполнены установкой Шлюмберже, минимальный полуразнос составлял 3 м, максимальный достигал 10 км, что обеспечивало высокую глубинность зондирований. Размещение профилей и пунктов измерений в основных структурных элементах исследуемого участка показано на (рис. 1). Большая часть пунктов ВЭЗ профиля 1 расположена в Улан-Макитской впадине. Пункты ВЭЗ 66-68 профиля 1, профили 2, 5, значительная часть профиля 3, наиболее протяженного, находятся Муйско-Куандинском локальном осадном бассейне. Пункты ВЭЗ 84, 51, 55 профиля 3 и профиль 4 расположены в северной Парамской котловине.

Интерпретация выполнена с использованием программ ZondIP, ZondRes2D, СОНЕТ. По результатам интерпретации сначала с использованием горизонтально-слоистой модели построены геоэлектрические разрезы по профилям наблюдений (всего 6 профилей), затем выполнены двумерная инверсия и двумерное моделирование для верификации и уточнения полученных результатов. Горные породы, выполняющие впадину, в целом высокоомны, даже минимальные значения УЭС превышает 150-200 Ом·м. Для всех разрезов характерны мощные слои вечномерзлых пород, достигающие 300-450 м. Осадочный чехол и фундамент Муйской впадины имеет ярко выраженное блоковое строение. В качестве примера рассмотрим результаты по одному из профилей.

На рисунке 2 представлены 1D, 2D геоэлектрические разрезы по профилю 3, пересекающему Муйско-Куандинскую впадину (ВЭЗ 75-82), внутривпадинную перемычку (между ВЭЗ 83, 84) и Парамскую котловину (ВЭЗ 51, 55). Общая протяженность профиля 35.5 км. Результаты 1D и 2D инверсий полевых данных принципиально согласуются. Полевые геолого-структурные исследования в Муйско-Куандинской (Мудириканской) впадине (Лунина, Гладков, ИЗК СО РАН [4]) свидетельствуют о высокой деформированности четвертичных осадков и преимущественно сбросовом типе смещений по разломам субширотного, запад-северо-западного и северо-восточного простирания, сопровождающихся менее значительной левосторонней сдвиговой компонентой.

Общая мощность осадков в центральной части разреза по профилю 3 превышает 3000 м (ВЭЗ 79-81). Далее с учетом данных геолого-структурных исследований было выполнено двумерное моделирование разломных структур. Для данного профиля рассмотрены 14 моделей. На рис. 3, 4 представлены кривые ВЭЗ 79 и 82, полученные в зонах разломов, и результаты 2d моделирования. В целом результаты неплохо согласуются. Конечно, следует предположить, что здесь влияет трехмерная неоднородность среды, но, к сожалению, нет площадных измерений, только профильные.

Далее результаты 2d моделирования использовались для построения разреза двумерной инверсии (рис. 5), который неплохо согласуется с разрезом двумерной инверсии полевых данных на рис. 2. В результате уточнен геоэлектрический

разрез в районе пунктов ВЭЗ 82-84, построен итоговый (рис. 5). Как следует из геологической информации амплитуда смещения по разрыву внутривпадинной перемычки может достигать 1000 м, что и подтверждается по данным геоэлектрики. На двумерных разрезах хорошо видны как ослабленные, так и консолидированные блоки фундамента.

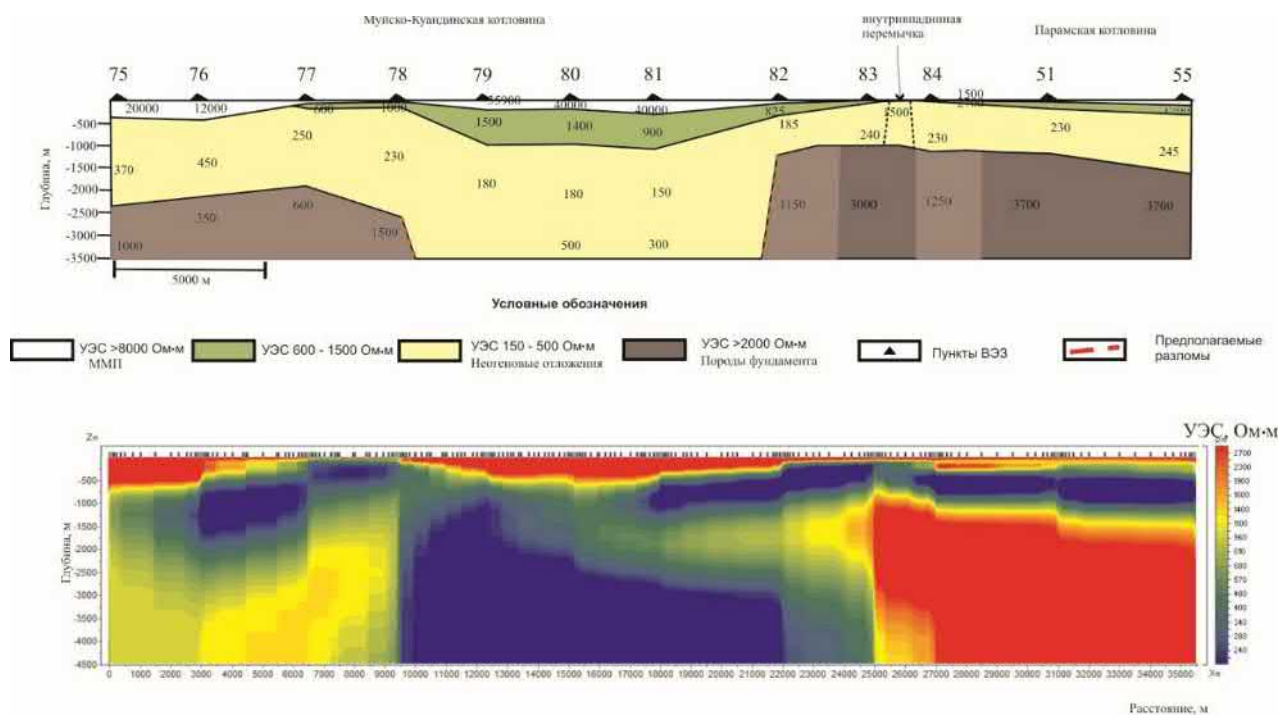


Рис. 2. Результаты 1D, 2D инверсий полевых данных по профилю 3 в Муйской впадине

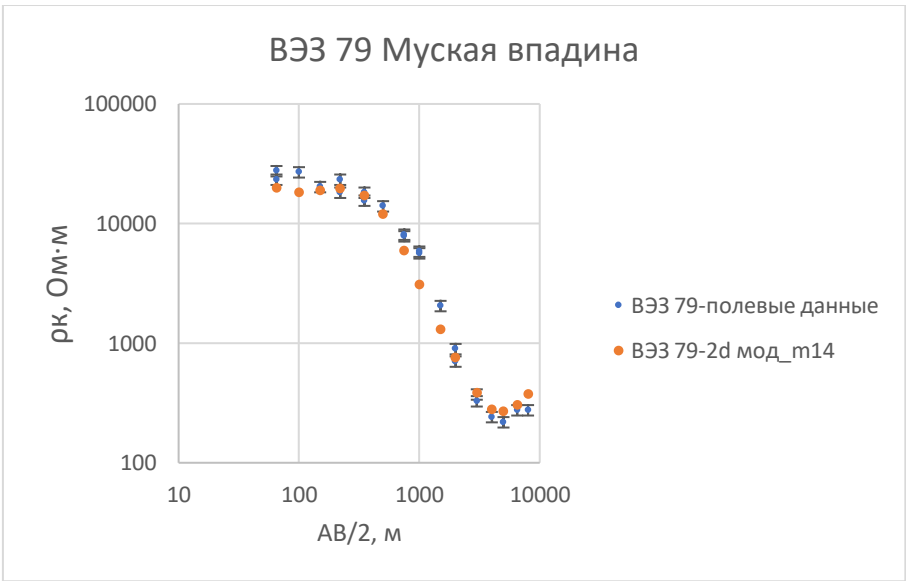


Рис. 3. Кривая ВЭЗ 79. Сравнение результатов 2D моделирования с полевыми данными. Ворота – 10%. Средняя погрешность 10,24%.

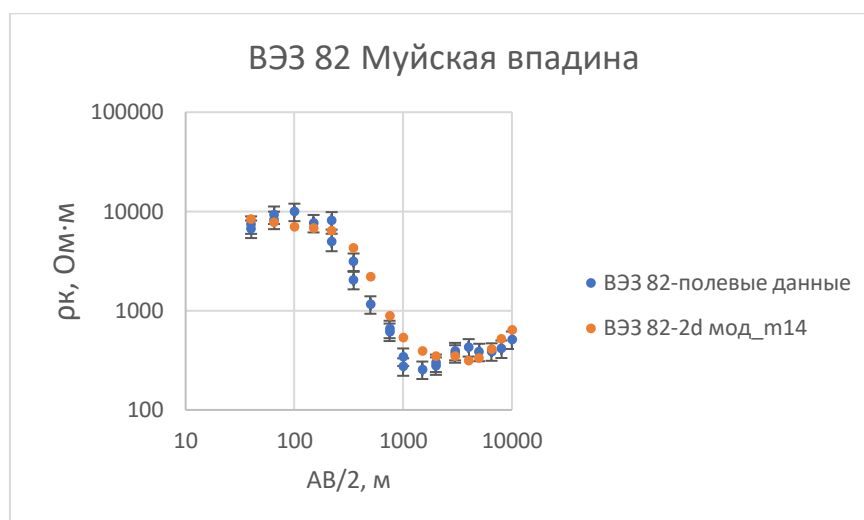


Рис. 4. Кривая ВЭЗ 82. Сравнение результатов 2D моделирования с полевыми данными. Ворота – 20%. Средняя погрешность 13,3%.

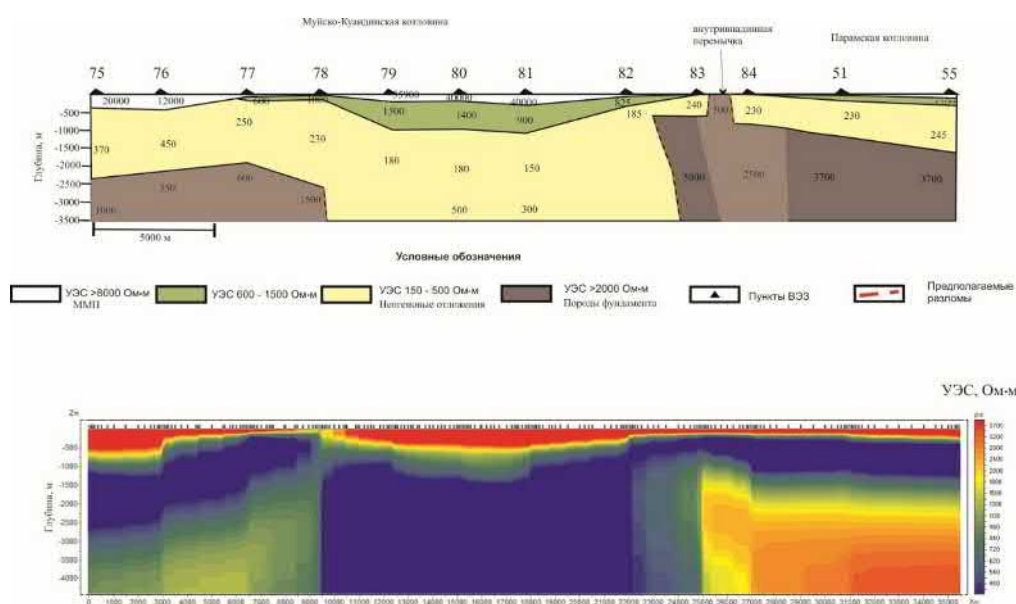


Рис. 5. Геоэлектрический разрез и результат двумерной инверсии модельных данных

Таким образом, построенные геоэлектрические разрезы отражают существенно блоковое строение фундамента впадины. УЭС пород фундамента, глубины до него меняется в широком диапазоне, что обусловлено как присутствием разломных зон, так и различной литологией горных пород. На всех разрезах выделены мощные слои многолетней мерзлоты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН №0331-2019-0015.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / С.М. Замараев, Е.П. Васильев, А.М. Мазукабзов и др.; отв. ред. С.Ф.Павлов. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1979. – 126 с. – Библиогр.: 121-124. – 1000 экз.
2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / С.И. Шерман, К.Г. Леви, В.В. Ружич и др.; отв. ред. Н.А. Логачев. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1984. – 207 с. – Библиогр.: с. 195–206. – 1000 экз.
3. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий / Зорин Ю.А. – Москва: Наука, 1971. – 168 с.
4. Лунина О.В., Гладков А.С. Активные разломы и поля напряжений северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны / О. В. Лунина, А. С. Гладков // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 146–160.

REFERENCES

1. Sootnoshenie drevnej i kajnozojskoj struktur v Bajkal'skoj riftovoj zone / S.M. Zamaraev, E.P. Vasil'ev, A.M. Mazukabzov i dr.; отв. red. S.F.Pavlov. - Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otделение, 1979. – 126 s. – Bibliogr.: 121-124. – 1000 ekz.
2. Geologiya i sejsmichnost' zony BAM. Neotektonika / S.I. SHerman, K.G. Levi, V.V. Ruzhich i dr.; отв. red. N.A. Logachev. – Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otделение, 1984. – 207 s. – Bibliogr.: s. 195–206. – 1000 ekz.
3. Novejshaya struktura i izostaziya Bajkal'skoj riftovoj zony i sopredel'nyh territorij / Zorin YU.A. - Moskva: Nauka, 1971. – 168 s.
4. Lunina O.V., Gladkov A.S. Aktivnye razlomы i polya napryazhenij severo-vostochnogo flanga Bajkal'skoj riftovoj zony // Geologiya i geofizika. – 2008. – T. 49, № 2. – S. 146–160.

© А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, 2021

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Айдиса Михайловна Санчаа

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, тел. 8(383)330-49-54, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник, тел. 8(383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты трехмерного моделирования разломной структуры Салгандуйского блока Курайской впадины. Моделирование включало выяснение угла наклона сместителя юго-восточного разломного ограничения.

Ключевые слова: Курайская впадина, вертикальные электрические зондирования, геоэлектрическое строение, трехмерное математическое моделирование

3D MODELLING OF THE FAULT STRUCTURE IN THE SOUTHERN PART OF THE KURAIKAYA BASIN ACCORDING TO DIRECT CURRENT METHOD DATA

Aidisa M. Sanchaa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Leading Scientist, tel.: +7-913-920-17-48, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Associate Professor, Chief Scientist, tel.: +7-913-890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

In this article we present the results of three-dimensional modeling of the fault structure of the Salgandui block of the Kuraikaya basin. The modeling included finding out the tilt angle of the fault plane displacer.

Key words: Kuraiskaya basin, geoelectric structure, direct current, 3d mathematical modelling

Курайская впадина является одной из крупных кайнозойских структур Горного Алтая. Она расположена в зоне современной сейсмической активизации. В настоящее время после Чуйского землетрясения 2003 г. с магнитудой 7.3 в её южной части продолжают происходить сейсмические события разного класса, чаще всего приуроченные к разломам. Сейсмологические данные свидетельствуют о напряженном состоянии впадины и об активности имеющихся разломных структур. Несмотря на достаточно большое количество геолого-геофизических данных, полученных на территории впадины в разные годы, строение отдельных её участков до конца непонятно. По результатам предшествующих наших исследований комплексом методов геоэлектрики построены сложные разломно-блоковые геоэлектрические модели депрессии [1, 2]. На данном этапе для уточнения строения участков с присутствием разломов привлекается численное трехмерное моделирование с использованием данных вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ).

В результате длительного геологического развития кайнозойских впадин Горного Алтая на территории многих из них наблюдаются выходы пород фундамента на дневную поверхность. Салгандуйский блок – пример такого феномена. В южной части этого блока выполнена съёмка по системе параллельных профилей (т.е. фактически площадная) методом ВЭЗ. По результатам 1D интерпретации построены разрезы по профилям измерений, на которых выделены разломы. В этой статье представлены результаты трёхмерного моделирования разломной структуры, ограничивающей с юго-восточной стороны Салгандуйский блок. На рис. 1 показано размещение блока на территории впадины, разломы по геологическим данным в этой части впадины [2], а также профили и пункты ВЭЗ, синим контуром отмечена область моделирования.

Для трёхмерного моделирования была использована модифицированная версия программы EMF_DC3Dmod [1, 2]. Новая версия отличается от первоначальной тем, что все расчёты проводятся на графических процессорах [3]. Существенное изменение алгоритма связано с решением полученной системы линейных уравнений и, прежде всего, использованием авторского предобуславливателя [4]. Предобуславливатель построен на основе метода Хотеллинга – Шульца, приближающий обратную матрицу. Причём вычисление самой предобуславливающей матрицы в алгоритме не требуется. На каждой итерации в методе сопряжённых градиентов вычисляется лишь результат воздействия предобуславливающей матрицы на вектор. Это является матрично-векторной операцией и хорошо распараллеливается на GPU. В результате удалось добиться ускорения в 50-60 раз по сравнению с последовательным вариантом.

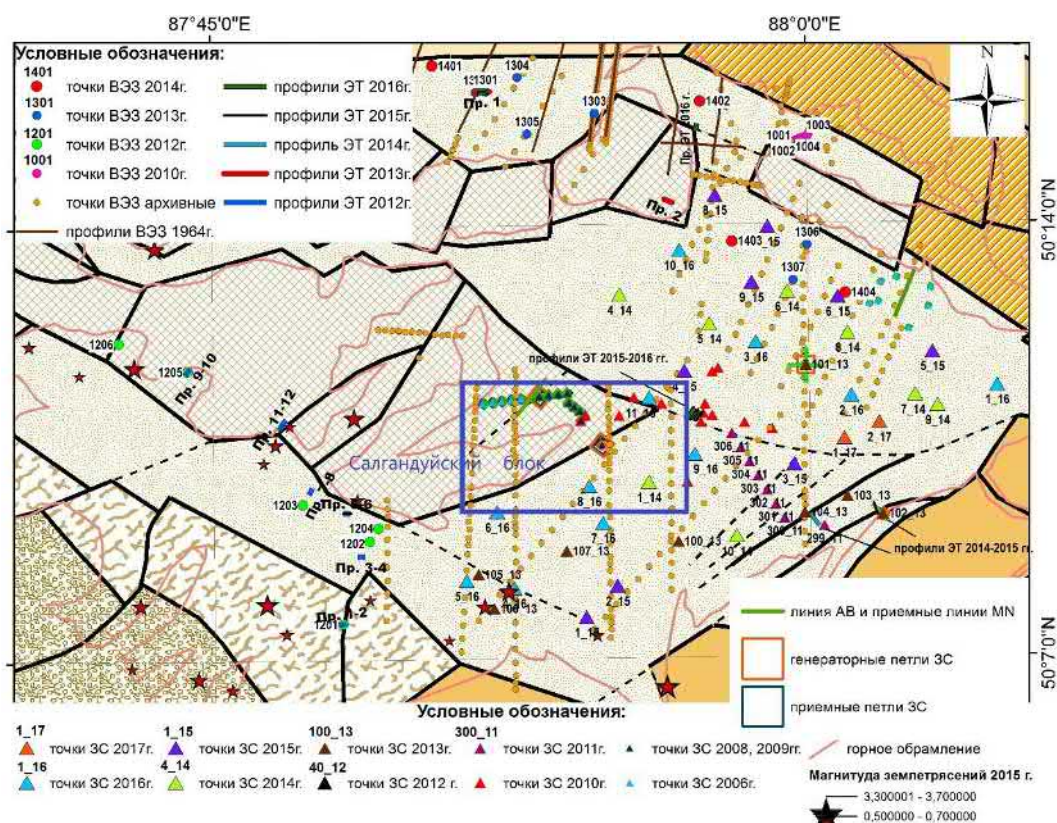


Рис. 1. Блоковая схема Курайской впадины (составлена Е.В. Деевым) с пунктами измерений. Синим прямоугольником отмечена область 3D моделирования

Построение стартовой модели для трёхмерных программ представляет определенные трудности, поэтому был написан небольшой интерфейс для задания входной модели. Вначале по полученным с помощью программ одномерной и двумерной инверсий моделям в каждой точке ВЭЗ строится трёхмерная модель. Далее требуется ввести координаты каждой точки ВЭЗ, мощность и сопротивление каждого слоя. В результате с помощью интерфейса создается общая входная стартовая модель с разбиением, как в работе [2].

Введение разломов в исходную модель также является непростой задачей. Создание модели с разломами было автоматизировано, для чего написана отдельная программа. Во входных данных следует лишь указать номера слоёв на плоскости (в уже построенной модели), номера треугольников, между которыми будет проходить разлом, и угол наклона разлома. Разработанное автоматизированное построение моделей, включающих разломные структуры, существенно упрощает работу с исходными данными и позволяет минимизировать ошибки, неизбежно возникающие при ручном её построении.

Расчёты проведены на кластере ССКЦ СО РАН (НКС-30Т+GPU). Моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе были выполнены расчёты для модели, построенной на основе результатов 1D инверсии ВЭЗ четырех профилей - пр. 2-5, область моделирования показана красным квадратом (рис. 2). Затем на

её основе была создана модель, включающая разломную структуру, при этом область моделирования была уменьшена (синий квадрат на рис. 2) и рассматривались данные ВЭЗ только для профилей 3, 4. Моделировался диагональный разлом, ограничивающий Салгандуйский блок с юго-востока. Сопоставление результатов для двух моделей с разломом и без него приведено в табл.1. Для разломной модели получено меньшее расхождение с полевыми данными. Далее эта модель была использована для выяснения угла наклона сместителя разломной структуры.

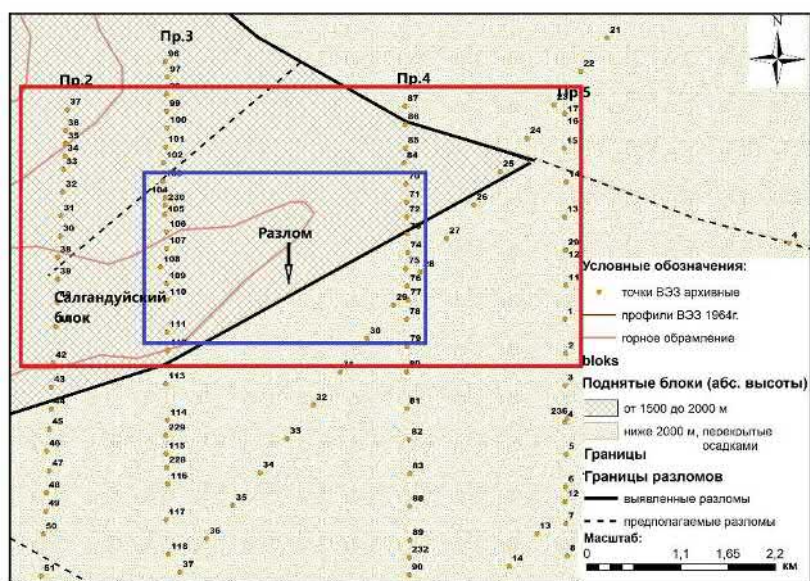


Рис. 2. Участки моделирования. Красным прямоугольником отмечена область моделирования первого этапа.

Синим прямоугольником отмечена область моделирования второго этапа

Таблица 1

Сравнительные данные моделей 1, 2 (первый этап)

ab/2	Rhok	3d мод1	Расх.,%	Разлом	Расх.,%
3	83	79.47	2.17	79.42	2.20
6	107	106.51	0.23	106.21	0.37
9	142	140.51	0.53	139.75	0.80
15	196	187.53	2.21	194.43	0.40
25	258	230.16	5.70	225.3	6.77
40	237	238.06	0.22	233.09	0.83
65	243	206.23	8.19	203.53	8.84
100	201	151.89	13.92	153.64	13.35
150	132	107.26	10.34	115.46	6.68
200	105	95.15	4.92	99.97	2.45
350	118	109.88	3.56	116.13	0.80
500	239	150.49	22.72	157.62	20.52
Среднее расх., %			6.23		5.34

На втором этапе были рассмотрены модели, для которых изменялся угол наклона сместителя разлома для значений $\pm 5^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 35^\circ$. Положительный знак означает наклон сместителя в северо-западном направлении, отрицательный – в юго-восточном. Результаты моделирования представлены в таблицах 2, 3 для ВЭЗ 72, подверженному наибольшему влиянию разлома.

Таблица 2

Сравнительные данные моделей разлома для ВЭЗ 72.
Наклон разлома под Салгандуйский блок (второй этап)

AB/ 2	Rho_k	0°	Расх,%	5°	Расх,%	15°	Расх,%	25°	Расх,%	35°	Расх,%
3	83	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20
6	107	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37
9	142	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80
15	196	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39
25	258	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44
40	237	233.77	0.69	233.89	0.66	233.87	0.66	233.86	0.67	233.86	0.67
65	243	203.97	8.73	204.04	8.72	203.98	8.73	203.94	8.74	203.92	8.74
100	201	153.75	13.32	153.68	13.34	153.45	13.42	153.29	13.47	153.17	13.50
150	132	115.41	6.71	115.01	6.88	114.31	7.18	113.82	7.40	113.48	7.54
220	105	100.74	2.07	100.55	2.16	100.03	2.42	99.53	2.67	98.99	2.95
350	118	119.67	0.70	119.89	0.79	119.64	0.69	119.29	0.54	118.27	0.11
500	239	171.7	16.39	172.11	16.27	172.76	16.09	171.68	16.39	169.87	16.91
Ср.расх,%			4.65		4.67		4.70		4.76		4.80

Таблица 3

Сравнительные данные моделей разлома для ВЭЗ 72.
Наклон разлома на Салгандуйский блок (второй этап)

AB/2	Rho_k	0°	Расх,%	-5°	Расх,%	-15°	Расх,%	-25°	Расх,%	-35°	Расх,%
3	83	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20
6	107	106.21	0.37	106.2	0.38	106.2	0.38	106.2	0.38	106.2	0.38
9	142	139.76	0.80	139.74	0.80	139.75	0.80	139.75	0.80	139.75	0.80
15	196	194.48	0.39	194.45	0.40	194.45	0.40	194.45	0.40	194.46	0.39
25	258	240.83	3.44	240.78	3.45	240.78	3.45	240.8	3.45	240.82	3.44
40	237	233.77	0.69	233.78	0.68	233.8	0.68	233.85	0.67	233.94	0.65
65	243	203.97	8.73	204.01	8.72	204.13	8.69	204.34	8.64	204.75	8.54
100	201	153.75	13.32	153.94	13.26	154.43	13.10	155.25	12.84	156.85	12.34
150	132	115.41	6.71	115.98	6.46	117.46	5.83	119.81	4.84	123.97	3.14
220	105	100.74	2.07	100.89	2.00	101.38	1.75	102.4	1.25	104.81	0.09
350	118	119.67	0.70	119.23	0.52	118.24	0.10	117.44	0.24	118.02	0.01
500	239	171.7	16.39	170.81	16.64	168.63	17.26	167.18	17.68	168.62	17.27
Ср.расх,%			4.65		4.63		4.55		4.45		4.10

Наименьшее расхождение от полевых данных показали расчеты для модели с с углом наклона сместителя в 35° . Эти результаты согласуются с геологической информацией об углах наклона сместителей разрывных нарушений в данном районе (рис. 3).

