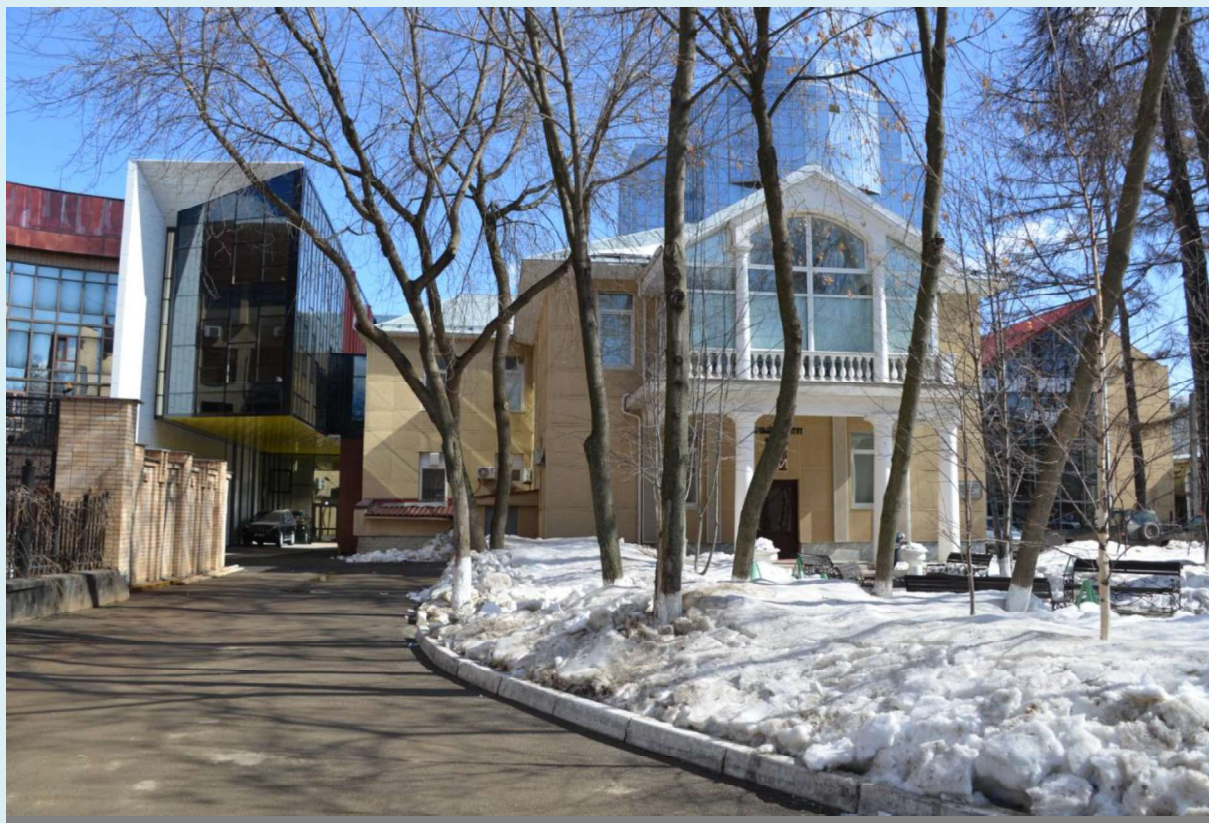




ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Сборник научных трудов

Выпуск 1 (46)

Пермь 2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
филиал
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пермское отделение межрегиональной общественной организации
«ЕВРО-АЗИАТСКОЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Сборник научных трудов
Выпуск 1 (46)

Пермь 2019

УДК 550.3(063)

ББК 26.2

В 74

ISBN

Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов. Вып. 1 (46). – Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ, 2019. – 433 с.

Сборник научных трудов подготовлен по материалам 46-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (г. Пермь, 20-25 января 2019 года). Материалы семинара отражают современное состояние теории и практики интерпретации данных отдельных геофизических методов – гравиметрии, магнитометрии, электрометрии, а также интерпретации данных указанных методов в комплексе геолого-геофизических работ. Рассмотрены теоретические аспекты, современные алгоритмы и компьютерные технологии обработки и интерпретации геофизических полей. Приводятся результаты геологического истолкования геофизических аномалий в различных регионах земного шара. Публикуемые статьи адресованы широкому кругу специалистов-геофизиков, занимающихся вопросами теории и практики геофизических исследований, и могут быть полезны для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений геолого-геофизического профиля. Статьи публикуются в авторской редакции.

Редакционная коллегия:

Бабаянц П.С. (ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика», Москва),