Выполненное трёхмерное моделирование позволяет более достоверно представить глубинную структуру Салгандуйского блока, положение разломных нарушений его ограничивающих. Это дает возможность уточнить кинематику его формирования на основе интерпретации данных геоэлектрики. Полученные результаты важны для понимания особенностей современной геодинамики Горного Алтая, а также для выделения сейсмогенных разломов.

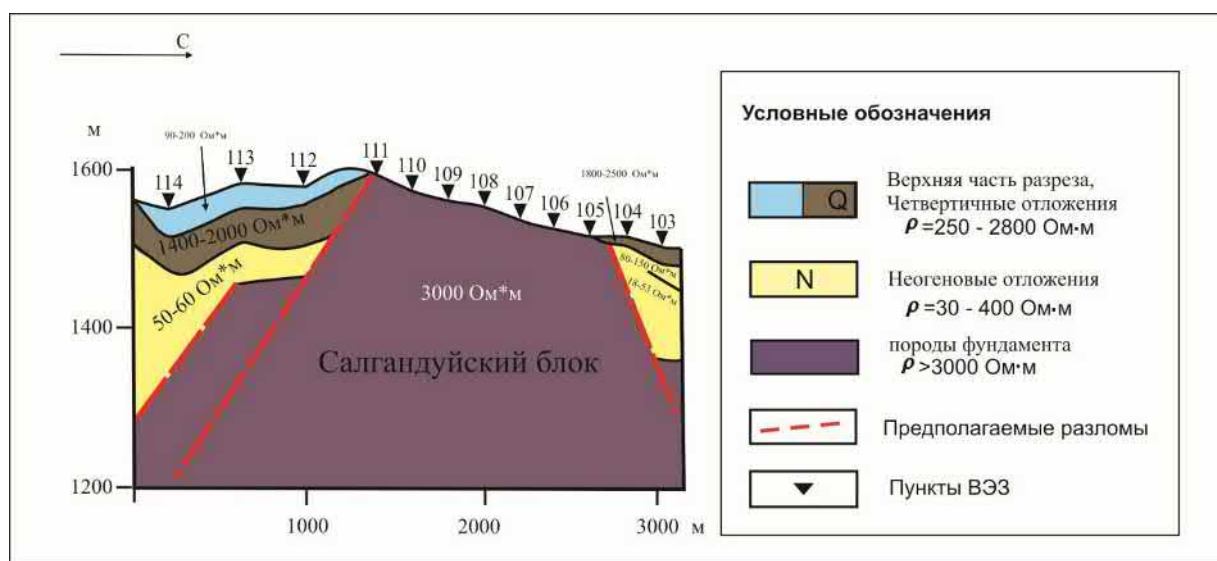


Рис. 3. Модель Салгандуйского блока с учетом результатов трехмерного моделирования

Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИНГГ СО РАН №0331-2019-0015 и ИВМиМГ СО РАН №0251-2021-0004 (расчётная часть).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Строение Курайской впадины Горного Алтая с учетом тектонических особенностей // Геофизика. – 2011. – №6. – с.56-64.
2. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Глубинное строение и характеристики краевых структур Курайской впадины по данным геоэлектрики с контролируемым источником. // Геология и геофизика. – 2014. – т.55. – №1. – с.119-132.
3. Неведрова, Н.Н., Суродина, И.В., Санчаа, А.М. Трёхмерное моделирование сложных геоэлектрических структур // Геофизика. – 2007. - №1. – с.36-41. – ISSN 1681-4568.
4. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Суродина И.В. Характеристики разломных структур по данным электромагнитных зондирований. Моделирование разломов // Геофизические исследования. Том 15. – 2014 г. – С. 83-94. -ISSN 1818-3735.
5. Суродина И.В, Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Параллельные алгоритмы для моделирования прямых трёхмерных задач электротомографии и ВЭЗ на GPU// "Современные проблемы математического моделирования". Сборник трудов всероссийской школы-конференции молодых исследователей, Абрау-Дюрсо. – 2015. – с.221-225

6. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) [Электронный ресурс] http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

REFERENCES

1. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V. Stroenie Kurajskoj vpadiny Gornogo Altaya s uchetom tektonicheskikh osobennostej // Geofizika. – 2011. – №6. – с.56-64.
2. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V. Glubinnoe stroenie i harakteristiki kraevykh struktur Kurajskoj vpadiny po dannym geoelektriki s kontroliruемым istochnikom. // Geologiya i geofizika. – 2014. – т.55. – №1. – с.119-132.
3. Nevedrova, N.N., Surodina, I.V., Sanchaa, A.M. Trekhmernoe modelirovanie slozhnykh geoelektricheskikh struktur // Geofizika. – 2007. - №1. – с.36-41. – ISSN 1681-4568.
4. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Surodina I.V. Harakteristiki razlomnykh struktur po dannym elektromagnitnykh zondirovanij. Modelirovanie razlomov // Geofizicheskie issledovaniya. Tom 15. – 2014 g. – S. 83-94. -ISSN 1818-3735.
5. Surodina I.V, Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Parallel'nye algoritmy dlya modelirovaniya pryamykh tryohmernykh zadach elektrotomografii i VEZ na GPU// "Sovremennye problemy matematicheskogo modelirovaniya". Sbornik trudov vs Rossijskoj shkoly-konferencii molodykh issledovatelej, Abrau-Dyurso. – 2015. – с.221-225
6. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) [Elektronnyj resurs] http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

© А. М. Санчаа, И. В. Суродина, Н. Н. Неведрова, 2021

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЛОВСКОЙ ВПАДИНЫ НАЗЕМНЫМИ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Айдиса Михайловна Санчаа

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, тел. 8(383)330-49-54, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник, тел. 8(383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Сергей Михайлович Бабушкин

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, зам. директора филиала, тел. (383)333-32-28, e-mail: bab@gs.sbras.ru

Илья Олегович Шапаренко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. +7-952-926-25-83, e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

Александр Евгеньевич Шалагинов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. +7-913-788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

В статье представлены первые результаты исследования Горловской впадины в районе угольных месторождений Новосибирской области методами наземной электроразведки с использованием зондирования становлением поля и электротомографии. получены приповерхностные модели до глубин в 100 м, а также и глубинные геоэлектрические характеристики осадочного заполнения впадины, восточного разломного ограничения.

Ключевые слова: Горловская впадина, зондирования становлением поля, электротомография, геоэлектрическое строение, разломы, землетрясения

FIRST RESULTS OF STUDIES IN THE GORLOVSKAYA VALUES BY GROUND METHODS OF ELECTRIC EXPLORATION WITH CONTROLLED SOURCES

Aidisa M. Sanchaa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Leading Scientist, tel.: +7-913-920-17-48, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, D.Sc., Associate Professor, Chief Scientist. tel.: +7-913-890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Sergey M. Babushkin

Seismological branch of Geophysical Survey of the SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, deputy director of Seismological branch. tel.: (383)333-32-28, e-mail: bab@gs.sbras.ru

Ilya O. Shaparenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, researcher, tel. +7-952-926-25-83, e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

Aleksandr E. Shalaginov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, senior researcher, tel.: +7-913-788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

The article presents the first results of the study of the Gorlovskaya depression in the area of coal deposits of the Novosibirsk region by methods of ground electrical prospecting using transient electromagnetic sounding and electrical tomography. Near-surface models were obtained to depths of 100 m, as well as deep geoelectric characteristics of the sedimentary filling of the depression and the eastern fault boundary.

Key words: Gorlovskaya depression, transient electromagnetic sounding, electrotomography, geoelectric structure, faults, earthquakes

Введение

В настоящее время Колывань-Томская складчатая зона и сопряжённые с ней структуры такие как Горловский прогиб относятся к недостаточно изученным районам Алтае-Саянской области. К Горловскому прогибу приурочены крупные угленосные месторождения России. В последнее время повысилась сейсмичность в восточной части Новосибирской области. Эпицентры землетрясений разных магнитуд, включая последние с магнитудами 4 и выше, сосредоточены севернее и восточнее г. Искитим в районах угледобывающих карьеров Горловского бассейна, в зонах пересечения активных разломов. В публикациях сейсмологов современную сейсмическую активизацию предположительно связывают с техногенными землетрясениями, обусловленными разработкой угольных месторождений [1].

В 2020 году сотрудниками ИНГГ СО РАН и СФ ЕГС РАН начаты работы по изучению геоэлектрического строения Горловского прогиба с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами. Для исследований выбран участок в Горловской впадине вблизи п. Харино (Рис. 1). Восточнее этого посёлка по данным ЕГС РАН наблюдается наибольшее число эпицентров землетрясений, происходящих в настоящее время.

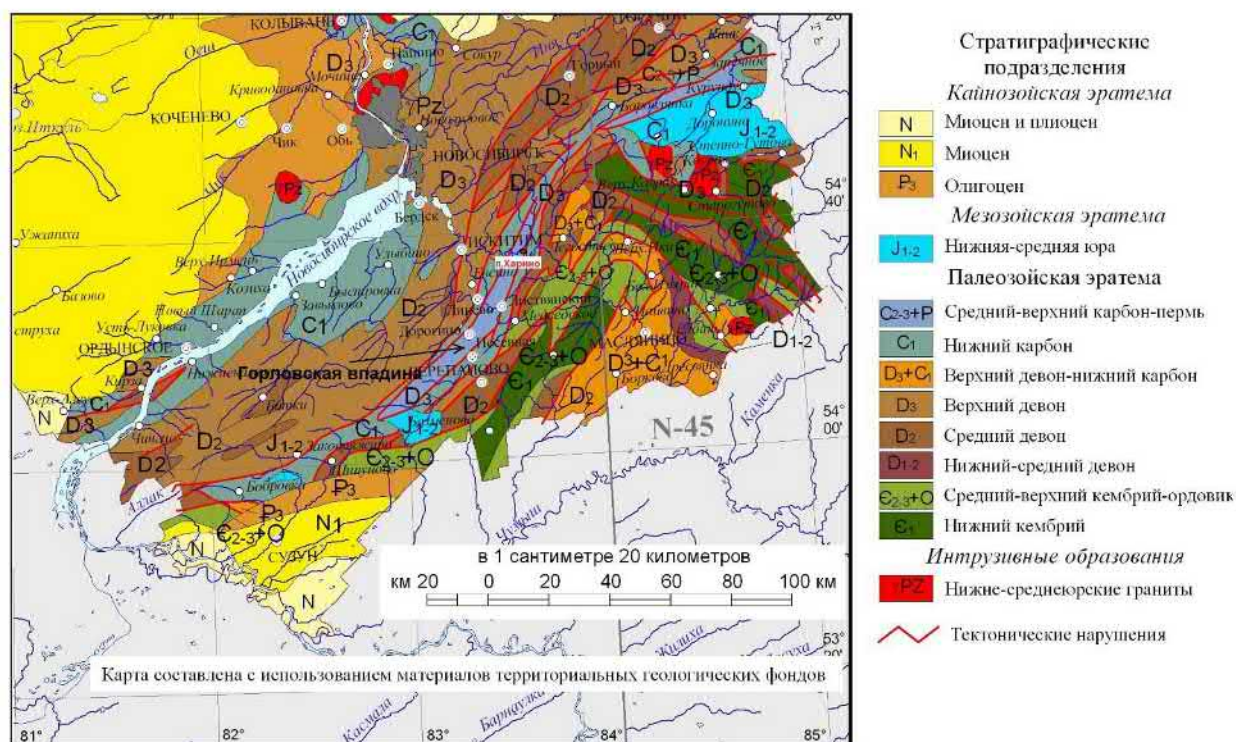


Рис. 1. Профили и пункты наблюдений методами ЗСБ и электротомографии на фрагменте геологической карты

Геологические данные.

Системы измерений электроразведки и полученные результаты

Горловский прогиб расположен между северо-западной окраиной Салаира и Колывань-Томской складчатой зоной, развитие которых оказало огромное влияние на его структуру. Со стороны последней, оформившейся в герцинский период, происходили активные тектонические движения, а Салаирский кряж, как жесткая к этому времени консолидированная глыба, являлся упором. Это, несомненно, сказалось на конфигурации прогиба, вытянутого по простиранию с небольшой шириной. Для него характерна высокая напряженность тектонических деформаций. Сопряжение Горловского прогиба с соседними региональными геологическими структурами происходит по крупным разломам. В геологическом строении района принимают участие отложения верхнего девона, карбона и перми, перекрытые мощной корой выветривания мел-палеогенового возраста, а также рыхлыми отложениями неогенового и четвертичного возраста. Горловский угольный бассейн характеризуется крупнейшими в России запасами антрацита. Максимальная угленосность в Горловском прогибе приурочена к отложениям нижней перми, которые специалистами-геологами сопоставляются с аналогичными породами Кузбасса [2].

В 2020 г. в летний период на выбранном участке были проведены измерения методами наземной электроразведки. В качестве основного метода для восстановления глубинного строения были выбраны зондирования становлением поля (ЗСБ). Кроме того, в целях построения модели верхней части разреза использована электротомография (ЭТ).

Работы методом электротомографии осуществлялись с использованием современной многоэлектродной аппаратуры «СКАЛА 64К15», предназначенной для проведения электроразведочных работ методами сопротивлений и вызванной поляризации (ВП) в различных геологических условиях (рис. 2). В аппаратуре в едином корпусе совмещены 15 измерительных каналов и мощный источник, что позволяет существенно увеличить глубину исследования. Управление производится с помощью смартфона, планшета или компьютера [3]. Измерения по двум профилям в направлении с юго-запада на северо-восток выполнены установкой Шлюмберже с шагом 5 м между электродами. Расстояние между профилями составляет 630 м, длина каждого из них - 315 м. Профили ЭТ расположены южнее измерений ЗСБ, вблизи выходов угленосных отложений. В результате обработки и интерпретации данных ЭТ были построены разрезы по профилям 1 и 2 с помощью программы Res2DInv [4].



Рис. 2. Аппаратура «Скала 64к15»

Наблюдается существенное отличие двух полученных разрезов, что обусловлено несколькими причинами (рис.3).

Следует отметить, что профиль 1 по абсолютной отметке расположен на 30 м выше профиля 2, что связано с небольшой складчатостью на поверхности. Кроме того, по карте рис.1 видно, что профили размещены в разных структурах. Профиль 1 находится в осадках впадины и на практически горизонтально-слоистом разрезе наблюдается верхний почвенный слой мощностью ~ 10 м, в восточной части которого видны высокоомные неоднородности. Глубже выделяется

проводящий слой мощностью 20-30 м, который подстилается горными породами с сопротивлением более 500 Ом·м.

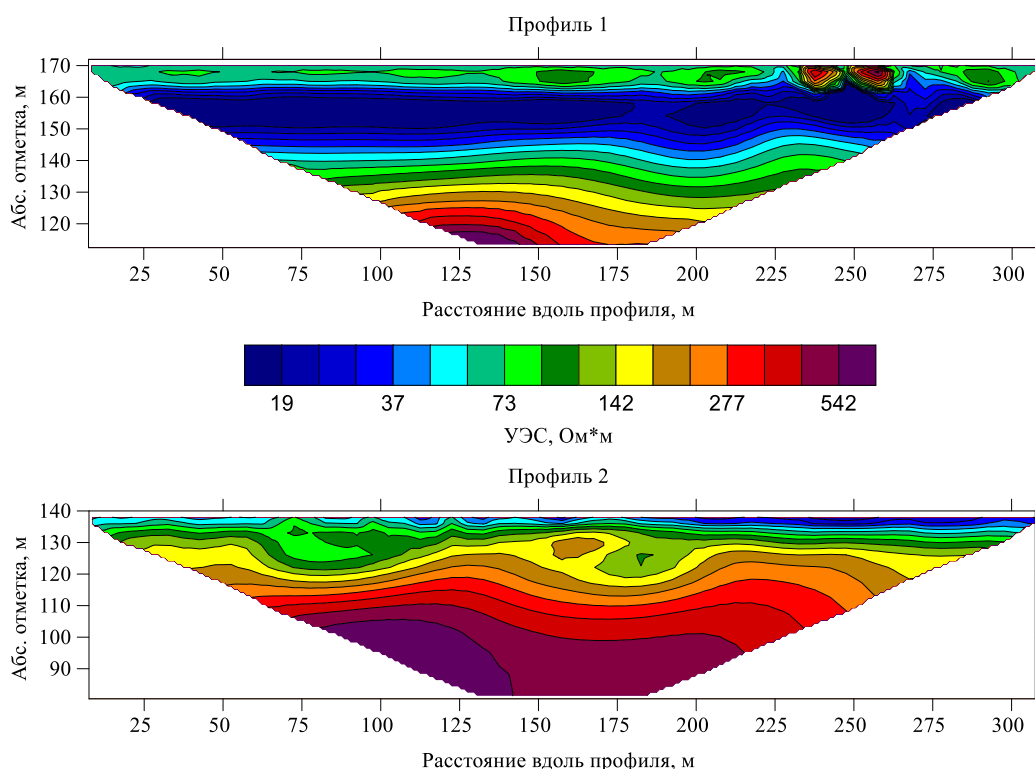
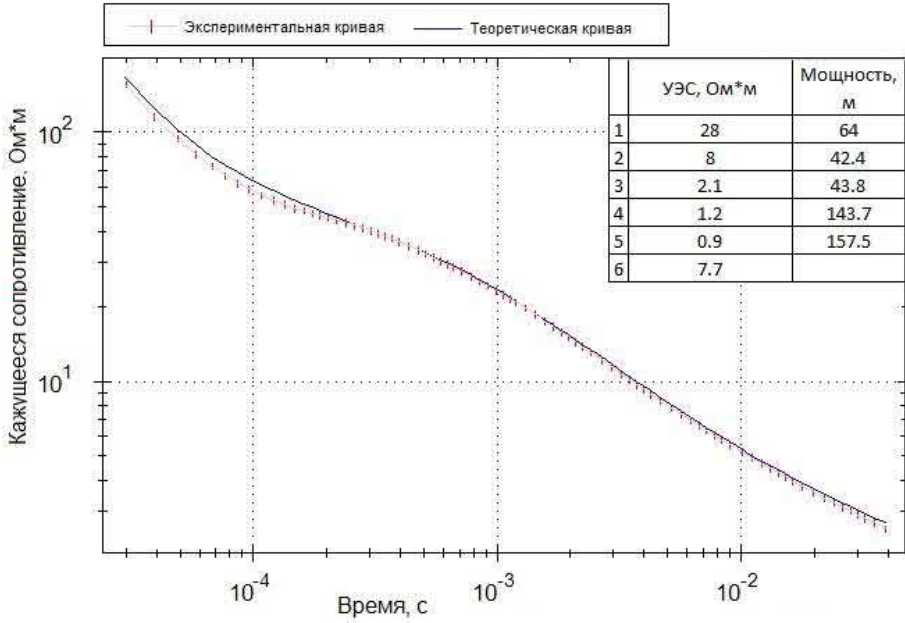


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по профилям 1 и 2

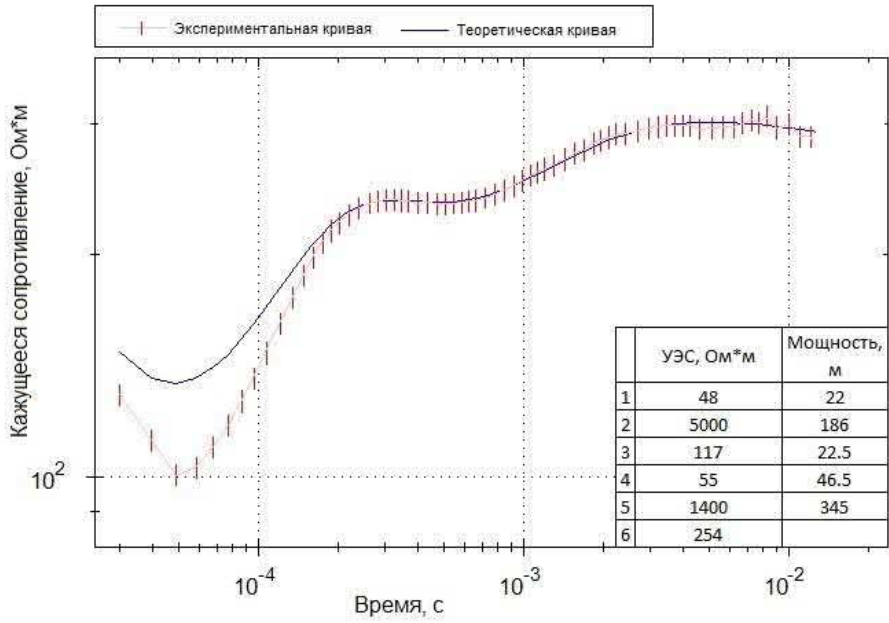
Разрез по профилю 2 включает верхний неоднородный горизонт неустойчивой мощности. В кровле опорного горизонта можно видеть выраженную складчатость. Профиль в северо-восточной части приближается к выходу угольных отложений. Глубинность полученных разрезов превышает 100 м.

Зондирования становлением электромагнитного поля. Работы методом ЗСБ выполнены с использованием цифровой аппаратуры «Цикл-7» соосными установками (Q, q). В качестве генераторной конструкции (Q) использовалась незаземленная петля квадратной формы со стороной равной 200 м. Измерения выполнялись с помощью незаземленной квадратной петли (q) со стороной в 100 м. Синхронизация генератора и приемника осуществляется по каналу GPS-сигнала. Процесс измерения включал запись не менее трех дублей переходного процесса на каждом уровне токов в генераторном контуре. Количество накоплений в каждом дубле составляло не менее 100. Погрешность регистрации переходного процесса в информативной области времен (0,01-500 мс) составила менее 5 %. При проведении опытных работ ток в генераторной петле был выбран на уровнях 3.0-3.5 А для измерения начальной стадии переходного процесса и на уровнях 20.0-22.0 А для поздней стадии переходного процесса. Измерение формы и амплитуды токовых импульсов проводилась цифровым регистратором, погрешность амплитуды токовых импульсов не более 1 %. Минимальная

амплитуда измеряемого сигнала составила 0.2 – 0.5 мкВ, что позволило достигнуть глубинности исследования в несколько сотен метров. Всего было выполнено 7 зондирований по профилю длиной ~ 5 км, по направлению с запада на восток от центральной части впадины к её восточному борту. Обработка и интерпретация данных осуществлялась с помощью программного комплекса моделирования и инверсии EMS [5]. Кривые ρ_t и модели для центральной и прибортовой части впадины принципиально различаются (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Кривые ρ_t и геоэлектрические модели; а - ЗС 6, б – ЗС 3

Данные ЗСБ 6 характеризуют низкоомный разрез до глубин в 400 м. соответствуют горизонтально-слоистой модели с верхним слоем до глубины 70-100 м и УЭС в 28 Ом·м и. Глубже наблюдается пачка слоев с аномально низкими сопротивлениями от 0.9 до 2.1 Ом·м с общей мощностью около 350 м. В восточной части профиля по данным ЗСБ 3 ситуация иная, разрез в целом более высокоомный. На самых ранних временах кривая искажена, для верхнего маломощного слоя получено УЭС в 48 Ом·м, что скорее всего, соответствует современным осадкам, глубже можно видеть чередование слоев с УЭС достигающим 1400 Ом·м. Основные параметры модели получены с погрешностью в 5 %. По результатам инверсии с использованием горизонтально-слоистой модели построен геоэлектрический разрез, отражающий строение впадины до глубин более 600 м (рис. 5). Профиль пересекает Горловскую впадину вкrest её простираия. В западной части в интервале пикетов 5-7 на глубинах 80-100 м прослеживается мощный трёхсотметровый горизонт со значениями УЭС от 0.3 до 2.6 Ом·м, по геологическим данным, скорей всего, соответствующий залежам с присутствием антрацита. В районе пикета 4 УЭС повышаются на 2 порядка и далее на восток по профилю в пикетах 2 и 3 сопротивление палеозойских горных пород начинают превышать 2000 Ом·м. Судя по разрезу, можно предполагать локальную зону разлома. Предположительная разломная зона как бы надвинута на проводящие отложения. Непосредственно зона разлома хорошо выделяется по изолинии УЭС в 100 Ом·м.

Выводы. Размеры генераторно-приёмной установки метода ЗСБ, геоэлектрические характеристики Горловской впадины не позволили достигнуть глубины до опорного горизонта (фундамента), но первые представление о разрезе непосредственно впадины получены. В интервале пикетов 5, 6, 7 ЗСБ оконтурена низкоомная аномалия с понижением сопротивлений до долей Ом·м. Коллектив будет продолжать работы методами электроразведки, в Горловской впадине, скорректировав параметры установки.

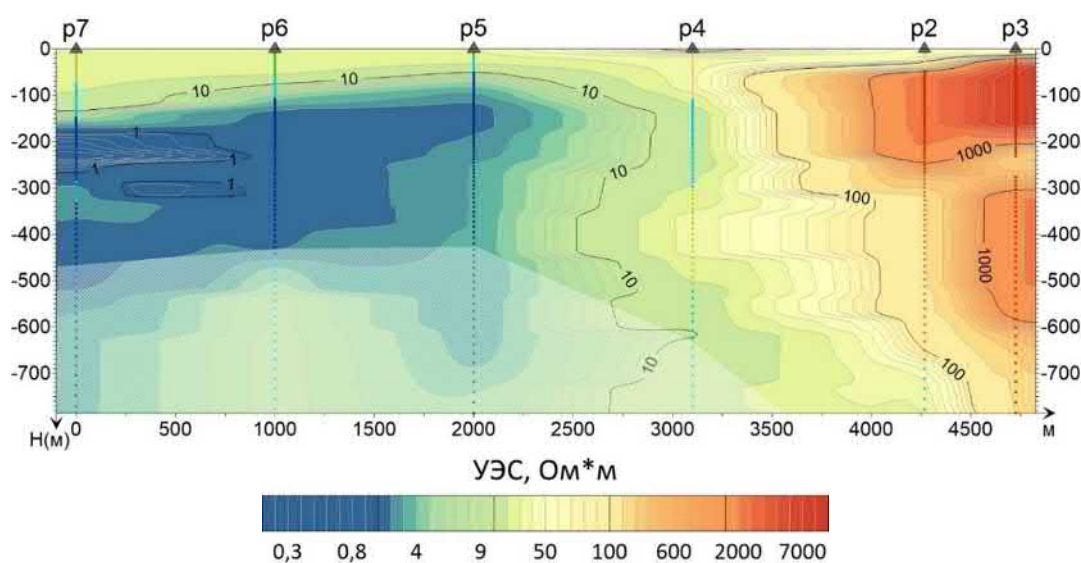


Рис. 5. Разрез по данным ЗСБ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., Podkorytova V.G. Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $ML=4/3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin // Seismic Instruments. – 2020. – V.56. – №3. – pp. 254–268.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 а000000. Серия Алтае-Саянская. Лист N-44-НовосибирскI. Объяснительная записка. Санкт-Петербург. ВСЕГЕИ. – 2015
3. Аппаратура Скала 64к15 [Электронный ресурс]. – <https://nemfis.ru/siber-64k15/>
4. Geotomo Software [Электронный ресурс]. – <http://geotomosoft.com/>
5. Хабинов О. Г., Власов А. А., Антонов Е. Ю. Система интерпретации данных площадных электромагнитных зондирований // ГЕО-Сибирь-2010. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: матер. VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010». Т. 2. ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 164–168.

REFERENCES

1. Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., and Podkorytova V.G. Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $ML=4/3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin // Seismic Instruments. – 2020. – V.56. – №3. – pp. 254–268.
2. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1:1 а000000. Seriya Altae-Sayanskaya. List N-44-NovosibirskI. Ob'yasnitel'naya zapiska. Sankt-Peterburg. VSEGEI. – 2015
3. Apparatura Skala 64k15 [Electronic resource]. – <https://nemfis.ru/siber-64k15/>
4. Geotomo Software [Electronic resource]. – <http://geotomosoft.com/>
5. Habinov O. G., Vlasov A. A., Antonov E. YU. Sistema interpretacii dannyh ploshchadnyh elektromagnitnyh zondirovanij // GEO-Sibir'-2010. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologiya poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh: mater. VI Mezhdunar. nauch. kongr. «GEO-Sibir'-2010». T. 2, ch. 1. – Novosibirsk: SGGA, 2010. – S. 164–168.

© А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, С. М. Бабушкин,
И. О. Шапаренко, А. Е. Шалагинов, 2021

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ РЕЖИМНЫХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Наталья Александровна Галева

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Приведены результаты экспериментов по исследованию характеристик излучения мощных вибраторов и условий приема на ряде сейсмостанций Алтае-Саянского региона в диапазоне удалений 50-450 километров в задаче подбора точек для активного вибросейсмического мониторинга. Показано, что реальный эффективный диапазон вибратора ЦВ-40 может быть существенно увеличен за счет использования кратных и полукратных гармоник. Предложена и опробована методика оценки применимости станций для вибромониторинга с использованием специальных программ оценки сейсмического фона и сейсмических резонансов в пределах размещения сейсмостанций.

Ключевые слова: активный вибросейсмический мониторинг, характеристики излучения вибраторов, сейсмологическая сеть, коррелограммы, кратные и полукратные гармоники, спектры, резонансы

TO STUDY THE POSSIBILITIES OF USING THE SEISMOLOGICAL NETWORK OF THE ALTAI-SAYAN REGION FOR REGIME VIBRO-SEISMIC OBSERVATIONS

Victor M. Solovyev

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Deputy Director, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Aleksandr F. Emanov

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., DSc, Director, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Natalya A. Galyova

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: tatapelya@gmail.com

The results of experiments on the study of the radiation characteristics of powerful vibrators and reception conditions at a number of seismic stations in the Altai-Sayan region in the range of distances of 50-450 kilometers in the problem of selecting points for active vibro-seismic monitoring are presented. It is shown that the real effective range of the CV-40 vibrator can be significantly increased by using multiple and semi-multiple harmonics. A method for assessing the applicability of stations for vibration monitoring using special programs for assessing the seismic background and seismic resonances within the boundaries of the location of seismic stations is proposed and tested.

Keywords: active vibroseismic monitoring, characteristics of vibratory radiation, seismological network, correlograms, multiple and semi-multiple harmonics, spectra, resonances

Введение

Режимные вибросейсмические исследования с мощными вибраторами в Алтае-Саянском регионе начались фактически сразу после установки 100-тонного вибратора на Быстровском полигоне в начале 80-ых годов прошлого столетия [1, 2, 7]. Первые эксперименты по изучению повторяемости волнового поля выполнялись в ближней зоне и на удалении 20 км от центробежного вибромодуля амплитудой силы в 100 тонн (ЦВ-100). С 1996 года по 2004 год со 100-тонным вибратором проводились регулярные наблюдения с интервалом в 7-10 дней на сейсмостанции «Новосибирск» на удалении ~50 км; в последующем, по настоящее время, режимные наблюдения выполняются с 40-тонным вибратором ЦВ-40 [2, 5, 9]. Наряду с отработкой методики и техники режимных наблюдений изучались волновые поля от вибраторов и прохождение монохроматических сигналов по площади на удалениях до пятисот-тысячи километров. С целью расширения апертуры режимных вибросейсмических наблюдений в Алтае-Саянском регионе в последние годы были начаты исследования по выявлению сейсмологических станций с хорошим прохождением сигналов от вибратора [5, 8, 9]. Был проведен анализ прохождения монохроматических сигналов (8 Гц, 8.5 Гц, 9 Гц, 9.5 Гц, 10 Гц и 10.5 Гц) на сейсмостанциях региона на удалении до 1200 км от вибратора ЦВ-40 (полигон Быстровка); установлено, что хорошее накопление монохромов от вибратора ЦВ-40 на нескольких частотах осуществляется на ряде станций до удалений ~450 км [8]. Согласно этим результатам наиболее оптимальными для вибросейсмического мониторинга могут быть сейсмостанции Усть-Кан, Яйлю и Еланда, находящиеся вблизи зон с повышенной сейсмичностью на юге Алтая [8]. На этих, а также других сейсмологических станциях, необходимо продолжать исследования как по регистрации монохроматических записей в широком частотном диапазоне, так и анализу шумов в разные периоды времени. Получение качественной вибрационной коррелограммы с записями опорных Р-и S-волн на больших удалениях отличается от регистрации химического взрыва. На точке регистрации, где полностью отсутствует шум, также затруднительно получить хорошие коррелограммы, как и на точке с максимальным фоном. Обязательным условием является согласование параметров излучаемого вибратором свипа и оптимального частотного диапазона точки приема. Ниже, на

примере нескольких сейсмологических станций Алтае-Саянского региона, показана технология подбора оптимальных точек для вибрационного мониторинга.

Характеристики излучения вибратора ЦВ-40

Знание характеристик излучения вибратора в разных режимах и на разных грунтах чрезвычайно важно для получения качественных коррелограмм. При работе с 40-тонным вибратором в Алтае-Саянском регионе применялись главным образом дебалансы со статическими моментами 46.2кг•м (средние дебалансы) и 56.8кг•м (тяжелые дебалансы), с которыми были получены качественные коррелограммы на профилях и площадной сети [1, 2, 7]. Диапазоны частот зондирования выбирались в соответствии с планируемыми экспериментами и составляли, как правило, 6.25–11.23 Гц, 6.25–9.57 Гц на тяжелых дебалансах и 7.91–11.23 Гц на средних дебалансах. Контроль за излучаемым сигналом осуществлялся с использованием датчиков, установленных на платформе и под вибратором (в ближней зоне) [2, 3, 5, 7]. Время накопления сигналов составляло, в среднем, 40–60 мин. Высокая точность временной синхронизации процессов излучения и приема обеспечивалась с помощью навигационной системы GPS. Наряду с высокой стабильностью и повторяемостью вибрационных воздействий в определенные периоды (лето, зима), в экспериментах была установлена сильная изменчивость волновых полей мощных вибраторов ЦВ-100 и ЦВ-40 в ближней и дальней зонах в переходные периоды (межсезонье) [2, 5, 7]. Установлено, что на характеристики излучения вибратора сильно влияют существующие резонансы в системе вибратор-грунт [6]. Ниже, на рисунке 1 представлены результаты одного из экспериментов по изучению резонансов системы вибратор/грунт для 40-тонного виброисточника на Быстровском полигоне в летний период. В течение 3-х суток осуществлялась регистрация микросейсмиков аппаратурой «Байкал» с трехкомпонентными сейсмоприемниками СК-1П, размещенными на верхней платформе вибратора. При работающем вибраторе регистрация осуществлялась с четырех сторон вблизи от вибратора в скважинах глубиной 1.5–2 м. По результатам обработки экспериментов выделены четкие резонансы на горизонтальных приборах, ориентированных поперек и вдоль длинной стороны вибратора, соответственно узкий резонанс на частотах 7.2–7.3 Гц и широкий резонанс в полосе частот примерно от 7.8 до 10 Гц с провалом в районе 8.6–8.8 Гц; на вертикальных приборах четко фиксируются два резонанса – один узкий, примерно на 7.2–7.3 Гц, и второй широкий – в диапазоне 12–18 Гц (рис. 1).

При включении виброисточника отмечается подкачка энергии именно на этих резонансах и увеличение кратных гармоник. Было также установлено, что в диапазоне частот выше 8 Гц после некоторого подъема амплитуд происходит резкий спад на частотах 8.4–8.6 Гц. По мнению авторов, связано это с отрывом вибратора от грунта, что обусловлено совпадением излучаемого сигнала с выделенным выше резонансом в направлении вдоль длинной стороны вибратора. В момент отрыва на виброграммах и спектрах заметен как спад усиления, так и резкое возрастание полукратных и (главным образом, полуторакратных)

гармоник (рис. 2). Диапазон излучения вибратора: 6.25-11.23 Гц на рис. 2А, Б и 8.49-11.03 Гц на рис. 2В, Г.

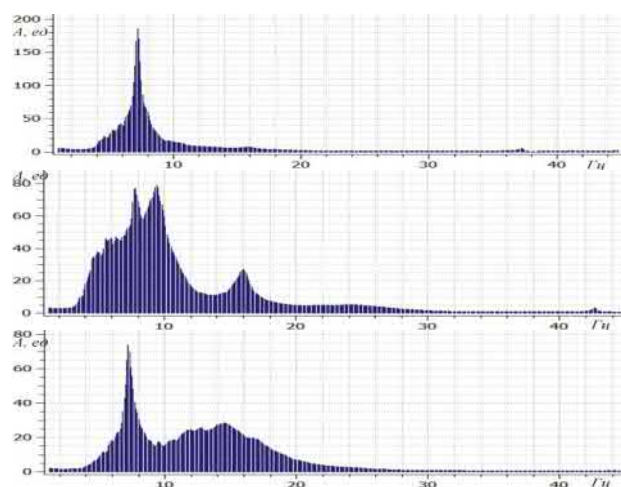


Рис. 1. Примеры спектров (с усреднением) за 12 часов с регистраторов на верхней платформе. А, Б – данные с горизонтальных каналов, направленных поперек и вдоль вибратора соответственно, В – данные с вертикального сейсмоприемника.

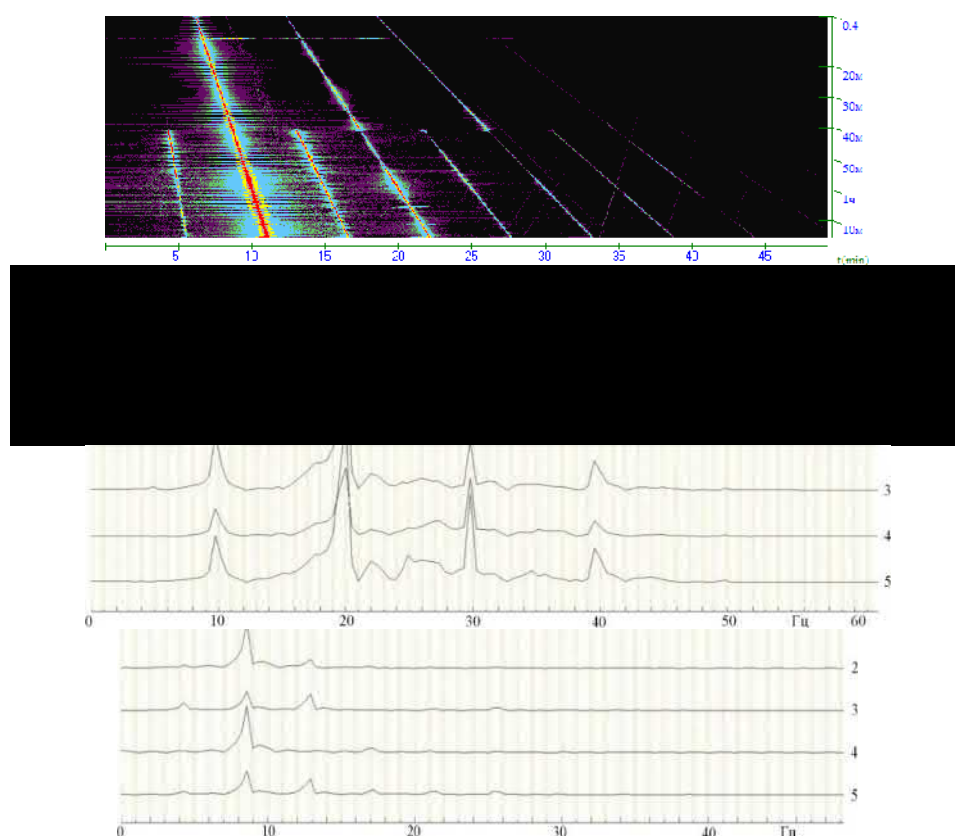


Рис. 2. К изучению характеристик излучения вибратора ЦВ-40. А, Б – примеры текущих и амплитудного спектров в ближней зоне, В, Г - примеры спектров с сильными кратными и и полуторакратными гармониками соответственно для участков с резким подъемом и спадом излучения [4].

В результате эффективный диапазон излучения вибратора увеличивается в несколько раз (рис. 2А). В ряде экспериментов были получены качественные записи от вибратора ЦВ-40 на кратных и полукратных гармониках, что подтверждает сделанные выше выводы [6, 9]. Зимний период (примерно с середины декабря по середину марта) наиболее сложен для вибрационного мониторинга с вибратором на открытом грунте. Зимние сеансы показывают практическое исчезновение резонансов в системе вибратор/грунт и падение амплитуд излучения. При этом эффективный диапазон излучения сужается до 1-1.5 Гц, существенно уменьшаются кратные гармоники и полностью пропадают полукратные.

Условия приема

Условия приема также оказывают существенное влияние на качество сейсмических записей. При подборе точек с оптимальными условиями приема сигналов от вибратора требуется исследовать на них уровень сейсмического фона относительно шумов Земли (как за локальный, так и за длительный период) и провести спектральный анализ длительных записей для выявления полосы частот сигналов с наилучшим прохождением на точке регистрации. Ниже, на нескольких станциях Алтае-Саянского региона (NVS-Новосибирск, SALR – Салаир, UKR - Усть-Кан, ELT - Ельцовка), на которых были получены коррелограммы от вибратора ЦВ-40 исследовались - вероятностное распределение спектральной плотности мощности сигналов (PDF) записей сейсмостанций по методике в работе [10] и усредненные по множеству реализаций спектры, иллюстрирующие анализ шумов на выбранных сейсмостанциях и соответственно возможность получения на них разрешенных коррелограмм. На рис. 3 приведены эти данные с сейсмостанций NVS и CLR, на которых получен наибольший объем мониторинговых исследований; находятся они соответственно в северной и восточной части от вибратора ЦВ-40 на удалениях 50 км и 198 км.

Анализ распределений спектральной плотности мощности сигналов на каналах ЕНЗ этих сейсмостанций показывает в целом даже более лучшие условия сигнал/шум на сейсмостанции Салаир, по сравнению с Новосибирском (рис. 3 А, Б). Однако по усредненным амплитудным спектрам (рис. 3 Б, В) видно, что в отличие от сейсмостанции NVS, где отмечается полочкообразная характеристика спектра в диапазоне 5-15 Гц (включающего диапазон излучения вибратора ЦВ-40 в 6.25-12 Гц) и которую (с некоторой долей условности) можно рассматривать как широкий резонанс в области приема, на усредненных спектрах сейсмостанции CLR отмечается сильный завал характеристики в диапазоне 5-15 Гц и, в особенности, в основном диапазоне работы ЦВ-40 7.91-11.23 Гц. Это можно трактовать, как более худший прием сигналов в диапазоне 8-12 Гц на сейсмостанции Салаир, по сравнению с с/ст Новосибирск. Накопленные за пятилетний период коррелограммы с этих с/станций подтверждают вышесказанное. Возможно, что для мониторинга на с/ст Салаир более эффективным будет диапазон частот излучения вибратора на тяжелых дебалансах 6.25-9.57 Гц и накопление полукратной гармоники.

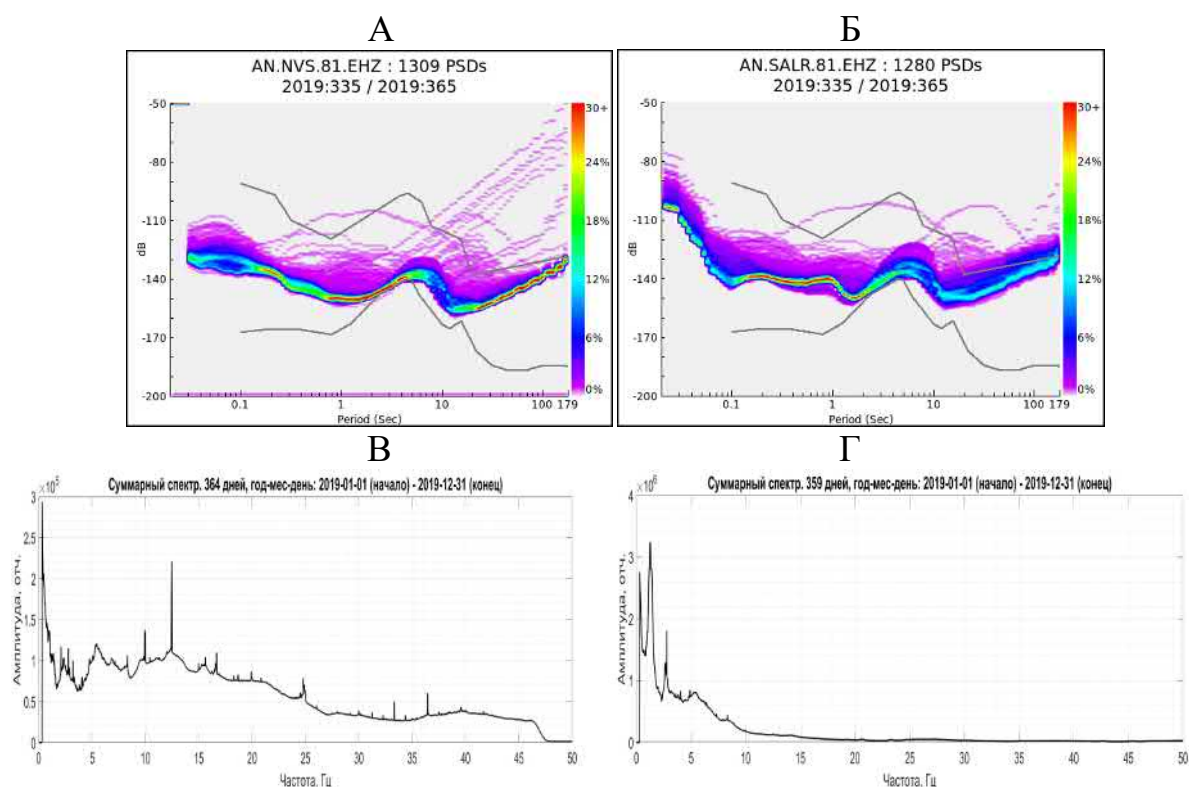


Рис. 3. К изучению влияния условий регистрации на прием вибрационных сигналов на с/ст NVS и CLR. А, Б - вероятностное распределение спектральной плотности мощности сигналов на каналах EHZ с/ст NVS и CLR соответственно (по оси Y - мощность сигналов в Db, цветом дана шкала вероятности, в процентах); В, Г - примеры усредненных амплитудных спектров) для каналов EHZ с/ст NVS и CLR соответственно.

На рис. 4 приведены результаты исследований по сейсмостанциям ELT и UKR, находящимся соответственно в юго-восточном и южном направлении от вибратора ЦВ-40 на удалениях 278 км и 429 км. Распределение спектральной плотности мощности сигналов на канале EHZ на станции UKR хуже, чем на вышеприведенных станциях NVS, CLR и ELT.

Тем не менее, на данной сейсмостанции на большом удалении от вибратора получена приличная коррелограмма с записью преломленной волны от границы Мохоровичича. Обусловлено это, по-видимому, хорошим прохождением сигналов в районе сейсмостанции Уст-Кан в диапазоне излучения вибратора ЦВ-40, что следует из графиков усредненных амплитудных спектров на рисунке 4 В, Г, где в диапазоне 10-20 Гц отмечается полочка с повышенными амплитудами усредненных спектров. На сейсмостанции Ельцовка в целом при хорошем вероятностном распределении спектральной плотности мощности сигналов на каналах за длительный период исследований не удалось накопить хороших единичных коррелограмм.

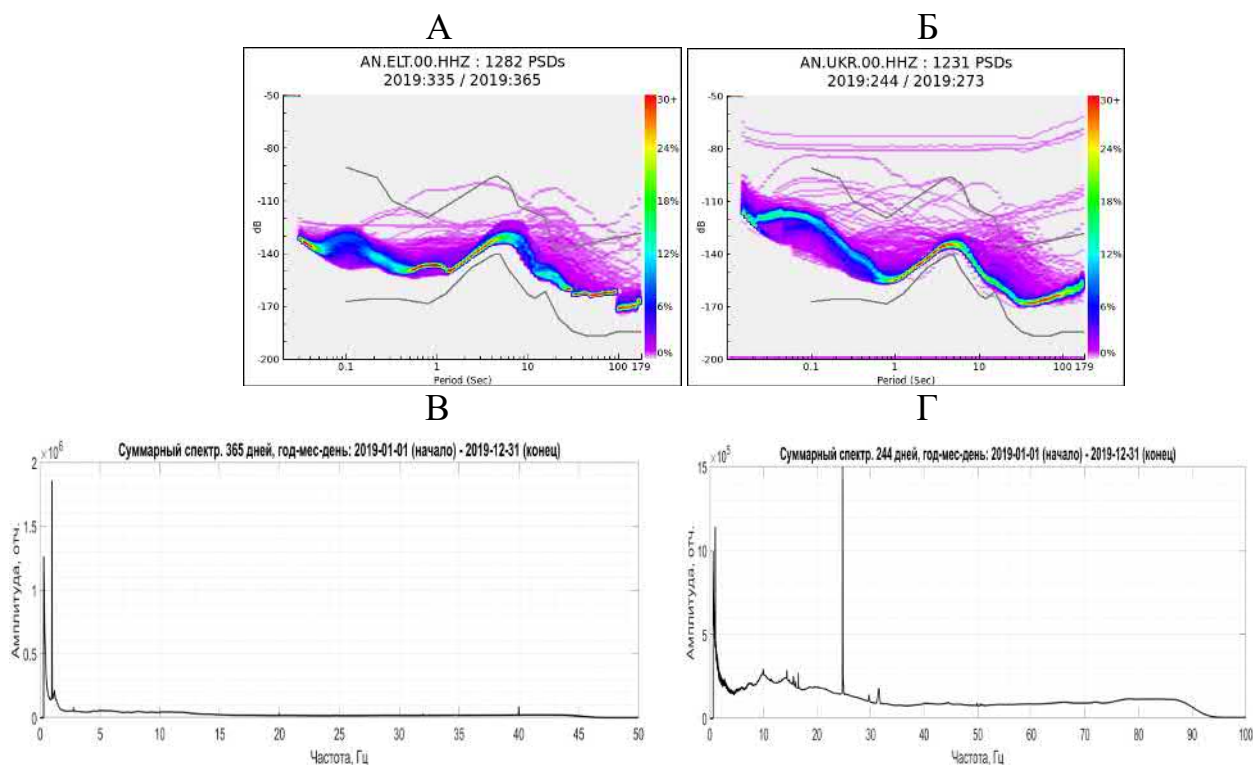


Рис. 4. К изучению влияния условий регистрации на прием вибрационных сигналов на с/ст ELT и UKR. Подписи как на рис. 3

Исследования в данном направлении только начаты. Необходимо исследовать графики вероятностных распределений спектральной плотности мощности сигналов и усредненных амплитудных спектров в разные периоды времени для выбора наиболее благоприятных условий для регистрации. В этом отношении чрезвычайный интерес представляет сейсмостанция Яйлю на озере Телецкое, на которой в 2010 году была получена рекордная (на удалении 455 км), но единственная запись преломленной волны от границы Мохоровичича от вибратора ЦВ-40 [5, 9]. По-видимому, в данный момент были наиболее оптимальные условия для приема вибросигналов. Необходимо изучить в районах сейсмостанций характеристики верхней части разреза для выяснения вопросов накопления резонансов среды, которые могут давать подкачку приходящим от вибратора сигналам и многое другое.

Выводы

Значительный объем экспериментальных исследований с мощными вибраторами в Сибири свидетельствует об отсутствии унифицированных режимов излучения при круглогодичных вибросейсмических просвечиваниях значительных территорий. Сильно меняются излучаемые сигналы в районе виброисточника и значительно неоднородны условия приема – от скальных грунтов на юге Алтая до низкоскоростной мощной осадочной толщи в Кузбассе. Представленная в статье методика оценки приемлемости для мониторинга сейсмостанций основана на

специальной технологии анализа шумов и резонансов в области приема как за длительный, так и за короткий период. Показано, что для получения качественных коррелограмм под конкретную станцию нужно подбирать оптимальный излучающий свип в каждый конкретный временной период. Необходимо продолжение как теоретических исследований в данном направлении, так и полевых экспериментов с разными режимами излучения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер // Вибрационные геотехнологии. Мин-во промышленности, науки и технологий РФ. – Москва. – 2002. – 474 с.
2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 310 с.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Кашун В.Н., Татьков Г.И., Чичинин И.С., Жемчугова И.В., Скоринский Д.В., Яковлев О.Л., Тубанов Ц.А. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры // В сборнике: Проблемы региональной геофизики. Материалы геофизической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения С.В. Крылова. – 2001. – С. 55-58.
4. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики. – 2013. – № 3 (20). – С. 30-41.
5. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Сальников А.С., Юшин В.И., Кашун В.Н., Елагин С.А., Галёва Н.А. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Проблемы информатики. г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – 2018. – N4. – С. 347-354.
6. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмических исследованиях и активном мониторинге среды // Проблемы информатики. – №1. – 2016. – С.58-72.
7. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Жемчугова И.В. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума. Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2005. – С. 64-70.
8. Соловьёв В.М., Еманов А.Ф., Елагин С.А., Галёва Н.А. Развитие сети вибромониторинга в сейсмоактивном Алтае-Саянском регионе // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т.. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 46-55.

9. Soloviev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Yushin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Liseikin A.V. Wave fields from powerful vibrators in active seismology and depth seismic researches. «Active Geophysical Monitoring, Second Edition» edited by Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada. – The Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 389-404.
10. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bull. Seism. Soc. Am. – 2004. – 94, 4. – P. 1517–1527.

REFERENCES

1. Alekseev A.S., Glinskij B.M., Emanov A.F., Kashun V.N., Kovalevskij V.V., Manshtejn A.K., Seleznev V.S., Serdyukov S.V., Solov'ev V.M., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Hajretidinov M.S., CHichinin I.S., YUshin V.I. Novye geotekhnologii i kompleksnye geofizicheskie metody izucheniya vnutrennej struktury i dinamiki geosfer // Vibracionnye geotekhnologii. Min-vo promyshlennosti, nauki i tekhnologii RF. – Moskva. – 2002. – 474 s.
2. Alekseev A.S., Glinskij B.M., Kovalevskij V.V., Hajretidinov M.S., CHichinin I.S., Emanov A.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M. Metody resheniya pryamyh i obratnyh zadach sejsmologii, elektromagnetizma i eksperimental'nye issledovaniya v problemah izucheniya geodinamicheskikh processov v kore i verhnjej mantii Zemli. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. – 2010. – 310 s.
3. Emanov A.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Kashun V.N., Tat'kov G.I., CHichinin I.S., ZHemchugova I.V., Skorinskij D.V., YAKovlev O.L., Tubanov C.A. Eksperimenty po vibrosejsmicheskomu monitoringu zemnoj kory // V sbornike: Problemy regional'noj geofiziki. Materialy geofizicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu so dnya rozhdeniya S.V. Krylova. – 2001. – S. 55-58.
4. Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Emanov A.F., Efimov A.S., Sal'nikov A.S., CHichinin I.S., Kashun V.N., Romanenko I.E., Elagin S.A., Liseikin A.V., SHenmajer A.E., Serezhnikov N.A., Maksimov M.A. Glubinnye vibrosejsmicheskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke Rossii // Problemy informatiki. – 2013. – № 3 (20). – S. 30-41.
5. Seleznev V.S., Emanov A.F., Solov'ev V.M., Sal'nikov A.S., YUshin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Galyova N.A. Aktivnaya sejsmologiya i GSZ s moshchnymi vibratorami v Sibiri // Problemy informatiki. g. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN. – 2018. – N4. – S. 347-354.
6. Solov'ev V.M., Kashun V.N., Romanenko I.E., Elagin S.A., SHenmajer A.E., Serezhnikov N.A. Osobennosti izlucheniya moshchnyh vibratorov na neodnorodnyh gruntah i nekotorye tekhnologicheskie priemy povysheniya effektivnosti izlucheniya pri glubinnym sejsmicheskim issledovaniyam i aktivnom monitoringe sredy // Problemy informatiki. – №1. – 2016. – S.58-72.
7. Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Kashun V.N., ZHemchugova I.V. Aktivnyj vibrosejsmicheskij monitoring v severo-zapadnoj chasti Altae-Sayanskoj skladchatoj oblasti // Aktivnyj geofizicheskij monitoring litosfery Zemli: Materialy 2-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. – 2005. – S. 64-70.
8. Solov'yov V.M., Emanov A.F., Elagin S.A., Galyova N.A. Razvitie seti vibromonitoringa v sejsmoaktivnom Altae-Sayanskom regione // Interekspo GEO-Sibir': XV Mezhdunar. nauch. kongr. (g. Novosibirsk, 24-26 aprelya 2019 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya": Sbornik materialov v 9 t.. – 2019. – T. 2. – № 2. – S. 46-55.
9. Soloviev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Yushin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Liseikin A.V. Wave fields from powerful vibrators in active seismology and depth seismic researches. «Active Geophysical Monitoring, Second Edition» edited by Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada. – The Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 389-404.
10. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bull. Seism. Soc. Am. – 2004. – 94, 4. – P. 1517–1527.

**ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ КОРЫ
СЕЛЕНГИНО-СТАНОВОЙ И АМУРСКОЙ СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ
ПО ДАННЫМ РАЗНОПОЛЯРИЗОВАННЫХ Р- И S- ВОЛН
(В СТВОРЕ ОПОРНОГО ПРОФИЛЯ 8-ДВ)**

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Александр Сергеевич Сальников

АО «Сибирский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом сейсморазведки, тел. (383)230-94-76, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, директор, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, тел. (383)333-20-21, e-mail: sv0428@mail.ru

Татьяна Викторовна Кашубина

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Средний проспект ВО, 74, начальник отдела, тел. (812)328-92-715, e-mail: Tatiana_Kashubina@vsegei.ru

Наталья Александровна Галева

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Представлены результаты глубинных сейсмических исследований по данным Р- и S-волн на Восточно-Становом фрагменте опорного 700-километрового геофизического профиля 8-ДВ. Построены глубинные сейсмические разрезы верхней коры (до глубин 20 км) с распределением скоростей продольных и поперечных волн. Скорости Р- волн в верхней части разреза изменяются от 4-5 км/с в пределах Верхне-Зейской и Амуро-Зейской впадин до 5.5-6.0 км/с в пределах горных хребтов и плоскогорий; на глубинах 10-20 км в створе профиля выделяются линзы высокоскоростных пород до 6.7-7.0 км/с. По S- волнам в верхней части разреза значения скорости составляют в целом 3.0-3.2 км/с; пониженные значения скорости в 2.5-2.6 км/с отмечается на участке Верхне-Зейской впадины. На глубинах 5-20 км в пределах разреза по данным поперечных волн выделяется ряд участков с пониженными и повышенными значениями скорости, соответственно до 3.4-3.5 км/с и 3.75-3.8 км/с. Проведена корреляция выделенных аномалий по данным Р-и S-волн с структурно-тектоническими зонами.

Ключевые слова: профиль ГСЗ, продольные и поперечные волны, скорости Р- и S-волн и их отношения, глубинный сейсмический разрез, земная кора

TO STUDY THE POSSIBILITIES OF USING THE SEISMOLOGICAL NETWORK OF THE ALTAI-SAYAN REGION FOR REGIME VIBRO-SEISMIC OBSERVATIONS

Victor M. Solovyev

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave. PhD, Deputy Director, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Alexander S. Salnikov

AO «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», Russia, 630091, Novosibirsk, Krasnyi Pr., 67, DSc, Head Of Seismic Prospecting Department, tel. (383)230-94-76, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Viktor S. Seleznev

Seismological Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., DSc, director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sv0428@mail.ru

Tatyana V. Kashubina

All-Russian Scientific Research Geological Institute named after A. P. Karpinsky, 199106, Russia, Saint Petersburg, Sredny prospekt VO, 74, head of department, tel. (812)328-92-715, e-mail: Tatiana_Kashubina@vsegei.ru

Natalya A. Galyova

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: tatapelya@gmail.com

The results of deep seismic studies based on P - and S-wave data on the East-Stanov fragment of the reference 700-kilometer geophysical profile 8-DV are presented. Deep seismic sections of the upper crust (up to a depth of 20 km) with the distribution of the velocities of longitudinal and transverse waves are constructed. The P - wave velocities in the upper part of the section vary from 4-5 km / s within the Upper Zeya and Amur-Zeya depressions to 5.5-6.0 km/s within mountain ranges and plateaus; at depths of 10-20 km, lenses of high-velocity rocks up to 6.7-7.0 km/s are distinguished in the profile alignment. According to the S - waves in the upper part of the section, the velocity values are generally 3.0-3.2 km/s; reduced velocity values of 2.5-2.6 km / s are observed in the Upper Zey depression. At depths of 5-20 km within the section, according to the transverse wave data, a number of sections with reduced and increased velocity values are distinguished, respectively, up to 3.4-3.5 km/s and 3.75-3.8 km/s. The correlation of the selected anomalies according to the data of P- and S-waves is carried out.

Keywords: DSS profile, longitudinal and transverse waves, P - and S-wave velocities and their ratios, deep seismic section, earth's crust

Введение

Профиль 8-ДВ, наряду с профилями 2-ДВ, 3-ДВ и 1-СБ, является опорным геолого-геофизическим профилем, выполняемым по заказу Роснедра на территории Востока России. В задачу исследований опорных профилей, включающих работы методами ОГТ, ГСЗ и МТЗ, входит получение детальной фундаментальной геолого-геофизической информации о строении и динамике недр [2]. Представленные ниже исследования направлены на сейсмическое изучение верхней коры по данным разнополяризованных Р-и S-волн Восточно-Станового

фрагмента профиля 8-ДВ в пределах Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей (рис. 1).

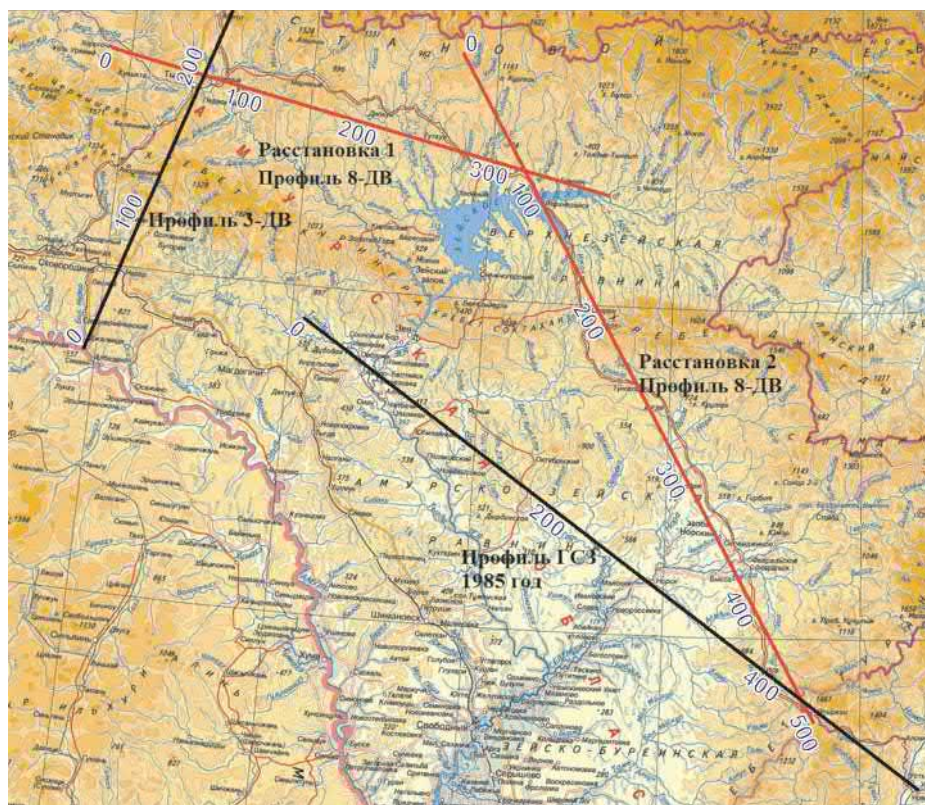
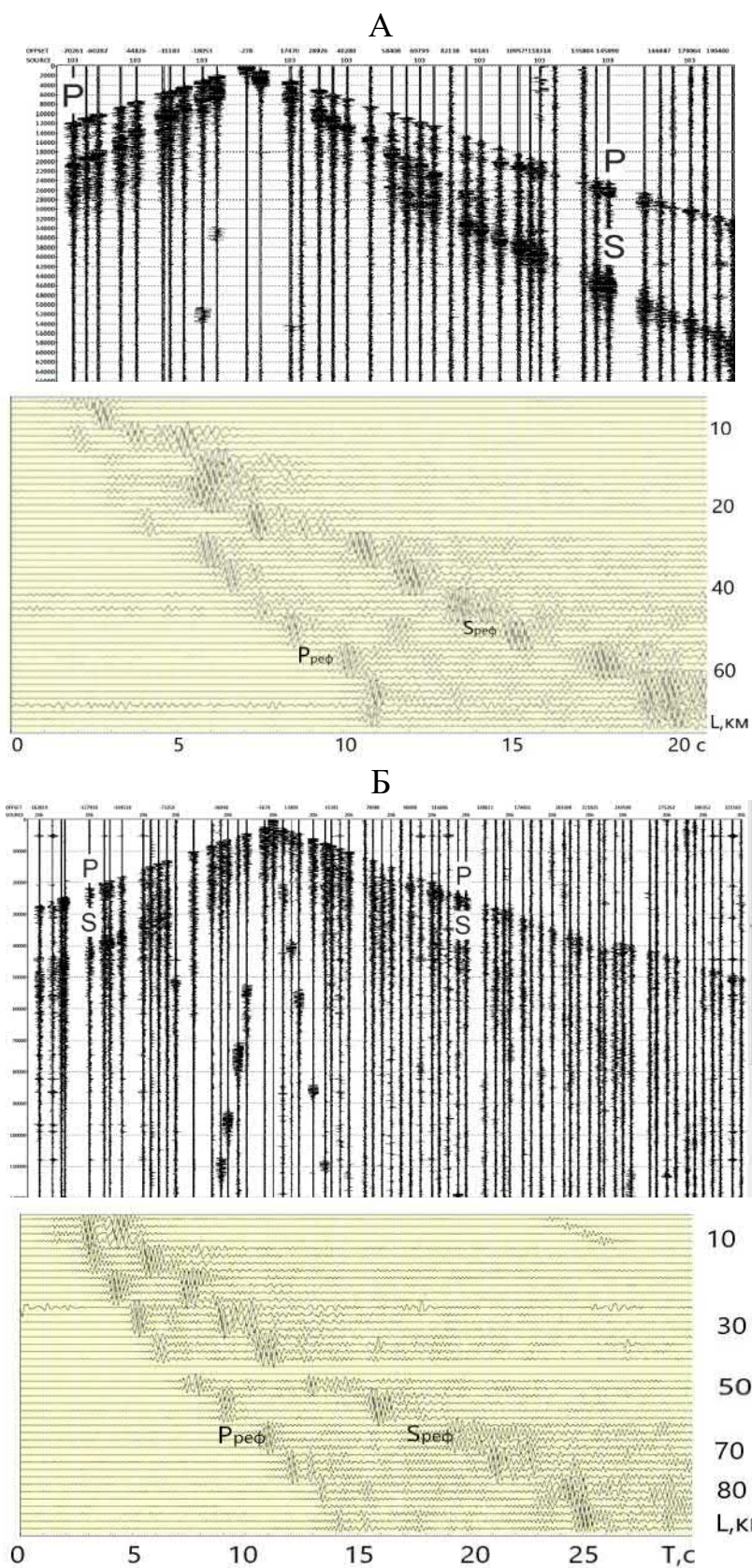


Рис. 1. Схема сейсмических исследований на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ.

Волновое поле Р- и S-волн на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ

Полевые исследования на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ выполнялись по методике точечных зондирований [3, 6] на двух расстановках: Ларба – Бомнак (1) и Верхнезейск – Ульма (2) протяженностью соответственно в 390 и 500 километров (Рис. 1). Расстояния между источниками возбуждения (взрывы в неглубоких водоемах и болотах зарядов весом 3- 5 тонн) на расстановках 1 и 2 составляли 20-40 км, между станциями с вертикальными приборами от 5 до 8 км и между трехкомпонентными сейсмографами (GS-One) – 20 км. Ниже, на рисунке 2, представлены примеры волнового поля рефрагированных Р- и S-волн (на удалениях 0-180 км от источников), освещающих верхнюю кору Восточно-Станового фрагмента. В пределах расстановок 1 и 2 скорости Р-волн в первых вступлениях на удалениях 0–15 км в целом изменяются от 2.7-2.8 км/с до 5.5-5.7 км/с. Наиболее высокими значениями скорости продольных волн на фрагментах профиля 8-ДВ характеризуются участки высокогорных хребтов и плоскогорий. На расстановке 1 это участки $X=20-70$ км, $X=220-320$ км; на расстановке 2 – $X=0-100$ км, $X=200-300$ км и $X=450-500$ км.



1. Рис. 2. Примеры волнового поля Р- и S-волн на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ. А, Б – сводные динамические годографы на расстояниях 1 (с ПВ103 и ПВ102) и 2 (с ПВ206 и ПВ201).

Наиболее низкие значения скорости Р-волн в 2.7-2.8 км/с установлены на расстановке 2 в зоне Верхнезейского водохранилища ($X=120-190$ км); пониженные значения скорости в 4.4-5.0 км/с отмечены также в юго-восточной части расстановки 2 ($X=350-450$ км) (рис. 2). На базах свыше 15 км и до удалений 100-150 км скорость продольных волн по основной массе годографов возрастает незначительно, примерно до 6.0 - 6.2 км/с и редко до 6.3 км/с. На ряде годографов расстановки 2 в центральной части на удалениях в 150-180 км значения кажущейся скорости увеличиваются до 6.4-6.6 км/с. В пределах расстановки 2 с ряда источников возбуждения на участке $X=150-200$ км в пределах всех удалений отмечены изломы годографов, характеризующие низкие скорости волн в первых вступлениях (от 2.7-2.8 км/с на самых малых удалениях до 5.0-5.4 км/с на удалениях до 130-180 км), что обусловлено низкоскоростными неоднородностями в верхней части разреза Верхнезейского водохранилища.

В последующих частях записей поля продольных волн менее уверенно на вертикальных приборах (без частотной фильтрации) выделяется поле поперечных аналогов (верхние годографы на рис. 2А и 2Б); применение низкочастотной фильтрации улучшает выделение поперечных волн (нижние годографы на рис. 2А и 2Б). Наиболее представительный материал получен по данным преломленных (рефрагированных) поперечных волн от границ в земной коре на удалениях 0-100 км (рис. 2). По сравнению с продольными волнами S-волны имеют повышенные в 1.5-2 раза времена регистрации, пониженные видимые частоты и кажущиеся скорости на сейсмограммах. В целом качество записей S-волн на участке 2 (Верхнезейск-Ульма) хуже, по сравнению с сейсмическим материалом на участке 1 (Ларба-Бомнак), что связано с мощной низкоскоростной толщей в районе Верхнезейского водохранилища. Так в центральной части водохранилища отмечается полное отсутствие записей S-волн даже на небольшом удалении (~5-6 км).

Как и для продольных волн, по годографам S-волн отмечается увеличение кажущихся скоростей от 2.5-3.0 км/с на малых удалениях (пониженных, главным образом, в районе Верхнезейского водохранилища) до 3.5-3.7 км/с на удалениях свыше 100 км. На ряде годографов S-волн на больших базах в пределах западной части расстановки 1 и юго-восточной части расстановки 2 отмечено увеличение кажущихся скоростей поперечных волн до 3.8-4.0 км/с.

Интерпретация и результаты

Интерпретация (и обработка) сейсмических данных на двух расстановках Восточно-Станового фрагмента профиля 8-ДВ проводилась традиционными в ГСЗ способами с использованием обрабатывающих комплексов EDSM (АСФ ФИЦ ЕГС РАН, система обработки сейсмических данных от взрывных и вибрационных источников), REFRA (ИНГГ СО РАН, АО «СНИИГГиМС», программа интерпретации волн в первых вступлениях способом сейсмической томографии на временных задержках рефрагированных волн), RadEx Pro Plus Field на персональных компьютерах [3, 6, 7]. Были построены годографы рефрагированных Р-

и S- волн, увязанные во взаимных точках и рассчитаны томографические разрезы земной коры до глубин 15-25 км. По рассчитанным сейсмическим разрезам на расстановках 1 и 2 (рис. 1) были построены сводные глубинные сейсмические разрезы верхней коры по данным Р- и S- волн Восточно-Станового фрагмента профиля 8-ДВ (рис. 3, рис. 4). Скорости Р- волн в верхней части разреза на рисунке 3 изменяются от 4-5 км/с в пределах Верхне-Зейской ($X=340-430$ км) и Амуро-Зейской ($X=560-680$ км) впадин до 5.5-6.0 км/с в пределах Восточно-Становой складчато-блоковой системы ($X=0-350$ км) и горного хребта Джагды ($X=480-520$ км) (рис. 3); мощность осадочных отложений в центральной части Верхне-Зейской впадины достигает 5 км, в Амуро-Зейской до 2.5-3 км (рис. 3). На глубинах 10-20 км в створе профиля выделяются линзы высокоскоростных (в 6.4-7.0 км/с) и низкоскоростных (6.25-6.35 км/с) пород (рис. 3). Наиболее высокие значения скорости в 6.6-6.7 км/с (и даже до 7.0 км/с) отмечаются под Верхне-Зейской, Амуро-Зейской впадинами и в области сочленения Амуро-Охотской складчатой системы и Буреинского массива ($X=480-540$ км) (рис. 3). Пониженные значения скорости Р-волн отмечаются в пределах Восточно-Становой складчато-блоковой системы (участки $X=160-180$ км и $X=230-250$ км), под центральной и юго-восточной частями Верхне-Зейской впадины соответственно на глубинах 15-20 км и 7-15 км (рис. 3).

По данным S- волн в верхней части разреза (рис. 4) значения скорости составляют в целом 3.0-3.2 км/с; пониженные значения скорости в 2.5-2.6 км/с отмечается на участке Верхне-Зейской впадины и в 2.9-3.0 км/с в Амуро-Зейской впадине (рис. 4). На глубинах 5-20 км в пределах разреза по данным поперечных волн выделяется ряд участков с пониженными и повышенными значениями скорости, соответственно до 3.4-3.5 км/с и 3.75-3.8 км/с. Зоны с пониженными значениями скорости выделяются на глубинах 6-12 км в пределах Восточно-Становой складчато-блоковой системы (участки $X=100-120$ км, $X=170-200$ км и $X=340-355$ км) и в северо-западной части Буреинского массива ($X=540-550$ км) (рис. 4). Зоны с повышенными значениями скорости S-волн (до 3.8 км/с) выделяются на глубинах 8-20 км в центральной части Восточно-Становой складчато-блоковой системы ($X=125-175$ км), в северо-западной части Верхне-Зейского водохранилища ($X=375-400$ км) и в центральной части Буреинского массива ($X=580-620$ км) (рис. 4).

Высокие значения скорости поперечных волн (до 3.7-3.75 км/с) отмечаются также на участке $X=200-220$ км в Восточно-Становой складчато-блоковой системе, Амуро-Охотской складчатой системе ($X=480-515$ км) и в юго-восточной части Буреинского массива ($X=625-635$ км).

Результаты выполненных исследований согласуются с результатами глубинных сейсмических исследований прошлых лет на профилях р. Зея-р. Селемджа-р. Бурей (ГСЗ, 1985 год) и 3-ДВ (Южный участок, 2009 год) [1, 4].

Восточно-Становой фрагмент профиля 8-ДВ находится в пределах крупных тектонических структур Центрально-Азиатского складчатого пояса – Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей [1, 2, 5]. Основу их геологического строения составляют традиционно выделяемые условно ранне- и

позднедокембрийские комплексы, а также многочисленные интрузивные и вулканоплутонические ассоциации палеозоя и мезозоя [1, 5]. Выделенные выше сейсмические аномалии Р-и S-волн на глубинах 5-20 км в пределах Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей могут быть глубинными магматическими корнями распространенных на поверхности гранит-гранодиоритовых комплексов. Каркасом зоны мезозойской тектоно-магматической коллизии Алдано-Станового, Амурского и Монголо-Охотского мегаблоков являются зоны региональных разрывных нарушений и, прежде всего главных разломов – Южно-Тукурингского, Северо-Тукурингского и Желтулакского [1, 2, 5]. Наиболее выражены особенности сейсмического строения в верхней коре именно на участке Амуро-Охотской складчатой системы в области сочленения Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей на участке (≈ 460 км и ≈ 520 км на рис. 3) разломов глубинного заложения.

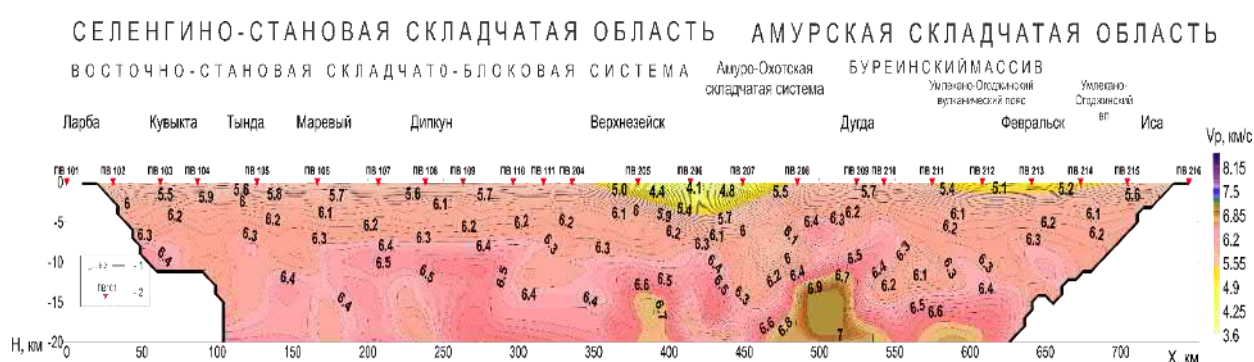


Рис. 3. Глубинный сейсмический разрез верхней коры по данным продольных волн на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ. 1 – изолинии скорости в км/с, 2 – источники возбуждения на первой (ПВ101-ПВ111) и второй (ПВ205-ПВ216) расстановках.

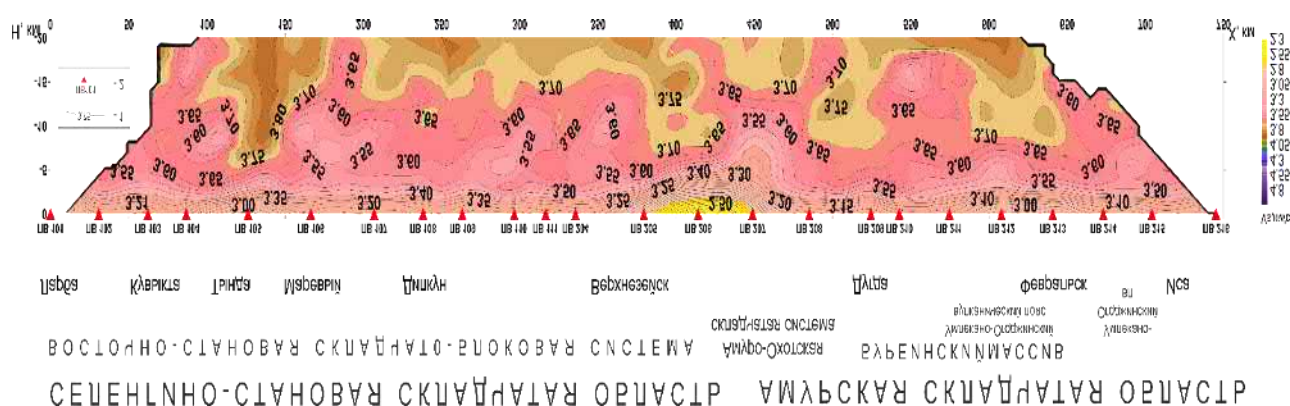


Рис. 4. Глубинный сейсмический разрез верхней коры по данным поперечных волн на Восточно-Становом фрагменте профиля 8-ДВ. Условные обозначения как на рисунке 3.

Выводы

Установлены особенности глубинного строения верхней коры Восточно-Станового фрагмента опорного геофизического профиля 8-ДВ. По данным Р-и S-волн отмечается неоднородное строение самой верхней и средней части земной коры глубиной. Наиболее высокими значениями скорости продольных и поперечных волн (соответственно до 5.7-5.8 км/с и 3.2-3.4 км/с) в верхней части коры на профиле характеризуются участки высокогорных хребтов и плоскогорий; наиболее низкие значения скорости Р-и S-волн (соответственно в 3-5 км/с и 2.3-2.5 км/с) установлены в зоне Верхнезейской и Амуро-Зейской впадин. На глубинах 10-15 км скорости продольных и поперечных волн в целом по профилю возрастают соответственно до 6.20-6.30 км/с и 3.6-3.65 км/с; на ряде участков Восточно-Станового фрагмента профиля 8-ДВ в данном интервале глубин выделяются локальные высокоскоростные неоднородности в 6.4-6.6 км/с (и даже 7.0 км/с) по продольным волнам и 3.75-3.90 км/с по поперечным волнам.

Проведено сопоставление установленных особенностей сейсмического строения на профиле 8-ДВ с тектоникой региона. Значительные сейсмические неоднородности в земной коре и мантии коррелируют с Амуро-Охотской складчатой системой (или восточной ветвью Монголо-Охотского шва) в зоне сочленения крупных тектонических структур Центрально-Азиатского складчатого пояса - Селенгино-Становой и Амурской складчатой областей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диденко А.Н., Ефимов А.С., Нелюбов П.А., Сальников А.С., Старосельцев В.С., Шевченко Б.Ф., Горошко М.В., Гурьянов В.А., Заможная Н.Г. Структура и эволюция земной коры области сочленения Центрально-Азиатского складчатого пояса и Сибирской платформы: профиль Сковородино-Томмот // Геология и Геофизика. – 2013. – Т.54. – № 10. – С. 1583-1599.
2. Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения. – 2018. – №76. – С. 9-21.
3. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф., Тен Е.Н., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S- волнах. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма. – 1993. – 199 с.
4. Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Анненков В.В. Глубинное сейсмическое зондирование на Буреинском массиве // Геология и геофизика. – 1987. – №10. – с. 98-107.
5. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. – 2003. – т. 22. – №6. – С. 7—41.
6. Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Мишенькин Б.П. Методика рекогносцировочных глубинных сейсмических исследований. – Новосибирск: Наука. – 1975. – 158 с.

7. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Кашубина Т.В., Шенмайер А.Е. Использование эффективных сейсмических моделей сред при работах ГСЗ на опорных профилях в Восточной части России // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. – 2014. – №4. – С. 74-86.

REFERENCES

1. Didenko A.N., Efimov A.S., Nelyubov P.A., Sal'nikov A.S., Starosel'cev V.S., Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Gur'yanov V.A., Zamozhnyaya N.G. Struktura i evolyuciya zemnoj kory oblasti sochleneniya Central'no-Aziatskogo skladchatogo poyasa i Sibirskoj platformy: profil' Skovorodino-Tommot // Geologiya i Geofizika. – 2013. – T.54. – № 10. – S. 1583-1599.
2. Kashubin S.N., Petrov O.V., Mil'shtejn E.D., Kudryavcev I.V., Androsov E.A., Vinokurov I.YU., Tarasova O.A., Erinchek YU.M. Glubinnoe stroenie zemnoj kory i verhnjej mantii Severo-Vostochnoj Evrazii // Regional'naya geologiya i metallogeniya. – 2018. – №76. – S. 9-21.
3. Krylov S.V., Mishen'kin B.P., Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Sergeev V.N., SHelud'ko I.F., Ten E.N., Kul'chinskij YU.V., Mandel'baum M.M., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Suvorov V.D. Detal'nye sejsmicheskie issledovaniya litosfery na R- i S- volnah. – Novosibirsk: Nauka, Sibirskaya izdatel'skaya firma. – 1993. – 199 s.
4. Mishen'kin B.P., Mishen'kina Z.R., Annenkov V.V. Glubinnoe sejsmicheskoe zondirovanie na Bureinskom massive // Geologiya i geofizika. – 1987. – №10. – S. 98-107.
5. Parfenov L.M., Berzin N.A., Hanchuk A.I. i dr. Model' formirovaniya orogennyh poyasov Central'noj i Severo-Vostochnoj Azii // Tihookeanskaya geologiya. – 2003. – t. 22. – №6. – S. 7—41.
6. Puzyrev N.N., Krylov S.V., Mishen'kin B.P. Metodika rekognoscirovochnyh glubinnyh sejsmicheskikh issledovanij. – Novosibirsk: Nauka. – 1975. – 158 s.
7. Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Sal'nikov A.S., Kashubina T.V., SHenmajer A.E. Ispol'zovanie effektivnyh sejsmicheskikh modelej sred pri rabotah GSZ na opornyh profilyah v Vostochnoj chasti Rossii // Geologiya, geofizika i mineral'noe syr'e Sibiri. – 2014. – №4. – S. 74-86.

© В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев, Т. В. Кашубина, Н. А. Галёва, 2021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРИСТЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПОРОДЫ

Сергей Александрович Соловьев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: solovevsa@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, доктор физ.-мат. наук, зав.лаб., e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

В данной статье представлен численный алгоритм моделирования низкочастотной нагрузки пороупругих материалов, заполненных жидкостью, и оценки эффективных частотно-зависимых соотношений деформаций и напряжений для таких сред. Алгоритм решает уравнение Био в квазистатическом состоянии в частотном пространстве. В результате для каждой временной частоты приходится решать систему линейных алгебраических уравнений. Мы используем прямой решатель, основанный на разложении LU , чтобы разрешить SLAE. Предложенный алгоритм позволяет проводить оценку тензора жесткости в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: уравнение Био, пороупругость, конечные разности

NUMERICAL WAVE FIELDS QUASISTATIC MODELING IN FLUID-FILLED POROELASTIC MEDIA

Sergey A. Solovyev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD, Senior Researcher, e-mail: solovevsa@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., DSc, Head of laboratory, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

This paper presents a numerical algorithm to simulate low-frequency loading of fluid-filled poroelastic materials and estimate the effective frequency-dependent strain-stress relations for such media. The algorithm solves Biot equation in quasi-static state in the frequency space. As a result a system of linear algebraic equations have to be solved for each temporal frequency. We use the direct solver, based on the LU decomposition to resolve the SLAE. According to the presented numerical examples the suggested algorithm allows reconstructing the stiffness tensor within a wide Frequency range.

Keywords: Biot equation, poroelasticity, finite differences

Интенсивное развитие технологий захоронения CO_2 [13], [7], разработки геотермальной энергии [19], [11] ставит перед методами сейсмического мониторинга сложные задачи - оценку мобильности флюидов и транспортных характеристик

коллектора. Скорости сейсмических волн на низких частотах практически нечувствительны к изменениям в структуре коллектора, вызванных замещением флюидом, частичного химического растворения карбонатной матрицы породы и прочее. Однако частотно-зависимые эффекты могут быть зарегистрированы и потенциально интерпретированы. В частности, изменения в составе флюида или геометрии порового пространства значительно влияют на потоки флюида, индуцированные волнами (WIFF). Эти потоки возникают из-за локальных градиентов давления при распространении сейсмических волн в трещиновато-пористых средах [15], [17]. Обычно рассматриваются WIFF из трещин во вмещающую среду (FB-WIFF) и перетоки между трещинами (FF-WIFF). FB-WIFF появляются, если распространяется низкочастотная волна. В этом случае период волны достаточно велик для образования потока даже в средах с довольно низкой проницаемостью. Интенсивность FB-WIFF определяется контрастом сжимаемости между вмещающей породой и материалом, заполняющим трещины [9], [17]. Распространение высокочастотных сигналов вызывает FF-WIFF, определяемую свойствами материала, заполняющего трещины, а также локальной связностью трещин [17], [9], [6]. К сожалению, теоретические исследования этого эффекта включают рассмотрение относительно простых моделей среды. Причем связность трещин учитывается только для пар разнонаправленных трещин [9]. Численное исследование явления также ограничено такими критериями связности трещин [17], [9], за исключением исследования [8], в котором авторы применяют статистическое моделирование сети трещин и оценивают полученную связность трещин. Одной из причин этого является отсутствие эффективного численного алгоритма для моделирования распространения сейсмических волн в пороупругих средах или для решения уравнения Био в квазистатическом состоянии.

Постановка задачи

Уравнение Био в квазистатической постановке.

Рассмотрим квазистатические уравнения Био, описывающие процессы диффузии в пороупругих средах, заполненных жидкостью, в низкочастотных режимах [2], [1]. Мы имеем дело с декартовыми координатами и ограничиваемся рассмотрением двухмерного случая, поэтому уравнения можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda_u + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda_u \frac{\partial u_z}{\partial z} + \alpha M \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] = 0, \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_u \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda_u + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \alpha M \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right] = 0, \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha M \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + M \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right] = i\omega \frac{\eta}{\kappa} w_x, \\
 & \frac{\partial}{\partial z} \left[\alpha M \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + M \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right] = i\omega \frac{\eta}{\kappa} w_z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\vec{u} = (u_x, u_z)^T$ – вектор смещений точек матрицы, $\vec{w} = (w_x, w_z)^T$ – вектор относительных смещений жидкости относительно матрицы, λ_u – коэффициент Ламе неосушенной породы, μ – модуль сдвига, α – параметр Био-Уиллиса, η – динамическая вязкость жидкости, κ – абсолютная проницаемость породы, ω – временная частота. Значения параметров λ_u , μ , M и α обычно оцениваются по объемным модулям осушенной породы K_d , флюида K_f и твердой матрицы K_s [12]:

$$\alpha = 1 - \frac{K_d}{K_s}, \quad \lambda_u = K_u - \frac{2}{3}\mu, \quad M = BK_u / \alpha,$$

$$B = \frac{1/K_d - 1/K_s}{1/K_d - 1/K_s + \phi(1/K_f - 1/K_s)}, \quad K_u = \frac{K_d}{1 - B\alpha}.$$

Эффективная вязкоупругая среда

Для построения эффективных макроскопических частотно-зависимых упругих моделей необходимо потребовать, чтобы для любых напряжений, приложенных к единице объема, средние деформации в эффективной вязкоупругой и исходной пороупругих моделях совпадали. Квазистатическое приближение вязкоупругой среды имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[C_{55}(\omega) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[C_{55}(\omega) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{v} = (v_x, v_z)^T$ – вектор смещения, а тензор C – частотно-зависимый тензор жесткости. Уравнение определено в прямоугольной области $D = [L_x^1, L_x^2] \times [L_z^1, L_z^2]$. В качестве граничных условий используются условия вида $\sigma \cdot \vec{n} = \sigma_0$ на границе ∂D . В этих обозначениях $\vec{n}$ – внешняя нормаль, а σ – тензор напряжений.

Рассмотрим три базовых нагрузки:

1) Сжатие по направлению X:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^1} &= \phi_x, \quad \sigma_{xx} = C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^2} = \phi_x, \\ 1. \quad \sigma_{zz} = C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^1} &= 0, \quad \sigma_{zz} = C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^2} = 0, \\ \sigma_{xz} = C_{55}(\omega) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \Big|_{\partial D} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

Решение задачи (2),(3) может быть построено аналитически, в случае постоянных коэффициентов: $\sigma_{xx}(x, z) = \phi_x$, $\sigma_{zz}(x, z) = 0$, $\sigma_{xz}(x, z) = 0$. Таким образом, компоненты тензора деформаций можно представить в виде

$$\varepsilon_{xx} = S_{11}\phi_x, \quad \varepsilon_{zz} = S_{13}\phi_x, \quad \varepsilon_{xz} = S_{15}\phi_x, \quad (4)$$

где S_{ij} – компоненты тензора податливости (обратные к тензору жесткости). Если начальные нагрузки известны и деформации вычислены, можно решить уравнения относительно компонентов тензора податливости.

2) Сжатие по направлению Z:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^1} = 0, & \sigma_{xx} &= C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^2} = 0, \\ \sigma_{zz} &= C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^1} = \phi_z, & \sigma_{zz} &= C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^2} = \phi_z, \\ \sigma_{xz} &= C_{55}(\omega) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \Big|_{\partial D} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

Решая задачу (2), (5) получаем:

$$\varepsilon_{xx} = S_{13}\phi_z, \quad \varepsilon_{zz} = S_{33}\phi_z, \quad \varepsilon_{xz} = S_{35}\phi_z, \quad (6)$$

Таким образом, можно восстановить второй столбец тензора податливости.

3) Касательные напряжения:

4)

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^1} = 0, & \sigma_{xx} &= C_{11}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{x=L_x^2} = 0, \\ 2. \quad \sigma_{zz} &= C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^1} = 0, & \sigma_{zz} &= C_{13}(\omega) \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33}(\omega) \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{z=L_z^2} = 0, \\ \sigma_{xz} &= C_{55}(\omega) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \Big|_{\partial D} = \psi, \end{aligned} \quad (7)$$

3.

Решая задачу (2), (7), получаем:

$$\varepsilon_{xx} = S_{15}\psi, \quad \varepsilon_{zz} = S_{35}\psi, \quad \varepsilon_{xz} = S_{55}\psi, \quad (8)$$

Таким образом, можно восстановить третий столбец тензора податливости.

Чтобы построить эффективную модель анизотропной вязкоупругой среды, необходимо решить три краевые задачи для системы (1) с граничными условиями (3), (5), и (7) соответственно. По решению каждой задачи нужно построить компоненты тензора деформаций, после чего решить системы уравнений (4), (6) и (8) относительно компонент тензора податливости. Однако, чтобы получить

уникальное решение системы (1), нам нужно добавить дополнительные граничные условия отсутствия потока на всех границах:

$$\vec{w} \cdot \vec{n} |_{\partial D} = 0$$

Для упрощения интерпретации результатов удобно рассматривать скорость и затухание сейсмических волн в эффективных вязкоупругих средах [4], [21], [23], а не компоненты тензора жесткости. Для этого необходимо разрешить дисперсионное соотношение для вязкоупругого волнового уравнения. Однако полученная модель является анизотропной, где скорость и затухание зависят от направления распространения. Поэтому мы ограничимся рассмотрением частных случаев, то есть скорость и затухание квазипродольной или qP-волны, распространяющейся в направлениях x и z , и квазипоперечной или qS-волны, распространяющейся в направлении x . В двумерных ортотропных средах скорости qS-волны в направлениях x и z совпадают. Для оценки скоростей и факторов качества воспользуемся формулами [3], [21]:

$$\begin{aligned} V_{px} &= \Re \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}, & V_{pz} &= \Re \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, & V_s &= \Re \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}}, \\ Q_{px} &= \frac{\Re C_{11}}{\Im C_{11}}, & Q_{pz} &= \frac{\Re C_{33}}{\Im C_{33}}, & Q_s &= \frac{\Re C_{55}}{\Im C_{55}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Наиболее трудоемкой частью предлагаемого подхода к осреднению является численное решение уравнения (1), которое описано ниже.

Конечно-разностная аппроксимация

Для аппроксимации уравнения (1) внутри области $D = [L_x^1, L_x^2] \times [L_z^1, L_z^2]$ мы предлагаем использовать равномерную прямоугольную сетку с шагами h_x и h_z . Предположим, что границы области имеют полуцелые координаты; кроме того, $L_x^1 = x_{1/2}$, $L_x^2 = x_{N_x-1/2}$, $L_z^1 = z_{1/2}$, $L_z^2 = z_{N_z-1/2}$, где N_x и N_z – номера узлов сетки в соответствующем пространственном направлении. Схема расчетной области и сетки представлена на рис. 1.

Мы определяем сеточные функции на сдвинутых сетках по правилу: $(u_x)_{i,j+1/2} = u_x(x_i, z_{j+1/2})$, $(w_x)_{i,j+1/2} = w_x(x_i, z_{j+1/2})$, $(u_z)_{i+1/2,j} = u_z(x_{i+1/2}, z_j)$, $(w_z)_{i+1/2,j} = w_z(x_{i+1/2}, z_j)$. Таким образом, первое и третье уравнения из (1) аппроксимируются в точках $(x_i, z_{j+1/2})$, а второе и четвертое – в точках $(x_{i+1/2}, z_j)$. Все коэффициенты хранятся в полуцелых точках, предполагая, что они постоянны в ячейке сетки. Чтобы сохранить второй порядок сходимости, необходимо вычислить модуль сдвига в целочисленных точках по правилу [22], [14], [10], [20]:

$$\frac{1}{\mu_{i,j}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu_{i+1/2,j+1/2}} + \frac{1}{\mu_{i-1/2,j+1/2}} + \frac{1}{\mu_{i+1/2,j-1/2}} + \frac{1}{\mu_{i-1/2,j-1/2}} \right)$$

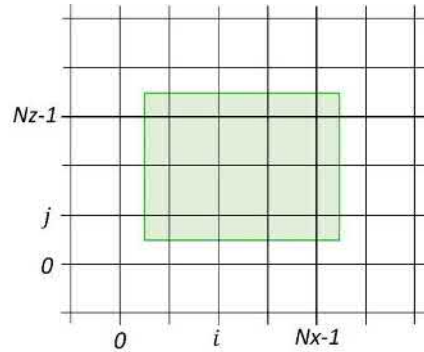


Рис.1 Эскиз расчетной области и сетки.

Ячейка сетки и положения компонентов решения показаны на рис. 2.

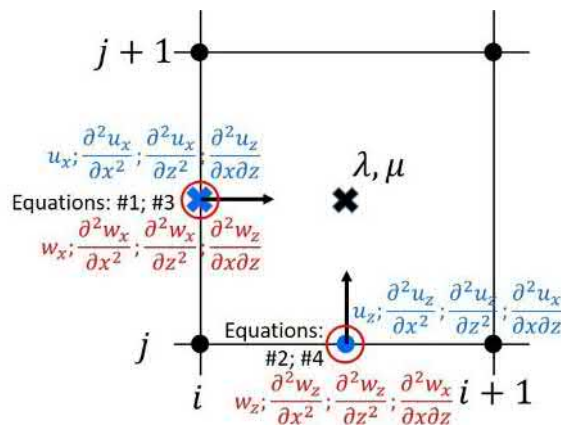


Рис.2 Ячейка сетки и положение компонент решения.

Для аппроксимации уравнения (1) используются конечно-разностная схема второго порядка, так что пространственные производные аппроксимируются следующими операторами:

$$D_x[f]_{I,J} = \frac{f_{I+1/2,J} - f_{I-1/2,J}}{h_x} = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_I, z_J} + O(h_x^2) \quad (10)$$

где f - любая достаточно гладкая функция, а индексы I и J могут быть целыми или полуцелыми.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (1) определяет систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) $A_0 x = b$ размером $N = 2(N_x - 1)N_z + 2(N_z - 1)N_x$, свойства которых являются предметом исследования.

Решение СЛАУ

Свойства построенной системы линейных уравнений следует исследовать для двух разных случаев. Первый – ненулевая частота, второй – $\omega = 0$; т.е. статическая нагрузка.

Если частота больше нуля; т.е. $\omega > 0$, матрица комплексная, несимметричная. Более того, из-за использования граничных условий Неймана (3), или (5), или (7) матрица вырождена. Ядро дифференциального оператора (1), (3) состоит из трех векторов:

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_z \\ w_x \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_x \\ u_z \\ w_x \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ C_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_x \\ u_z \\ w_x \\ w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_3 \\ -C_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

В результате ядро конечно-разностного оператора содержит сеточные функции соответствующие приведенным выше.

Если частота равна нулю, правые части третьего и четвертого уравнений в (1) становятся тривиальными. Таким образом, можно ввести новую переменную

$$V = \nabla \cdot \vec{w} = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_z}{\partial z}$$

и упростить систему (1)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda_u + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda_u \frac{\partial u_z}{\partial z} + \alpha MV \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_u \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda_u + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \alpha MV \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha M \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + MV \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\alpha M \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + MV \right] &= 0, \end{aligned}$$

где присутствуют только три независимые переменные. Таким образом, ранг матрицы системы линейных уравнений составляет $3/4N$.

Решение системы линейных уравнений с сингулярной несимметричной комплексной матрицей является сложной задачей для итерационных методов [18]. На сходимость итерационных решателей сильно влияет выбор предобуславливателя, который не является основной темой данного исследования. Кроме того, мы имеем дело с двумерными задачами, поэтому прямые методы могут

быть эффективно применены для решения СЛАУ. В частности, мы используем разреженный прямой решатель Intel MKL PARDISO, который очень эффективно оптимизирован для архитектур Intel.

Численные эксперименты

Сначала мы проверили алгоритм на однородной модели пороупругой среды со следующими параметрами:

$$\mu = 5.7 \cdot 10^9 \text{ Pa}, \alpha = 0.87, \eta = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}, \kappa = 10^{-12} \text{ m}^2, \lambda_0 = 6.09 \cdot 10^9 \text{ Pa}, M = 6.72 \cdot 10^9 \text{ Pa}, \rho = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho = 1040 \text{ kg/m}^3, T = 1.5 \text{ и } \phi = 0.3.$$

Последние четыре параметра - это плотность породы, плотность жидкости, извилистость и пористость соответственно. Они не используются в квазистатической модели, но нужны для оценки скорости распространения и затухания волны в динамическом состоянии.

Для моделирования квазистатического нагружения пористого материала, заполненного жидкостью, мы рассмотрели квадратную область размером 1 м и с дискретизацией $h_x = h_z = 0.002 \text{ m}$. Таким образом, размер задачи составил $N_x = N_z = 500$ узлов. Мы выбрали пять частот 0, 0,1, 1, 10, 100, 1000 Гц, вычислили тензоры жесткости, а затем оценили скорость и затухание быстрой Р-волны, как показано на рисунке 3. Изначально модель была однородной и изотропной, поэтому скорость не зависела от направления распространения. Единственным физическим фактором, вызывающим затухание в однородных пороупругих средах, является течение Био на высоких частотах. Однако его нельзя разрешить в квазистатическом состоянии. Таким образом, затухание численного решения равно нулю для всего диапазона частот. Скорость численного решения занижена, но разница составляет около 0,1 м/с; т.е. относительная погрешность составляет $3.5 \cdot 10^{-5}$, что является приемлемым уровнем.

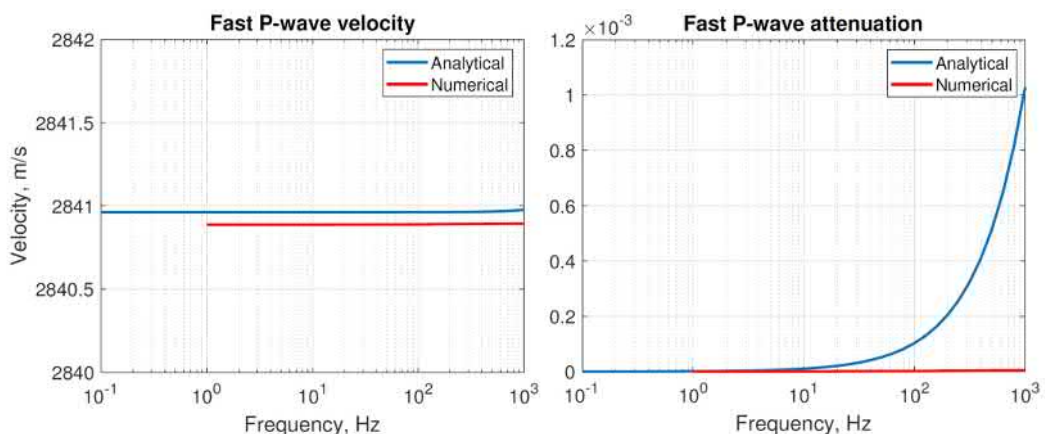


Рис.3 Сравнение численных оценок (красный) с аналитическим решением (синий). На левом рисунке представлена фазовая скорость, на правом рисунке –затухание Q^{-1} .

Трещиноватая среда

Чтобы проиллюстрировать применимость представленного подхода к оценке дисперсии и диссипации сейсмических волн, распространяющихся в неоднородных пороупругих средах, мы рассмотрели трещиновато-пористую среду. Мы использовали те же модели, что описаны в [16]. Мы рассмотрели два ортогональных набора трещин. Длина трещины в обоих наборах была зафиксирована на уровне 50 мм, а толщина - 2 мм. Мы создали несколько типов моделей трещин в зависимости от средней длины перколяции, используя метод имитационного отжига. Примеры моделей представлены на рисунке [4]. После этого мы заполнили модель свойствами материала. Вмещающая порода была слабопроницаемой, тогда как материал заполнения трещины был относительно гидравлически мягким, чтобы поддерживать поток жидкости. Описание модели представлено в таблице 1. Наличие неоднородности проницаемости в модели при распространении сейсмических волн возникают локальные перетоки флюида или перетоки, обусловленные распространением волн (от английского Wave-induced fluid flows) [15], [5], что в свою очередь приводит к диссипации сейсмической энергии.

Таблица 1

Свойства материалов.

Параметр	Скелет	Жидкость
Динамическая вязкость жидкости, Па	0.001	0.001
Проницаемость k_0 , м ²	10^{-15}	$5.5 \cdot 10^{-13}$
Плотность, кг / м ³	2458	2458
Коэффициент Ламе	$7.159 \cdot 10^9$	$2.40 \cdot 10^{10}$
Модуль сдвига, Па	$3.0969 \cdot 10^{10}$	$1.14 \cdot 10^{10}$
Константа Био и Уиллиса	0.2962	0.6078
Коэффициент накопления жидкости M , Па	$2.01 \cdot 10^{10}$	$9.48 \cdot 10^{10}$

Мы использовали предложенный алгоритм для оценки частотно-зависимых тензоров жесткости для всех шести типов моделей в частотном диапазоне $\nu \in [0, \dots, 1000]$ Гц. Кроме того, мы непосредственно моделировали распространение волн в трещиновато-пористых средах, заполненных жидкостью, используя подход, описанный в [16]. Распространение волны моделировалось для импульса Риккера с центральной частотой 1000 Гц. На рисунках [5] и [6] мы приводим оценки скорости и затухания, полученные двумя методами, соответственно. Полученные оценки скоростей занижены, тогда как затухание хорошо согласуется. В целом полученные результаты показывают, что увеличение длины перколяции трещиноватой системы вызывает увеличение затухания из-за FB-WIFF.

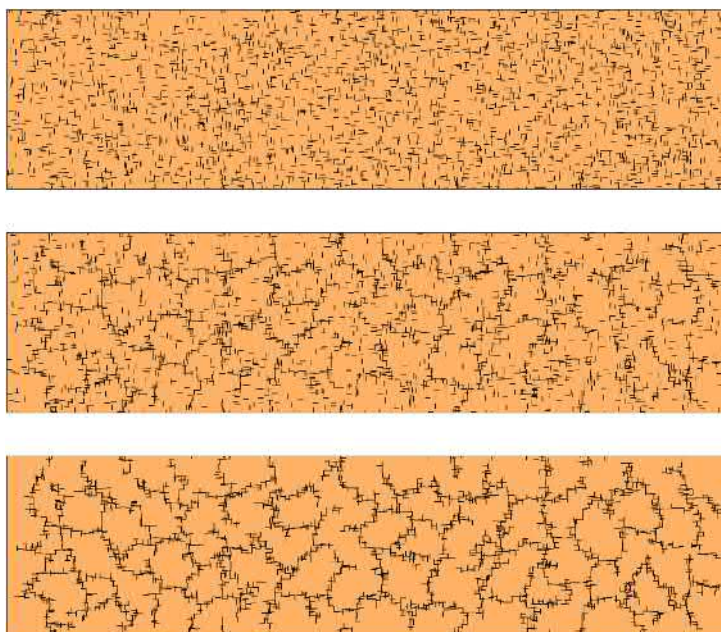


Рис. 4. Модели трещинных сред с различной длиной перколяции (увеличивающейся сверху вниз).

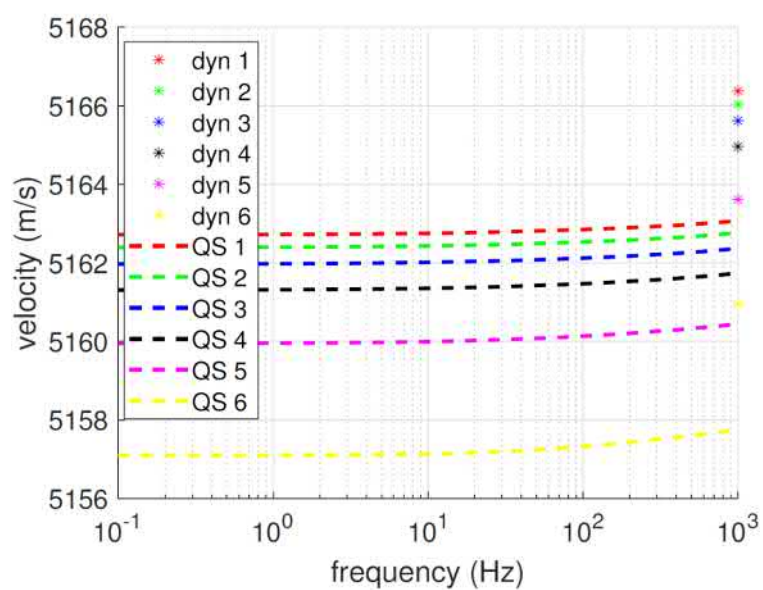


Рис. 5. Скорости волны qP для моделей с разной перколяцией. Линии представляют квазистатические оценки, маркеры используются для оценок при моделировании распространения волн.

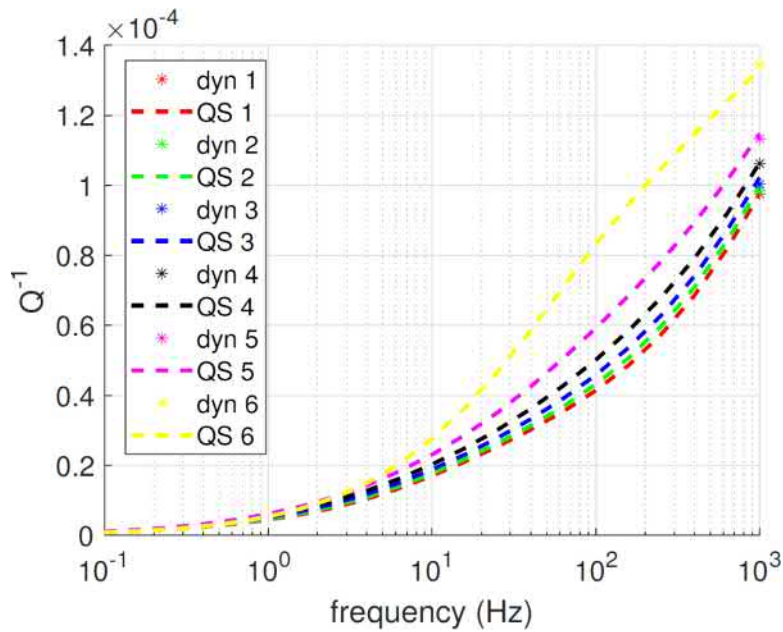


Рис. 6. Затухание волны qP для моделей с разной перколяцией. Линии представляют квазистатические оценки, маркеры используются для оценок при моделировании распространения волн.

Оценки производительности

Во всех описанных примерах использовалась сетка с 500 узлами в обоих пространственных направлениях. Мы вычислили эффективные тензоры жесткости для набора из 22 частот от 0 до 1000 Гц. Разовый запуск алгоритма (одна модель, одна частота) включает следующие шаги:

1. Построение матрицы A и правых частей b ;
2. PARDISO. Перестановка строк-столбцов матрицы. Это предварительный шаг для уменьшения объема памяти и времени, необходимого для факторизации матрицы системы.
3. PARDISO. Факторизация или LU разложение матрицы A .
4. PARDISO. Решение системы.
5. Постобработка: проверка относительной невязки ($|b - Ax| / |b| \leq 10^{-12}$), а затем построение тензора жесткости C .

Следует отметить, что при изменении частоты необходимо корректировать только главную диагональ матрицы A . Таким образом, шаг (1) может быть выполнен для нулевой частоты, при следующих циклах алгоритма (при изменении частоты) меняются только диагональные элементы. Шаг переупорядочения (2) зависит только от позиции ненулевых элементов A и может быть выполнен только один раз, но применяется ко всем ω . В результате весь алгоритм (шаги 1-5) применяется только к первой частоте в необработанном виде, тогда как сокращенная версия алгоритма (шаги 3-5) может применяться ко всем остальным частотам.

В наших расчетах использовался Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2690 v2 @ 3,00 ГГц с 20 ядрами. Время расчета для одной модели и всех 22 частот составляет ≈ 140 s.

Профилирование времени 22 прогонов:

1. Аппроксимация задачи: $\approx 3s$.
2. PARDISO подготовительный шаг («реордеринг»): $\approx 4s$.
3. PARDISO шаг факторизации. $22 \times (\approx 3 - 4 \text{ с.})$
4. PARDISO шаг решения. $22 \times (\approx 0.8 \text{ с.})$
5. Постобработка: $22 \times (\approx 0.4 \text{ с.})$

Для решения задачи размером 500^2 потребовалось около 8 Гб оперативной памяти, то есть задачи такого размера можно решать на персональном компьютере или использовать GP-GPU для повышения производительности.

Заключение

Мы представили численный алгоритм для моделирования низкочастотного нагружения пороупругих материалов, заполненных жидкостью, и оценки эффективных частотно-зависимых соотношений деформаций и напряжений для таких сред. Алгоритм включает в себя решение уравнения Био в квазистатической постановке. Задача параболическая, поэтому ее удобно решать в частотной области. В результате система линейных алгебраических уравнений должна быть решена для каждой временной частоты. Мы используем прямой решатель, основанный на LU разложении. Предложенный алгоритм позволяет восстановить тензор жесткости в широком диапазоне частот $[0, \dots, 1000]$ Гц.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 20-45-540004. Моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. ii. higher frequency range // Journal of the Acoustical Society of America. – 1956. – 28. – P.179 – 191.
2. Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. i. low-frequency range // Journal of the Acoustical Society of America 28. – 1956. – P.168 – 178.
3. Carcione, J.M., Cavallini, F. A rheological model for anelastic anisotropic media with applications to seismic wave propagation // Geophys. J. Int. – 1994. – 119. – P.338 – 348.
4. Christensen R.M. Theory of viscoelasticity, an introduction. – Academic press New York and London. – 1971. – 249 p.
5. Germn Rubino J., Guarracino L., Mller T.M., Holliger K. Do seismic waves sense fracture connectivity? // Geophysical Research Letters. – 2013 – 40(4). – P.692– 696.
6. Guo J., Rubino J.G., Glubokovskikh S., Gurevich B. Effects of fracture intersections on seismic dispersion: theoretical predictions versus numerical simulations // Geophysical Prospecting. – 2017. – 65(5). – P.1264 – 1276.
7. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Lth S., Ivanova A., Kempka T., Henninges J., Sopher D., Zhang F. The first post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // Geophysical Prospecting. – 2018. – 66(1). – P.62 – 84.
8. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J.G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2018. – 123(1). – P.125 – 143.

9. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wan Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – 65(6). – P.1649 – 1661.
10. Lisitsa V., Podgornova O., Tcheverda V. On the interface error analysis for finite difference wave simulation // *Computational Geosciences*. – 2010. – 14(4). – P.769 – 778.
11. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiry D., Kervvan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics* – 2020. – 88. – 101899.
12. Masson Y.J., Pride S.R., Nihei K.T. Finite difference modeling of biot's poroelastic equations at seismic frequencies. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 111(B10). – P.305.
13. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J.: 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales. // *Chemical Geology*. – 2018. – 481. – P.27 – 37.
14. Moczo P., Kristek J., Vavrycuk V., Archuleta R.J., Halada L. 3d heterogeneous staggered-grid finite-difference modeling of seismic motion with volume harmonic and arithmetic averaging of elastic moduli and densities. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2002. – 92(8). – P. 3042 – 3066.
15. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review. // *Geophysics*. – 2010. – 75(5). – 75A147 – 75A164
16. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured-porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – 41(8). – P.1533-1544
17. Rubino J.G., Muller T.M., Guarracino L., Milani M., Holliger K. Seismo-acoustic signatures of fracture connectivity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – 119(3). – P.2252 – 2271
18. Saad Y. *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. – SIAM. – 2003.
19. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben. // *The Leading Edge*. – 2020. – 39(12). – P.857 – 863
20. Samarskii A.A. *The theory of difference schemes* // *Pure and Applied Mathematics*. – v.240. – CRC Press – 2001.
21. Vavrycuk V. Velocity, attenuation, and quality factor in anisotropic viscoelastic media: A perturbation approach // *Geophysics*. – 2008. – 73(5). – D63 – D73.
22. Vishnevsky D., Lisitsa V., Tcheverda V., Reshetova G. Numerical study of the interface errors of finite-difference simulations of seismic waves // *Geophysics*. – 2014. – 79(4). – P.T219 – T232
23. Zhu Y., Tsvankin I. Plane-wave propagation in attenuative transversely isotropic media // *Geophysics*. – 2006. – 71(2). – P. T17 – T30.

REFERENCES

1. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – 28. – P.179 – 191.
2. Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – 28. – P.168 – 178.
3. Carcione, J.M., Cavallini, F. A rheological model for anelastic anisotropic media with applications to seismic wave propagation // *Geophys. J. Int.* – 1994. – 119. – P.338 – 348.
4. Christensen R.M. *Theory of viscoelasticity, an introduction*. – Academic press New York and London. – 1971. – 249 p.
5. Germn Rubino J., Guarracino L., Mller T.M., Holliger K. Do seismic waves sense fracture connectivity? // *Geophysical Research Letters*. – 2013 – 40(4). – P.692– 696.

6. Guo J., Rubino J.G., Glubokovskikh S., Gurevich B. Effects of fracture intersections on seismic dispersion: theoretical predictions versus numerical simulations // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – 65(5). – P.1264 – 1276.
7. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Lth S., Ivanova A., Kempka T., Henningses J., Sopher D., Zhang F. The first post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – 66(1). – P.62 – 84.
8. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J.G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – 123(1). – P.125 – 143.
9. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wan Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – 65(6). – P.1649 – 1661.
10. Lisitsa V., Podgornova O., Tcheverda V. On the interface error analysis for finite difference wave simulation // *Computational Geosciences*. – 2010. – 14(4). – P.769 – 778.
11. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiry D., Kervvan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics* – 2020. – 88. – 101899.
12. Masson Y.J., Pride S.R., Nihei K.T. Finite difference modeling of biot's poroelastic equations at seismic frequencies. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 111(B10). – P.305.
13. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J.: 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales. // *Chemical Geology*. – 2018. – 481. – P.27 – 37.
14. Moczo P., Kristek J., Vavrycuk V., Archuleta R.J., Halada L. 3d heterogeneous staggered-grid finite-difference modeling of seismic motion with volume harmonic and arithmetic averaging of elastic moduli and densities. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2002. – 92(8). – P. 3042 – 3066.
15. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review. // *Geophysics*. – 2010. – 75(5). – 75A147 – 75A164
16. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured-porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – 41(8). – P.1533-1544
17. Rubino J.G., Muller T.M., Guarracino L., Milani M., Holliger K. Seismo-acoustic signatures of fracture connectivity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – 119(3). – P.2252 – 2271
18. Saad Y. *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. – SIAM. – 2003.
19. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben. // *The Leading Edge*. – 2020. – 39(12). – P.857 – 863
20. Samarskii A.A. *The theory of difference schemes* // *Pure and Applied Mathematics*. – v.240. – CRC Press – 2001.
21. Vavrycuk V. Velocity, attenuation, and quality factor in anisotropic viscoelastic media: A perturbation approach // *Geophysics*. – 2008. – 73(5). – D63 – D73.
22. Vishnevsky D., Lisitsa V., Tcheverda V., Reshetova G. Numerical study of the interface errors of finite-difference simulations of seismic waves // *Geophysics*. – 2014. – 79(4). – P.T219 – T232
23. Zhu Y., Tsvankin I. Plane-wave propagation in attenuative transversely isotropic media // *Geophysics*. – 2006. – 71(2). – P. T17 – T30.

СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (ОПОРНЫЙ ПРОФИЛЬ 3-ДВ)

Владимир Дмитриевич Суворов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. +7 (383) 330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Евгений Владимирович Павлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. +7 (383) 330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Елена Александровна Мельник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. +7 (383) 330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Рассматриваемые данные являются частью комплекса геофизических исследований вдоль профиля 3-ДВ, входящего в систему опорных региональных профилей Российской Федерации. Рассматриваются сейсмические и гравитационные наблюдения, характеризующие структуру земной коры вдоль отрезка профиля 3-ДВ длиной около 600 км, пересекающего восточную окраину архейского Сибирского кратона, граничащего с мезозойской Верхояно-Колымской складчатой системой.

Ключевые слова: земная кора, сейсмические данные МПВ, ГСЗ, метод лучевого трассирования, скорость продольных волн, гравиметрия, коллизийная зона, Сибирь

SEISMOGRAVITY STRUCTURE OF THE CRUST OF THE EASTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON (3-DV PROFILE)

Vladimir D. Suvorov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Principal Scientist, tel. +7 (383) 330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Evgeny V. Pavlov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher, tel. +7 (383) 330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Elena A. Melnik

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Head of laboratory, tel. +7 (383) 330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

The data are part of a complex of geophysical studies along the 3-DV profile, which is part of the system of regional profiles of the Russian Federation. Seismic and gravity observations characterizing the structure of the Earth's crust along an about 600-km-long section of the 3-DV profile crossing the eastern margin of the Archean Siberian Craton, which borders the Mesozoic Verkhoyansk-Kolyma fold system, are considered.

Keywords: Earth's crust, refracted and reflected P-waves, travel times, forward ray tracing, collision zone, craton, gravimetry, folded system, Siberia

Вдоль опорного профиля 3-ДВ получены исключительно детальные для региональных исследований данные о строении земной коры и верхов мантии мало изученной геофизикой северо-восточной части Сибири [1]. Нами рассмотрен участок профиля, пересекающий восточную часть Сибирской платформы и ее пассивную континентальную окраину [3, 4]. Прикладная часть заключается в прослеживании корней тектонических блоков, выделенных, в основном, по данным приповерхностной геологии и региональной геофизики, связанных с генезисом и размещением месторождений полезных ископаемых [1].



Рис. 1. Положение участка профиля 3-ДВ на структурной схеме [3].

Наблюдения вдоль зимней автотрассы показаны жирной линией с номерами пунктов возбуждения МПВ (треугольники) и ГСЗ (серые кружки).

Приведены названия пересеченных профилем тектонических структур:

СД – Сетте-Дабанская тектоническая зона, О – Окраинный,

В – Восточно-Сетте-Дабанский разломы, Э – Эбейке-Хаятинский,

М – Минорский

Данные о структуре верхней коры. Предварительные сведения об основных региональных особенностях строения верхней коры (данные МПВ) по глубине и латерали хорошо распознаются на системе наблюденных годографов первых и последующих вступлений волн (рис. 2), в виде блочно-слоистой структуры коры и ожидаемого характера изменения скорости с глубиной, что определяет априорную модель. Наиболее контрастно различаются повышенные времена пробега волн первых вступлений в пределах Сибирской платформы в сравнении с складчатой областью, где скорость в верхней коре значительно выше (времена

пробега меньше). Важно отметить и наблюдаемые в последующих вступлениях годографы отраженных волн, свидетельствующие о слоистости разреза платформенного чехла. Подчеркнем плотность системы наблюдений МПВ с шагом между пунктами возбуждения (вибраторы) 7-9 км в зависимости от кривизны линии наблюдения, вдоль которой величина расстояния была 10 км и при соответствующем укорочении реальной длины годографов до 32-39 км (при фактической длине линии наблюдения 40 км).

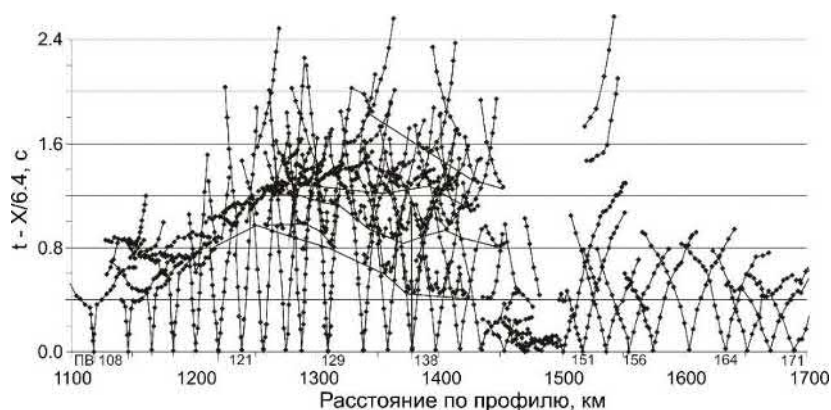


Рис. 2. Прореженные редуцированные годографы первых вступлений и отраженных волн (гиперболической формы) в последующих (30 годографов из 63 фактических). Черными сплошными линиями показаны огибающие минимумов годографов отраженных волн, подчеркивающие слоистость толщи осадочных отложений.
L-расстояние источник-приемник

Обработка данных ГСЗ. Система наблюдений ГСЗ характеризуется средним расстоянием между пунктами возбуждения 15-30 км (только на двух участках профиля такой промежуток увеличен до 60 и 90 км) в виде рассредоточенных взрывов 4-5 т в неглубоких водоемах и применении телеметрических четырехканальных (с шагом 300 м) станций «Роса-А», распределенных по профилю через 3-6 км при расстояниях источник-приемник до 400-450 км.

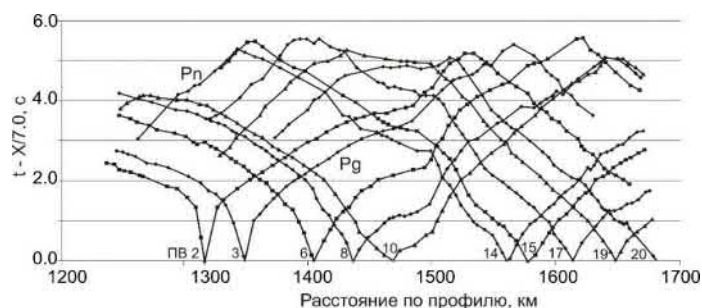


Рис. 3. Система наблюденных редуцированных (при скорости 7.0 км/с) годографов волн в первых вступлениях по данным ГСЗ (Pg – распространяющаяся в земной коре, Pn – преломленная на Мохо) с номерами ПВ. L-расстояние источник-приемник

Контрастность локальных увеличений кажущейся скорости волны P_g на прямых и встречных годографах указывает на присутствие приповерхностной неоднородности в виде аномального блока (1430-1500 км профиля, рис. 3). Годографы в западной части профиля, характеризуются монотонным увеличением кажущейся скорости, тогда как в восточной, они практически прямолинейны вплоть до выхода в первые вступления волны P_n . Резкие изменения наклона годографов с переходом от кажущейся скорости 6.6 -7.0 км/с до 7.9-8.0 км/с маркируют выход в первые вступления волны P_n .

Выявляемые свойства наблюдаемых годографов ГСЗ фактически определяют стартовую модель земной коры, параметры которой являются целью численного моделирования. Конечно, на ее выбор может оказывать влияние не всегда уверенная фазовая корреляции волн, однако размеры и контрастность рассматриваемых неоднородностей значительны, чтобы отнести их к достаточно обоснованным и пригодным для локализации. Здесь особую значимость приобретает расчет годографов первых вступлений, используемых в качестве первого приближения и анализ их соответствия наблюдаемому волновому полю. Это имеет непосредственное отношение и к обнаружению отраженной волны от Мохо (P_mP) на сейсмограммах и определение ее годографов, являющихся в платформенных условиях, как правило, опорными. В складчатой области ее корреляция в виде протяженных годографов гиперболической формы затруднена из-за значительной неоднородности коры. Поэтому для волны P_mP , в качестве первого приближения, полезно использовать расчетные годографы, в некоторой окрестности которых можно пытаться обнаружить хотя бы фрагменты ее осей синфазности и при обоснованной необходимости корректировать параметры нижней коры, не противоречащие годографам волны P_n . Моделирование структуры земной коры производилось итеративным методом прямого лучевого трассирования [5, 6] с учетом свойств ее верхней части, полученных по наблюдениям МПВ. Примеры виброграмм, сейсмограмм и результаты лучевого моделирования подробно рассмотрены в [3].

Верхняя кора по данным системы наблюдений МПВ. К наиболее крупным структурам верхней коры относятся Приверхоянский передовой и Тыловой прогибы, разделенные блоком с аномально повышенной до 6.5-6.6 км/с скоростью (рис. 4). Протяженность передового прогиба достигает 120-180 км, а локального Тылового только до 30 км. Приверхоянский передовой прогиб условно можно представить тремя этажами, разделяющимися по структуре и значениям скорости (рис. 4). В целом, структурные и скоростные характеристики передового и расположенного восточнее Сетте-Дабанского блока, локального Тылового прогибов и далее уже в пределах складчатой области оказываются структурно подобными, но с значительными различиями в изменениях скорости.

Структура всей толщи коры характеризуется более отчетливым картированием передового Приверхоянского, локального Тылового, совместно с прилегающей к нему частью складчатой области прогибов со скоростью 4.9-5.9 км/с и увеличенной до 10-12 км мощностью в сравнении с 6-7 км по данным МПВ (рис. 4). В платформенной части профиля кровля слоя нижней коры со

скоростью 6.7-6.9 км/с и мощностью 10-15 км залегает на глубине 30-40 км. Под Сетте-Дабанской зоной скорость в нем уменьшается до 6.6-6.7 км/с, являющейся характерной для складчатой области. На востоке ее мощность увеличивается до 25 км за счет подъема его кровли до 20 км при мало изменяющейся глубине Мохо в интервале 42-45 км. Далее на восток Мохо монотонно погружается до 50 км под передовым прогибом при скачкообразном воздымании до 42 км уже под Тыловым. Эту ступень можно принять за положение нижней границы кратона вдоль вероятного разлома с углом падения около 15°. В области передового прогиба и тектонической зоны скорость под Мохо постепенно уменьшается от 8.3 км/с в платформенной части до 8.1 км/с и в складчатой области она оценивается величиной 7.9 км/с.

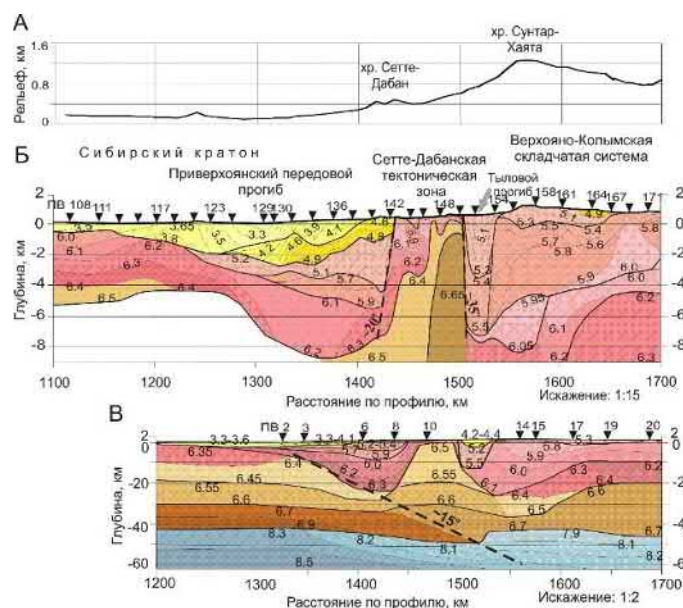


Рис. 4. Сейсмические разрезы верхней коры и всей ее толщи.

Вверху рельеф дневной поверхности. Толстые линии – сейсмические границы со скачком скорости или с изменениями ее градиента в слоях, тонкие – изолинии скорости с значениями в км/с.

Штриховой черной линией показана граница кратона, падающая на восток под углом около 15°. Черные треугольники с номерами – положение пунктов возбуждения

Дополнительную интерпретацию данных можно выполнить, используя сейсмоплотностной параметр $V_p^2\rho$, где плотность получена путем гравитационного моделирования сейсмической структуры (рис. 5). На кратоне близкие к 1 нормированные (на максимальную величину) значения этого параметра указывают на отсутствие латеральных неоднородностей в структуре коры. Аномальными являются только 3-5 слои верхней коры с неоднородностями амплитудой до 10% (слои 1, 2 представлены кайнозойскими осадками, 3, 4 присутствуют преимущественно только в Приверхоянском прогибе).

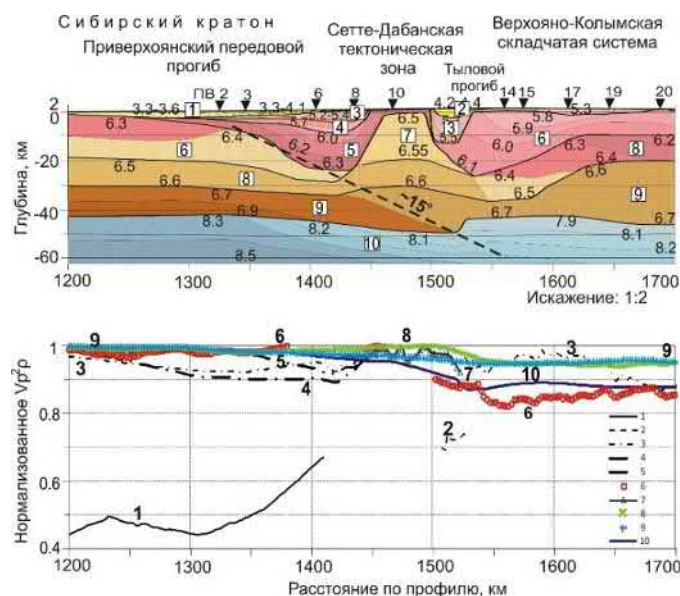


Рис. 5. Сейсмоплотностная характеристика коры

В складчатой области значения параметра в слоях (3, 6, 7, 10) существенно изменяются при согласном поведении слоев нижней коры (8, 9), но с 5% отличием от их кратонной части. Наиболее пониженные его значения характерны для слоя 6 (до 20%) и верхам мантии (до 10%). Природа таких аномалий может определяться вещественными (магматическими) и геомеханическими свойствами горных пород, измененными в процессе складчатости.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0006 «Структуры и напряженно-деформированное состояние земной коры платформенных и складчатых областей Центральной Азии на основе совместного решения обратных задач сейсмологии и гравиметрии».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашубин С.Н., Мильштейн Е.Д., Винокуров И.Ю., Эринчек Ю.М., Сержантов Р.Б., Татаринов В.Ю. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 67. – С. 43–48.
2. Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая структура земной коры в коллизионной зоне Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (профиль 3-ДВ) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т.. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 180- 186.
3. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под редакцией Л.М. Парфенова и член-корреспондента РАН М.И.Кузьмина. – М. МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с.

4. Parfenov L.M. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics // Tectonophysics. – 1991. – № 199. – P. 319-342.
5. Zelt C.A., Smith R.B., Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // Geophysical Journal International. – 1992. – № 108 (1) – P.16–34.
6. Zelt C. A., Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data // Geophysical Journal International. – 1999. – № 139. – P. 183–204.

REFERENCES

1. Kashubin S.N., Mil'shtejn E.D., Vinokurov I.YU., EHrinchek YU.M., Serzhantov R.B., Tatarinov V.YU. Gosudarstvennaya set' opornykh geologo-geofizicheskikh profilej, parametricheskikh i sverhglubokikh skvazhin – osnova glubinnogo 3D kartografirovaniya territorii Rossijskoj Federacii i ee kontinental'nogo shel'fa // Regional'naya geologiya i metallogeniya. – 2016. – № 67. – S. 43–48.
2. Suvorov V.D. Mel'nik E.A. Seysmicheskaya struktura zemnoy kory v kollizionnoy zone Sibirskogo kratona i Verkhoyano-Kolymaskoy skladchatoy sistemy (profil' 3-DV) // Interehkspo GEO-Sibir': XV Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress : Mezhdunar. nauch. konf. (g. Novosibirsk, 24-26 aprelya 2019 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovaniye. Gornoye delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geookologiya": Sbornik materialov v 9 t.. – 2019. – T. 2. – № 2. – S. 180- 186.
3. Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (YAkutiya) / Pod redakciej L.M. Parfenova i chlen-korrespondenta RAN M.I.Kuz'mina. – M. MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 571 s.
4. Parfenov L.M. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics // Tectonophysics. – 1991. – № 199. – P. 319-342.
5. Zelt C.A., Smith R.B., Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // Geophysical Journal International. – 1992. – № 108 (1) – P.16–34.
6. Zelt C. A., Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data // Geophysical Journal International. – 1999. – № 139. – P. 183–204.

© В. Д. Суворов, Е. В. Павлов, Е. А. Мельник, 2021

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ ИНВЕРСИИ НЕОДНОВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МЕЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, д.т.н., главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель; доктор технических наук, тел: 952 948 5056, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Галина Владимировна Нестерова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Сергей Алексеевич Примаков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент 4 курса кафедры геофизики геолого-геофизического факультета, e-mail: primackov@gmail.com

Проведено исследование влияния неодновременности измерения сигналов электрического и электромагнитного каротажа на определение параметров геоэлектрической модели при совместной численной инверсии. Радиальный профиль удельного электрического сопротивления рассчитывается для разного времени после бурения в программе моделирования процесса фильтрации бурового раствора в пористый проницаемый пласт с параметрами, характерными для мелового коллектора БС₁₀. Для этого непрерывного профиля рассчитываются сигналы электрокаротажа в пласте неограниченной мощности.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование, неодновременные измерения, геоэлектрические модели, совместная численная инверсия

FEATURES OF JOINT INVERSION OF NON-SIMULTANEOUS SIGNALS OF THE RUSSIAN LATERAL SOUNDING AND ELECTROMAGNETIC LOGGING IN CRETACEOUS RESERVOIRS

Carina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, D.Sc., Associated Professor, Leading Scientist, Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Associated Professor, phone: 952 948 5056, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of the study of the effect of the non-simultaneous measurement of electrical and electromagnetic logging signals on the determination of the parameters of the geoelectric model by joint numerical inversion. The radial profile of the electrical resistivity is calculated for different times after drilling in the program for modeling the process of mud invasion into a porous permeable formation with parameters characteristic of the BS₁₀ cretaceous reservoir. For this continuous resistivity profile electric log signals are calculated for the reservoir of unlimited thickness.

Keywords: Russian lateral logging, high-frequency induction isoparametric logging, non-simultaneous measurements, geoelectrical model, joint numerical inversion

Радиальный профиль УЭС формируется в коллекторе при бурении в результате фильтрации из скважины бурового раствора. Значения УЭС и положение особенностей профиля зависят от фильтрационно-емкостных свойств пласта и глинистой корки (пористости, проницаемости), от технологических параметров бурения и свойств насыщающих пласт флюидов и фильтрата бурового раствора [1–5]. Соответственно, зная радиальное распределение УЭС можно оценить ФЕС и нефтенасыщение коллектора [6]. Для определения радиального профиля применяют боковое каротажное зондирование (БКЗ) и высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование (ВИКИЗ). Достоверность результата выше при совместной инверсии одновременно измеренных современными каротажными комплексами [7] сигналов этих методов [8], но чаще всего сигналы измеряются с временным интервалом в несколько часов.

Изменение УЭС от стенки скважины вглубь пласта является непрерывной функцией, которая может быть рассчитана, например, с помощью специальной программы GENM2D [9–10] (или ПО АТЛАС МФМ (ИНГГ СО РАН, [11])). При этом традиционные методики оценки нефтесодержания базируются на кусочно-однородном представлении радиального распределения УЭС, включающем одну или две зоны кроме пласта [12–14]. Поэтому кроме задачи определения по данным электрокаротажа радиального профиля УЭС есть еще проблема соответствия кусочно-постоянного его представления непрерывному.

Для оценки возможности адекватного восстановления радиального профиля УЭС по данным БКЗ и ВИКИЗ, в том числе разновременным, проведены численные исследования:

- рассчитано проникновение фильтрата бурового раствора в типичных для меловых отложений Широкого Приобья моделей коллекторов (БС₁₀ и БС₁₁) для временного диапазона, характерного для технологий построения эксплуатационных скважин;
- по модифицированной формуле Арчи-Дахнова содержание и минерализация электропроводящего флюида пересчитаны в зависимость УЭС от радиального расстояния от стенки скважины;
- для непрерывного радиального профиля УЭС рассчитываются сигналы БКЗ и ВИКИЗ;

• по комбинациям рассчитанных сигналов БКЗ и ВИКИЗ для разного времени после бурения строятся кусочно-постоянные цилиндрически-слоистые модели профиля УЭС.

Особый акцент в исследовании делался на возможности выявления и оценки параметров окаймляющей зоны – зоны скопления минерализованной пластовой воды – как удобного признака наличия подвижной нефти, а следовательно, и продуктивности коллектора.

Расчеты проводились с применением нового программного обеспечения: распределения содержания воды и ее минерализации – ПО GENM [10–11], сигналов БКЗ и ВИКИЗ – ПО AlondraWL [15–16]. Совместная инверсия сигналов также осуществлялась в программе AlondraWL, прямые задачи в которой обеспечивают высокую точность расчетов и учитывают основные конструктивные особенности приборов электрокаротажа [17–20].

Расчетные радиальные профили УЭС

Для расчета радиального профиля УЭС взяты средние параметры меловых коллекторов БС₁₀ и БС₁₁, продуктивных на нескольких месторождениях Западной Сибири, например, на Федоровском и Когалымском, где они залегают примерно на одной глубине около 2400 м. Параметры моделей для численного моделирования процесса фильтрации при вскрытии коллектора на глинистом растворе приведены в табл. 1. Для начального этапа исследования толщина коллектора считалась неограниченной. Насыщение варьировалось от 30 до 80 %.

Таблица 1

Основные параметры коллектора для моделирования радиального распределения УЭС (для меловых коллекторов БС₁₀ и БС₁₁).

Параметр	Значение в пласте БС ₁₀	Значение в пласте БС ₁₁
Глубина, [м]	2400	2400
Плотность вмещающих пород, [кг/м ³]	2400	2400
Плотность бурового раствора, [кг/м ³]	1160	1160
Вязкость (пластовые условия), [Па·с] пластовой воды пластовой нефти	0.0006 0.00294	0.0006 0.002
Проницаемость пласта, [мД] глинистой корки, [мкД]	50 5	50 5
Пористость пласта глинистой корки	0.17 0.6	0.20 0.6
Соленость, [кг/л] пластовой воды бурового раствора	0.015 0.001	0.020 0.001
Содержание глинистых частиц в буровом растворе	0.045	0.045
Содержание остаточной нефти, %	0	25

Времена после бурения выбраны кратными 6 часам в диапазоне от 6 до 48 часов. Минимальное время 6 часов в некоторых разрезах может соответствовать времени измерения приборами каротажа в процессе бурения, максимальное выбрано на основе анализа времени проведения каротажа. По данным компании Лукойл обычный интервал времени проведения каротажа составляет примерно от 24 до 48 часов после бурения очередного интервала эксплуатационной скважины.

Для пласта БС₁₀ Федоровского месторождения была выбрана модель, в которой предполагалось наличие небольшого количества остаточной воды (20%, пластовая вода, прочно удерживаемая в тонких капиллярах и на границе пор), но вся нефть считается подвижной. Вторая модель взята из статьи [4] – это пласт БС_{11/26} Когалымского месторождения, в котором дополнительно предполагалось наличие остаточной нефти (25 %). Радиус скважины составляет 0.108 м, сопротивление пресного глинистого бурового раствора 1.0 Ом·м.

В модели коллектора БС₁₀ при нефтесодержании 80 % на радиальном профиле УЭС выделяется три зоны: зона проникновения (ЗП) с максимальным значением УЭС от 22 Ом·м (6 часов после бурения) до 25 Ом·м (48 часов после бурения), окаймляющая зона (ОЗ) с одинаковым для всех расчетов УЭС, равным 11 Ом·м, и неизменный пласт с УЭС 25 Ом·м (рис. 1). Для 48 ч после бурения толщина ЗП увеличилась на 26 см по сравнению с измерением для 6 ч. Ширина ОЗ увеличилась примерно на 6 см (13 см для 6 ч и 19 см для 48 ч). Через 24 часа после бурения фильтрат бурового раствора (ФБР) проникает все медленнее, а после 42 ч изменение профиля УЭС становится незначительным.

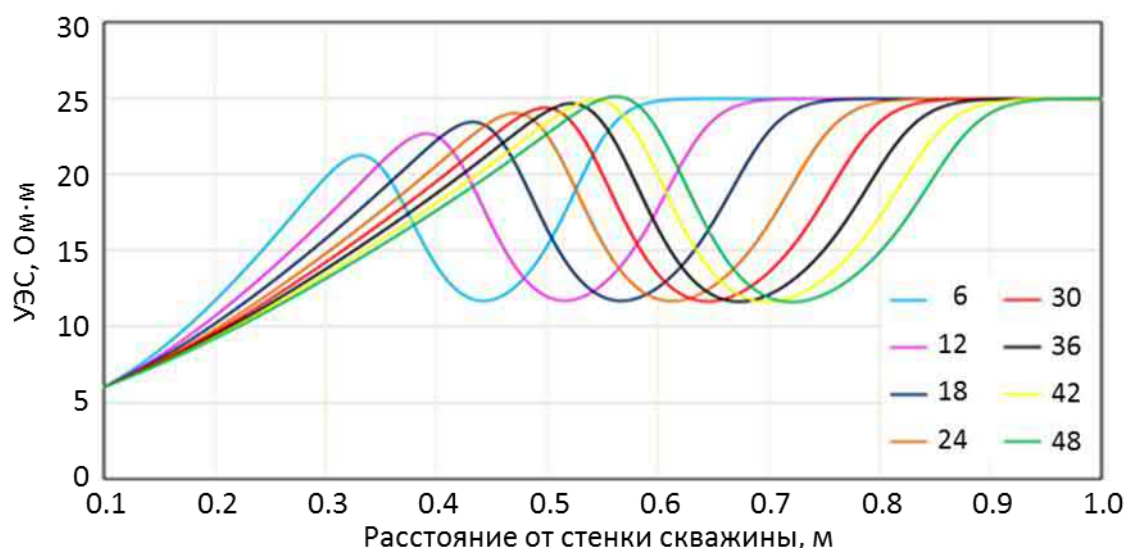


Рис. 1. Радиальный профиль УЭС для водонасыщенности 20% для разного времени после бурения (шифр кривых), модель пласта БС₁₀.

В модели коллектора БС₁₁ пористость пласта и минерализация пластовой воды больше, поэтому при той же нефтенасыщенности его УЭС ниже (13 Ом·м),

чем в пласте BC_{10} (рис. 2). УЭС ОЗ равно 5,5 Ом·м, УЭС ЗП 30 Ом·м. Отметим, что в этой модели значение УЭС на границе скважины значительно выше (около 16 Ом·м) по сравнению с моделью пласта BC_{10} . Экстремальные значения УЭС расположены на радиальном расстоянии примерно в полтора раза меньше, чем в модели BC_{10} .

Расчеты для разного времени после бурения показывают такую же зависимость скорости изменения радиального профиля, поэтому далее рассматриваются случаи для 24, 30 и 36 часов после бурения.

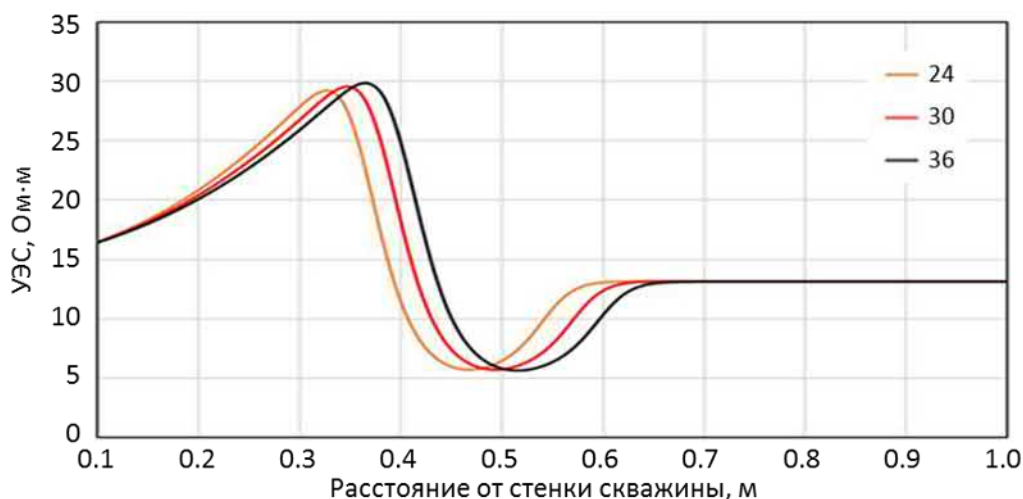


Рис. 2. Радиальный профиль УЭС для водонасыщенности 20% (сверху вниз) для разного времени после бурения (шифр кривых), модель пласта BC_{11} .

Сигналы БКЗ и ВИКИЗ, рассчитанные для моделей на этих временах, весьма слабо различаются (рис. 3). Необходимо отметить, что для модели пласта BC_{10} кривые зондирования и БКЗ, и ВИКИЗ оказываются восходящими, то есть наличие ОЗ не проявляется ожидаемой корытообразной формой кривой ВИКИЗ. Это связано с влиянием зоны низкого УЭС рядом со скважиной, сравнимой по толщине с ОЗ и снижающей кажущееся УЭС для коротких и среднего зондов ВИКИЗ. В то же время для модели пласта BC_{11} влияние ОЗ приводит к явно выраженной корытообразной форме кривой ВИКИЗ, при этом сигналы коротких зондов еще зависят от времени после бурения.

Результаты совместной численной инверсии были получены при следующих предположениях. Стартовая модель для всех комбинаций сигналов БКЗ и ВИКИЗ выбиралась одинаковой. При инверсии варьировались значения как УЭС зон, так и положения их цилиндрических границ.

Для модели пласта BC_{10} стартовая модель выбиралась следующим образом: прискважинная зона (0,3 м) — зона повышенного сопротивления (0,3 м) — зона пониженного сопротивления (0,2 м) — неизменный пласт, сопротивления во всех зонах — 10 Ом·м. Отметим, что при задании всего двух измененных зон в инверсионной модели не удастся не только оценить параметры ОЗ, но и получить

соотношение УЭС, соответствующее такому типу проникновения: УЭС или повышается в зонах от скважины к пласту при большом содержании нефти, или УЭС второй зоны выше УЭС первой зоны и пласта, в случае меньшего нефтесодержания. Небольшая чувствительность к параметрам ОЗ появляется только при трех измененных зонах в модели и если их границы близки к положению точек изгиба на непрерывном профиле УЭС. То есть, в модели пласта без остаточной нефти можно оценить УЭС ОЗ только при задании близкого к исходному положения границ всех измененных зон, при этом точность УЭС ОЗ оказывается очень низкой (рис. 4). Эти особенности оказываются характерными для результата совместной инверсии как одновременных, так и разновременных данных БКЗ и ВИКИЗ.

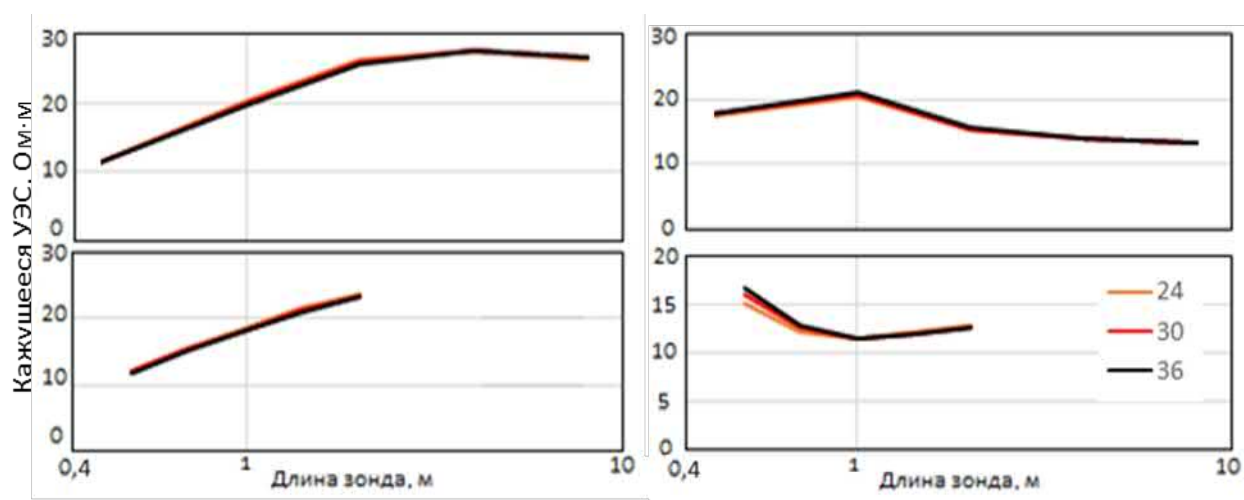


Рис. 3. Сигналы БКЗ (вверху) и ВИКИЗ (внизу), рассчитанные для разного времени после бурения для моделей без остаточной нефти (БС₁₀, слева) и с ней (БС₁₁, справа) при водонасыщенности 20%.

Модель для пласта БС₁₁ подбирается много проще, при двух измененных зонах, что обусловлено соотношением сигналов ВИКИЗ (рис. 5), соответствующим также практическому материалу. При относительно высоком УЭС в прискважинной части радиального распределения у средних зондов ВИКИЗ появляется чувствительность к окаймляющей зоне. При хорошем качестве подбора сигналов толщины эквивалентных измененных зон оказываются меньше, чем хотелось бы ожидать: цилиндрические границы сдвинуты к скважине относительно точек изгиба непрерывных профилей на 10 (первая граница) и 5 (вторая граница) см. Тем не менее, подобранная как по одновременным, так и по разновременным сигналам модель содержит наш искомый признак – окаймляющую зону пониженного сопротивления.

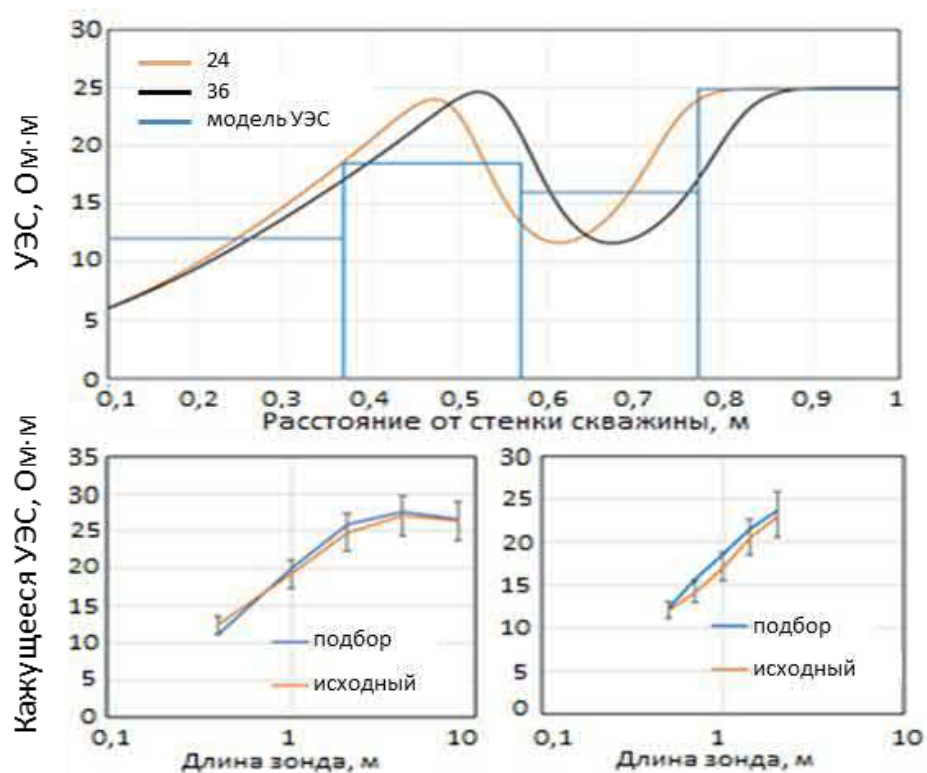


Рис. 4. Модель пласта БС₁₀: радиальный профиль УЭС для водонасыщенности 20% (вверху); исходные и подобранные сигналы БКЗ (слева) для 36 часов и ВИКИЗ (справа) для 24 часов.

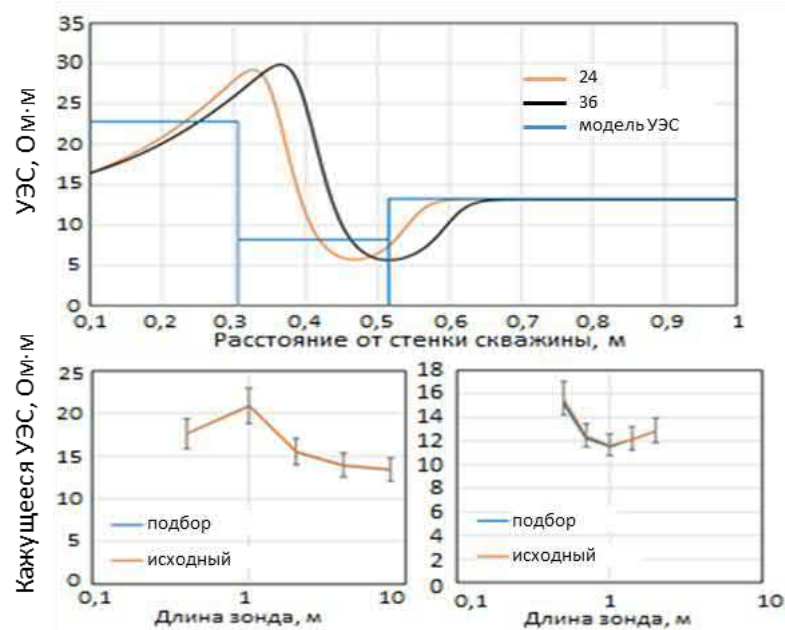


Рис. 5. Модель пласта БС₁₁: радиальный профиль УЭС для водонасыщенности 20% (вверху); исходные и подобранные сигналы БКЗ (слева) для 36 часов и ВИКИЗ (справа) для 24 часов.

Результаты

В результате исследований временных изменений в прискважинной зоне нефтесодержащего коллектора и их влияния на сигналы электрокаротажа и на результаты инверсии установлено:

- при начале каротажа через 24 часа после окончания бурения время до 12 часов между измерениями ВИКИЗ и БКЗ не приводит к существенным ошибкам при их совместной инверсии, более важен выбор модели измененной фильтрацией бурового раствора зоны;
- если в модели коллектора нет остаточной нефти, то влияние окаймляющей зоны на сигналы ВИКИЗ может быть неявным; в этом случае для получения корректных результатов инверсии нужно предположить не только наличие всех зон коллектора, но и их примерные границы;
- в модели с остаточной нефтью толщины измененных зон занижаются, в то время как в модели без остаточной нефти подбираются практически точно, либо увеличиваются;
- сигналы БКЗ и ВИКИЗ для всех моделей с остаточной нефтью подбираются точно, в то время как в моделях без остаточной нефти присутствуют ошибки, близкие, но не превышающие 10% для БКЗ и 0,5 градуса для ВИКИЗ;
- если сигналы БКЗ более поздние, чем ВИКИЗ (например: БКЗ – 36 ч после бурения, ВИКИЗ – 30 ч), более точно подбирается УЭС зоны проникновения, а в обратном случае – УЭС окаймляющей зоны.

Исследования выполнены в рамках проектов 0331-2019-0014 и 0331-2019-0015 ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Broussard S. The Annulus Effect. The Technical Review // Oilfield Review. – 1989. – Vol.37. – No.1. – P. 41–47.
2. Allen D., Auzeiras F., Dussan E., Goode P., Ramakrishnan T S., Schwartz L., Wilkinson D., Fordham E., Hammond P., Williams R. Invasion Revisited // Oilfield Review. – 1991. – 3. – P. 10–23.
3. Епов М., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. Time evolution of the near borehole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. June 2-5, 2002. – 2002. – Paper ZZ. – P. 1-10.
4. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика. – 2004. – № 8. – С. 1033–1044.
5. Navarro D., Li S., Liu R.C., Mohanty K.K. et al. Invasion effects on time-lapsed array induction logs // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – 2007. – ККК. – P.1-10.
6. Ельцов И., Эпов М., Кашеваров А.А. Новый системный подход к интерпретации данных ГИС и ГТИ на основе комплексных геофизических и гидродинамических моделей // Технологии ТЭК. – 2005. – № 2(21). – С. 12-18
7. Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н. и др. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база // Нефтяное хозяйство, 2015. – № 9. – С. 38–43.

8. Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935-947.
9. Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование гидродинамических процессов в напряжённо-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. – Сборник статей. – М.: «ЕАГЕ Геомодель». – 2014. – С. 327-344.
10. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ельцов И.Н., Нестерова Г.В. GENM2D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ // № 2018613634, заявка № 2017663592 от 26.12.2017, зарегистрировано 21.03.2018, RU.
11. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю. ATLAS_GENM: Свидетельство о государственной регистрации базы данных // № 2018620241, заявка № 2017621566/69 от 26.12.2017, зарегистрировано 09.02.2018, RU.
12. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВикиЗ: Методическое руководство / Новосибирск: Изд-во СО РАН. НИЦ ОИГГМ. – 2000. – 121 с.
13. Erov M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study // Petrophysics. – 2020. – 61(1). – P. 38-71.
14. Сухорукова К.В., Петров А.М., Москаев И.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири и сигналы электрокаротажа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XIV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск, сб. материалов в 9 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – С. 79-86.
15. Нечаев О.В., Глинских В.Н. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15. – С. 53-63.
16. Нечаев О.В., Глинских В.Н. Трёхмерное моделирование и инверсия данных комплекса методов электрокаротажа в моделях сред с наклоном главных осей тензора электрической анизотропии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 127-139.
17. Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник. – 2017. – № 4(274). – С. 34-48.
18. Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // НТВ «Каротажник». – 2019. – № 3 (297). – С. 85-103.
19. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018: сб. материалов XIV Междунар. науч. конгр. в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 4. – С. 90–97.
20. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9-13 сентября 2019 г.): Тезисы докладов. – 2019. – С. 1-4.

REFERENCES

1. Broussard S. The Annulus Effect. The Technical Review // Oilfield Review. – 1989. – Vol.37. – No.1. – P. 41–47.

2. Allen D., Auzevias F., Dussan E., Goode P., Ramakrishnan T S., Schwartz L., Wilkinson D., Fordham E., Hammond P., Williams R. Invasion Revisited // *Oilfield Review*. – 1991. – 3. – P. 10–23.
3. Epov M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. Time evolution of the near bore-hole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // *SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*. June 2-5, 2002. – 2002. – Paper ZZ. – P. 1-10.
4. Epov M.I., El'cov I.N., Kashevarov A.A., Sobolev A.YU., Ul'yanov V.N. Evolyuciya zony proniknoveniya po dannym elektromagnitnogo karotazha i gidrodinamicheskogo modeli-rovaniya // *Geologiya i geofizika*. – 2004. – № 8. – S. 1033–1044.
5. Navarro D., Li S., Liu R.C., Mohanty K.K. et al. Invasion effects on time-lapsed array induction logs // *SPWLA 48th Annual Logging Symposium*. – 2007. – KKK. – P.1-10.
6. El'cov I., Epov M., Kashevarov A.A. Novyj sistemnyj podhod k interpretacii dannyh GIS i GTI na osnove kompleksnyh geofizicheskikh i gidrodinamicheskikh modelej // *Tekhnologii TEK*. – 2005. – № 2(21). – S. 12-18
7. Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N. i dr. Apparaturnyj kompleks SKL dlya karota-zha v neftegazovyh skvazhinah i ego interpretacionnaya baza // *Neftyanoe hozyajstvo*, 2015. – № 9. – S. 38–43.
8. Mihajlov I.V., Glinskih V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Sovmestnaya chislennaya inversiya dannyh indukcionnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovanij v modelyah geologicheskikh sred s osevoj simmetrijej // *Geologiya i geofizika*. – 2017. – T. 58. – № 6. – S. 935-947.
9. Nesterova G.V., El'cov I.N., Kindyuk V.A., Nazarov L.A., Nazarova L.A. Modelirovanie gidrodinamicheskikh processov v napryazhyonno-deformirovannoj priskvazhinnoj zone i geofizicheskie prilozheniya // *Petrofizika slozhnyh kollektorov: problemy i perspektivy 2014*. – Sbornik statej. – M.: «EAGE Geomodel'». – 2014. – S. 327-344.
10. Nazarov L.A., Nazarova L.A., El'cov I.N., Nesterova G.V. GEHM2D: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM // № 2018613634, zayavka № 2017663592 ot 26.12.2017, zaregistrirovano 21.03.2018, RU.
11. El'cov I.N., Nazarov L.A., Nazarova L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.YU. ATLAS GEHM: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh // № 2018620241, zayavka № 2017621566/69 ot 26.12.2017, zaregistrirovano 09.02.2018, RU.
12. Epov M.I., Antonov YU.N. Tekhnologiya issledovaniya neftegazovyh skvazhin na osnove VIKIZ: Metodicheskoe rukovodstvo / Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. NIC OIGGM. – 2000. – 121 s.
13. Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study // *Petrophysics*. – 2020. – 61(1). – P. 38-71.
14. Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Moskaev I.A., Nechaev O.V., Nikitenko M.N. Geoelektricheskie modeli melovyh kollektorov Zapadnoj Sibiri i signaly elektrokarotazha // *Interekspo GEO-Sibir'-2019. XIV Mezhdunar. nauch. kongr.*, 24–26 aprelya 2019 g., Novo-sibirsk, sb. materialov v 9 t. T. 2. – Novosibirsk: SGUGiT, 2019. – S. 79-86.
15. Nechaev O.V., Glinskih V.N. Bystryj pryamoj metod resheniya obratnoj zadachi elektricheskogo karotazha v neftegazovyh skvazhinah // *Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii*. – 2017. – № 15. – S. 53-63.
16. Nechaev O.V., Glinskih V.N. Trekhmernoe modelirovanie i inversiya dannyh kompleksa metodov elektrokarotazha v modelyah sred s naklonom glavnyh osey tenzora elektricheskoy anizotropii // *Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii*. – 2018. – T. 16. – № 4. – S. 127-139.
17. Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V. CHislennaya inversiya dannyh elektrokarota-zha v intervalah anizotropnyh glinistyh otlozhenij // *Karotazhnik*. – 2017. – № 4(274). – S. 34-48.

18. Petrov A.M., Suhorukova K.V., Nechaev O.V. Sovmestnaya dvumernaya inversiya dannyh elektricheskogo i elektromagnitnogo karotazhnyh zondirovanij v anizotropnyh mode-lyah peschano-glinistyh otlozhenij // NTV «Karotazhnik». – 2019. – № 3 (297). – S. 85-103.
19. Petrov A.M., Nechaev O.V., Suhorukova K.V. Bystraya sovmestnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovanij s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya // Interekspo GEO-Sibir'-2018: sb. materialov XIV Mezhdunar. nauch. kongr. v 6 t. – Novosibirsk: SGUGiT, 2018. – T. 4. – S. 90–97.
20. Petrov A.M., Nechaev O.V., Suhorukova K.V. Dvumernaya inversiya signalov rossijskogo elektrokarotazha, izmerennyh na intervalah slozhnopostroennyh otlozhenij // Geomo-del'-2019: 21-ya konferenciya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdenij nefi i gaza (g. Gelandzhik, 9-13 sentyabrya 2019 g.): Tezisy dokladov. – 2019. – S. 1-4.

© К. В. Сухорукова, Г. В. Нестерова, С. А. Примаков, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>М. Г. Бородина, Н. Г. Клопотова, Т. А. Пушкарева.</i> Оценка природных глин Сибири для лечебного использования.....	3
2. <i>Н. А. Бушенкова, О. А. Кучай.</i> Сейсмотектонические деформации в зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит	9
3. <i>К. А. Гадыльшина, К. Г. Гадыльшин, В. В. Лисица, Д. М. Вишневский.</i> Применение методов машинного обучения для подавления численной дисперсии в задаче численного моделирования полных волновых сейсмических полей	17
4. <i>Н. А. Голиков, Т. А. Якушенко.</i> Исследование влияния размера зерен на петрофизические свойства и ЯМР характеристики искусственных образцов	26
5. <i>С. И. Грубась, С. В. Яскевич, А. А. Дучков.</i> Локализация микросейсмических событий с использованием решения уравнения Эйконала нейронной сетью	32
6. <i>Ю. А. Дашевский, Н. Н. Велькер, А. В. Бондаренко, О. Б. Бочаров.</i> Корректное определение интегральной проводимости среды при решении некорректных обратных задач электромагнитного каротажа.....	39
7. <i>П. Г. Дядьков, Д. Ю. Сайлымбы, Н. Э. Михальцов, А. В. Левичева.</i> Индуктивная и остаточная намагниченность пород Зареченской и Никольской магнитных аномалий (восточное побережье оз. Байкал)	48
8. <i>А. В. Еделев, О. П. Саева, Н. В. Юркевич.</i> Гидрохимический состав поверхностных водных объектов в зоне воздействия Норильского промышленного района	55
9. <i>Ю. Г. Карин, Н. В. Юркевич.</i> Подход к обработке данных электротомографии для оценки объемов веществ хвостохранилищ	62
10. <i>Н. О. Кожевников.</i> Индукционно вызванная поляризация мерзлых пород и ее связь с диэлектрической релаксацией льда	67
11. <i>Я. В. Кожевникова, А. А. Власов, В. С. Пермяков.</i> Разработка программного обеспечения поточного измерителя удельного электрического сопротивления попутной воды газовых скважин	74
12. <i>И. В. Коковкин, П. В. Громыко, А. А. Брыксин, В.С. Селезнев.</i> О возможности удаленного мониторинга работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС по данным сейсмологических наблюдений	81
13. <i>А. А. Коханенко, Н. Г. Сидорина, Е. А. Король.</i> Минеральные питьевые столовые воды Алтая: характеристика и перспективы использования.....	90
14. <i>Д. Ю. Кушнир, Н. Н. Велькер, Д. В. Андорная, Ю. Е. Антонов.</i> Оценка расстояния до границы пласта по данным индукционного каротажа на основе нейронных сетей.....	95

15. <i>П. С. Латин</i> . Современные геодинамические процессы, потенциальные поля и угленосность северо-западной части Салаира.....	103
16. <i>А. А. Лапковская, К. В. Сухорукова, А. М. Петров, И. В. Суродина</i> . Влияние продольной трещины на сигналы бокового каротажного зондирования высокоомных отложений.....	109
17. <i>А. Р. Леоненко, К. В. Сухорукова, А. М. Петров</i> . Геоэлектрическая модель юрского коллектора Восточно-Сургутского месторождения по данным гальванических и электромагнитных зондирований	117
18. <i>А. Р. Леоненко, К. Н. Даниловский, А. М. Петров</i> . Применение сверточных нейронных сетей для обработки и неитерационной экспресс-инверсии данных электрокаротажа при исследовании сложнопостроенных проницаемых отложений	123
19. <i>Е. Е. Ляпина</i> . Распределение форм нахождения ртути в профиле типичных почв Южной Сибири.....	130
20. <i>А. В. Мамаева, Е. В. Крупнов</i> . Прогноз скопления газовых гидратов в мезозойских отложениях Центральной Якутии по данным электромагнитных зондирований.....	137
21. <i>А. К. Маништейн, П. А. Соколов</i> . Поточный измеритель минерализации водных растворов	143
22. <i>А. К. Маништейн, Е. С. Хлыстун</i> . Коррекция температурного дрейфа в аппаратуре частотного зондирования	153
23. <i>А. А. Мезин, М. Й. Шумскайте, Н. А. Голиков</i> . Связь комплексной диэлектрической проницаемости и ЯМР-характеристик бурового шлама с его фильтрационно-емкостными свойствами	162
24. <i>И. В. Михайлов, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина</i> . Обоснование физических экспериментов с электромагнитным зондом в тонкослоистых моделях по результатам численного моделирования	168
25. <i>К. С. Непеина, В. Е. Матюков</i> . Анализ вариаций геофизических параметров и сейсмических событий в пункте глубинного магнитотеллурического зондирования	174
26. <i>О. В. Нечаев, К. Н. Даниловский</i> . Численное решение трехмерной прямой задачи импульсного электромагнитного межскважинного просвечивания для мониторинга криолитозоны	181
27. <i>М. А. Новиков, В. В. Лисица</i> . Численная оценка сейсмического затухания в анизотропных трещиновато-пористых флюидонасыщенных средах	186
28. <i>В. А. Окунев, А. Ю. Соболев</i> . Инверсия данных электромагнитного каротажа в классе моделей с плавным распределением УЭС	196
29. <i>М. Н. Петров, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов</i> . Численное моделирование гидродинамических процессов в прискважинной зоне трещиновато-пористого коллектора.....	201
30. <i>А. М. Петров, К. Н. Даниловский, В. В. Еременко</i> . Быстрое решение прямых задач электрокаротажа в двумерных анизотропных моделях прискважинного пространства на основе численного моделирования и машинного обучения	210

31. <i>В. В. Плоткин</i> . Применение декомпозиции расчетной области при решении задач магнитотеллурического зондирования.....	218
32. <i>П. О. Полянский, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников</i> . Сейсмическая модель верхней части земной коры в створе северо-восточного участка профиля 3-ДВ по результатам цифровой обработки преломленных волн	225
33. <i>М. И. Протасов, Д. А. Литвиченко</i> . Возможности объектно-ориентированной миграции для построения изображений доюрского комплекса	234
34. <i>М. И. Протасов, Д. А. Неклюдов</i> . Методы расчёта частотно-зависимых лучей в зависимости от параметризации модели	243
35. <i>Д. И. Прохоров, В. В. Лисица, Я. В. Базайкин</i> . Редукция цифровых изображений для эффективного вычисления топологических изменений в матрице породы.....	251
36. <i>А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова</i> . Геоэлектрическое строение Муйской впадины Байкальского рифта по результатам интерпретации архивных данных геоэлектрики	258
37. <i>А. М. Санчаа, И. В. Суродина, Н. Н. Неведрова</i> . Трёхмерное моделирование разломной структуры в южной части Курайской впадины по данным вертикальных электрических зондирований	265
38. <i>А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, С. М. Бабушкин, И. О. Шапаренко, А. Е. Шалагинов</i> . Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками	272
39. <i>В. М. Соловьев, А. Ф. Еманов, С. А. Елагин, Н. А. Галёва</i> . К исследованию возможностей использования сейсмологической сети Алтае-Саянского региона для режимных вибросейсмических наблюдений.....	280
40. <i>В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев, Т. В. Кашубина, Н. А. Галёва</i> . Особенности сейсмического строения верхней коры Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей по данным разнополяризованных Р- и S-волн (в створе опорного профиля 8-ДВ).....	289
41. <i>С. А. Соловьев, В. В. Лисица</i> . Численное моделирование квазистатического нагружения пористых флюидонасыщенных образцов породы	298
42. <i>В. Д. Суворов, Е. В. Павлов, Е. А. Мельник</i> . Сейсмогравитационная структура земной коры восточной окраины Сибирского кратона (опорный профиль 3-ДВ).....	312
43. <i>К. В. Сухорукова, Г. В. Нестерова, С. А. Примаков</i> . Особенности совместной инверсии неодновременных сигналов бокового каротажного зондирования и электромагнитного каротажного зондирования в меловых коллекторах	319

CONTENTS

1. <i>M. G. Borodina, N. G. Klopotova, T. A. Pushkareva.</i> Assessment of Natural Clays of Siberia for Medical Use	3
2. <i>N. A. Bushenkova, O. A. Kuchay.</i> Seismotectonic Deformations in the Pacific and Okhotsk Lithospheric Plates Contact Zone	9
3. <i>K. A. Gadylshina, K. G. Gadylshin, V. V. Lisitsa, D. M. Vishnevsky.</i> Deep Learning-Based Numerical Dispersion Mitigation in Seismic Modeling	17
4. <i>N. A. Golikov, T. A. Yanushenko.</i> Study of the Influence of Grain Size on Petrophysical Properties and NMR Characteristics of Artificial Samples	26
5. <i>S. I. Grubas, S. V. Yaskevich, A. A. Duchkov.</i> Localization of Microseismic Events Using Physics-Informed Neural Network Solution to the Eikonal Equation	32
6. <i>Y. A. Dashevskiy, N. N. Velker, A. V. Bondarenko, O. B. Bocharov.</i> Correct Determination of Integral Conductivity in Solving Incorrect Inverse Problems of Electromagnetic Logging	39
7. <i>P. G. Dyadkov, D. Yu. Saylymby, N. E. Mikhaltsov, A. V. Levicheva.</i> Inductive and Remanent Magnetization of Rocks of Zarechenskaya and Nizhne-Baykalskaya Magnetic Anomalies (Eastern Coast of Oz. Baikal)	48
8. <i>V. Edelev, O. P. Saeva, N. V. Yurkevich.</i> Hydrochemical Composition of Surface Water Bodies in the Area of Impact of the Norilsk Industrial Region	55
9. <i>Y. G. Karin, N. V. Yurkevich.</i> An Approach to Processing Electrotomography Data for Estimating the Volumes of Substances in Tailings	62
10. <i>N. O. Kozhevnikov.</i> Inductive Source Induced Polarization of Frozen Rocks and its Relationship with Dielectric Relaxation of Ice	67
11. <i>Y. V. Kozhevnikova, A. A. Vlasov, V. S. Permyakov.</i> Development of Software for the Flow Meter of the Electrical Resistivity of Associated Water of Gas Wells	74
12. <i>V. Kokovkin, P. V. Gromyko, A. A. Bryksin, V. S. Seleznev.</i> Possibilities of Remote Monitoring of the Novosibirsk HPP Hydraulic Units Operation According to Seismological Observations	81
13. <i>A. Kokhanenko, N. G. Sidorina, E. A. Korol.</i> Mineral Drinking Table Water of Altai: Characteristics and Prospects of Use	90
14. <i>D. Yu. Kushnir, N. N. Velker, D. V. Andornaya, Yu. E. Antonov.</i> Neural Network Inversion of Resistivity Data for Determination of Distance to a Bed Boundary	95
15. <i>P. S. Lapin.</i> Modern Geodynamic Processes, Potential Fields and Coal Content of the Northwestern Part of Salair	103

16. A. A. Lapkovskaya, K. V. Sukhorukova, A. M. Penrov, I. V. Surodina. Longitudinal Fracture Influence on the Unfocused Lateral Logging Sounding Responses in High-Resistivity Deposits	109
17. R. Leonenko, A. M. Petrov, K. V. Sukhorukova. Geoelectric Model of the Vostochno-Surgutsoe Field Jurassic Reservoir According to Galvanic and Electromagnetic Logging Sounding Data	117
18. R. Leonenko, K. N. Danilovskiy, A. M. Petrov. Application of Convolutional Neural Networks for Resistivity Logs Processing and Non-Iterative Express-Inversion in Complex Reservoir Environments.....	123
19. E. E. Lyapina. Distribution of the Forms of Mercury Occurrence in the Profile of Typical Soils of South Siberia	130
20. V. Mamaeva, E. V. Krupnov. Forecast of Gas Hydrate Accumulation in Mesozoic Sediments of Central Yakutia According to Electromagnetic Sounding Data	137
21. K. Manstein, P. A. Sokolov. Flow Meter of Mineralization for Aqueous Solutions.....	143
22. K. Manshtein, Y. S. Khlystun. Correction of the Temperature Drift in the Geophysical Instrument of Ground-Based Induction Frequency Sounding.....	153
23. A. Mezin, M. Y. Shumskaya, N. A. Golikov. Relationship of Complex Dielectric Permeability and NMR Characteristics of Drill Cuttings with its Reservoir Properties	162
24. V. Mikhaylov, M. N. Nikitenko, I. V. Surodina. Substantiation of Physical Experiments with Electromagnetic Tool in Thin-Layer Models Subsequent to Numerical Simulation Results	168
25. K. S. Nepeina, V. E. Matiukov. Analysis of Geophysical Parameters Variations and Seismic Events at the Point of Deep Magnetotelluric Sounding.....	174
26. O. V. Nechaev, K. N. Danilovskiy. Numerical Solving Three-Dimensional Direct Problem of Pulsed Electromagnetic Cross-Well Exploration for Cryolithozone Monitoring	181
27. M. A. Novikov, V. V. Lisitsa. Numerical Algorithm of Seismic Attenuation Estimation in Anisotropic Fractured Porous Fluid-Saturated Media	186
28. V. A. Okunev, A. Yu. Sobolev. Inversion of Electromagnetic Logging Data in a Class of Models with a Smooth Resistivity Distribution.....	196
29. M. N. Petrov, G. V. Nesterova, I. N. Yeltsov. Numerical Simulation of Hydrodynamic Processes in the Wellbore Zone of a Fractured Reservoir	201
30. M. Petrov, K. N. Danilovskiy, V. V. Eremenko. Fast Resistivity Logs Simulation in Two-Dimensional Anisotropic Near-Wellbore Space Models Based on Numerical Simulation and Machine Learning	210
31. V. V. Plotkin. Application of Calculation Region Decomposition in Solving Magnetotelluric Sounding Problems	218

32. <i>P. O. Polyansky, A. F. Emanov, A. S. Salnikov.</i> Seismic Model of the Upper Earth`s Crust on North-East Part of Traverse 3-DV Based on Results of Head Waves Digital Processing	225
33. <i>M. I. Protasov, D. A. Litvichenko.</i> Possibilities of Object-Oriented Migration for Imaging The Pre-Jurassic Deposits	234
34. <i>M. I. Protasov, D. A. Neklyudov.</i> Methods for Calculation of Frequency Dependent Rays Depending on the Model Parametrization.....	243
35. <i>D. I. Prokhorov, V. V. Lisitsa, Y. V. Bazaikin.</i> Digital Image Reduction for Efficient Computation Topological Changes in the Rock Matrix.....	251
36. <i>M. Sanchaa, N. N. Nevedrova.</i> Geoelectrical Structure of Baikal Rift Muyskaya Basin Based on Archival Geoelectrical Data Interpretation.....	258
37. <i>M. Sanchaa, I. V. Surodina, N. N. Nevedrova.</i> 3D Modelling of the Fault Structure in the Southern Part of the Kuraiskaya Basin According to Direct Current Method Data.....	265
38. <i>M. Sanchaa, N. N. Nevedrova, S. M. Babushkin, I. O. Shaparenko, A. E. Shalaginov.</i> First Results of Studies in the Gorlovskaya Values by Ground Methods of Electric Exploration with Controlled Sources	272
39. <i>V. M. Solovyev, A. F. Emanov, S. A. Elagin, N. A. Galyova.</i> To Study the Possibilities of Using the Seismological Network of the Altai-Sayan Region for Regime Vibro-Seismic Observationsñ	280
40. <i>V. M. Solovyev, A. S. Salnikov, V. S. Seleznev, T. V. Kashubina, N. A. Galyova.</i> To Study the Possibilities of Using the Seismological Network of the Altai-Sayan Region for Regime Vibro-Seismic Observations	289
41. <i>S. A. Solovyev, V. V. Lisitsa.</i> Numerical Wave Fields Quasistatic Modeling in Fluid-Filled Poroelastic Media	298
42. <i>V. D. Suvorov, E. V. Pavlov, E. A. Melnik.</i> Seismogravity Structure of the Crust of the Eastern Margin of the Siberian Craton (3-DV Profile)	312
43. <i>C. V. Sukhorukova, G. V. Nesterova, S. A. Primakov.</i> Features of Joint Inversion of Non-Simultaneous Signals of the Russian Lateral Sound- ing and Electromagnetic Logging in Cretaceous Reservoirs	319

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XVII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

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

№ 2

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 15.09.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 19,53. Тираж 34 экз. Заказ 122.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

**Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.**

**Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.**

- 
- Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия
- Т. 2. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология
- Т. 3. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью
- Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология
- Т. 5. Геопространственные аспекты исторических, правовых и социокультурных процессов
- Т. 6. Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке»
- Т. 7. Молодежь. Инновации. Технологии
- Т. 8. СибОптика-2021
- 