Блох Ю.И., д.ф.-м.н. (Москва),

Булычев А.А., д.ф.-м.н. (МГУ, Москва),

Бычков С.Г., д.г.-м.н. (ГИ УрО РАН, Пермь),

Глазнев В.Н., д.ф.-м.н., (ВГУ, Воронеж),

Долгаль А.С., д.ф.-м.н. (ГИ УрО РАН, Пермь),

Калинин Д.Ф., д.т.н. (ФГУНПП «Геологоразведка», Санкт-Петербург),

Кобрунов А.И., д.ф.-м.н. (УГТУ, Ухта),

Костицын В.И., д.т.н. (ПГНИУ, Пермь),

Мартышко П.С., чл.-корр. РАН (ИГф УрО РАН, Екатеринбург),

Михайлов В.О., д.ф.-м.н. (ИФЗ РАН, Москва),

Никитин А.А., д.ф.-м.н. (РГГРУ, Москва),

Новикова П.Н. к.г.-м.н. (ГИ УрО РАН, Пермь),

Старостенко В.И., академик НАНУ (ИГф НАНУ, Киев),

Тихоцкий С.А., д.ф.-м.н. (ИФЗ РАН, Москва)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Абрамов Д.В., Бебнев А.С., Бычков С.Г., Горожанцев С.В., Дробышев М.Н., Овчаренко А.В., Храпенко О.А.</i> Проведение синхронных экспериментальных гравиметрических наблюдений в 2017-2018 годах в точках, разнесённых на большие расстояния	8
<i>Абубакарова Э.А.</i> Выделение разрывных нарушений Терско-Каспийского прогиба по результатам интерпретации потенциальных полей с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D»	11
<i>Акимова Е. Н., Третьяков А.И.</i> Решение нелинейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии с использованием графических ускорителей	16
<i>Александров П.Н.</i> О несостоятельности интерпретации данных пассивной сейсморазведки, основанной на модели плоского поля	21
<i>Алексеев С.Г., Духанин А.С., Сенчина Н.П., Штокаленко М.Б.</i> Закономерности проявления рудных систем в потенциальных полях.....	26
<i>Антонов Ю.В.</i> Пульсации силы тяжести и сейсмического шума на Евразийском континенте.....	32
<i>Антонова И.Ю., Глазнев В.Н.</i> Модель строения верхней части коры Елецкого участка по комплексу геолого-геофизических данных.....	36
<i>Бабаянц П.С., Трусов А.А.</i> Геологическая интерпретация современных аэрогеофизических данных при изучении нефтегазоперспективных территорий: структурная задача.....	39
<i>Банникова П.А.</i> Применение высокоточной аэромагнитной градиентометрической съемки при поисках кимберлитовых тел в Якутской алмазонасной провинции.....	43
<i>Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А.</i> Подводные вулканы Броутонской вулканической зоны (центральная часть Курильской островной дуги)	47
<i>Борисов А.В., Виноградов В.Б.</i> Применение геофизических методов для изучения гидротехнических сооружений в Якутии.....	51
<i>Боровский М.Я., Богатов В.И., Борисов А.С., Шакуро С.В.</i> Геофизическая подготовка месторождений к применению методов увеличения нефтеотдачи.....	55
<i>Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А.</i> Интерпретация результатов гравиметрического мониторинга на аварийных участках рудников Верхнекамского месторождения калийных солей.....	59
<i>Вельтистова О.М., Мотрюк Е.Н.</i> Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных с целью выделения рифогенных построек Верхнепечорской впадины	63
<i>Володькова Т.В.</i> Динамика обогащенных мантийных магм в краевой зоне Сибирской платформы.....	68
<i>Воронова Т.А., Глазнев В.Н., Муравина О.М.</i> Технология детального плотностного моделирования верхней части коры Воронежского кристаллического массива	72
<i>Ворошилов В.А.</i> Оптимальное дискретное замощение геологической среды элементарными ячейками при решении прямой задачи магниторазведки.....	75
<i>Галиева М.Ф., Крутенко Д.С.</i> Связь нефтегазонасности и глубинного теплового потока (на примере арктического полуострова Ямал).....	79
<i>Гейхман А.М., Потапчук И.С., Баньковский М.В.</i> Научно-прикладное значение метода геофизической голографии в решении современных геологических проблем	83
<i>Геник И.В.</i> Возможности прогнозирования результатов региональных гравиметрических работ на нефть и газ.....	89

<i>Гласко Ю.В., Мегеря В.М., Старостенко В.И., Корчагин И.Н.</i> Комплекс вычислительных алгоритмов интерпретации и web-ориентированная информационная система относительно месторождений нефти и газа	94
<i>Горячев Ю.П.</i> Картирование вулcano-купольных структур Западного-Забайкалья перспективных на поиск месторождений полезных ископаемых по результатам анализа аэромагнитных данных.....	97
<i>Груздев В.Н., Антонова И.Ю.</i> Глубинная электропроводность восточного склона Воронежского кристаллического массива	101
<i>Давудова Э.И., Муравина О.М., Жаворонкин В.И.</i> Результаты идентификационного моделирования петрофизических параметров кристаллических пород Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива.....	106
<i>Давыденко А.Ю., Попков П.А., Слепцов С.В.</i> Инверсия аэромагнитных данных при подавлении магнитного эффекта траппов.....	109
<i>Давыденко А.Ю.</i> Трехмерная инверсия потенциальных полей на основе комбинированного функционала эластичной сети	112
<i>Долгаль А.С.</i> Применение монтажного метода для моделирования геологических тел, характеризующихся эффективной плотностью разного знака.....	117
<i>Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Симанов А.А., Хохлова В.В.</i> Оценка искажений аномалий силы тяжести, обусловленных влиянием сферичности Земли	121
<i>Ермолин Е.Ю., Ингеров О.</i> Методы экспресс-интерпретации магнитовариационных аномалий при решении рудных и региональных задач	126
<i>Ермолин Е.Ю., Мельников В.Н.</i> Аномалия гравитационного поля над участком размыва Санкт-Петербургского метрополитена.....	130
<i>Иванов П.В., Астапенко В.Н., Варенцов Ив.М., Леонов М.Г., Лозовский И.Н., Пушкикарёв П.Ю.</i> Изучение крупномасштабного тектоно-геодинамического узла Восточно-Европейской платформы магнитотеллурическими методами.....	133
<i>Иголкина Г.В.</i> Изучение железорудных формаций в Криворожской сверхглубокой скважине СГ-8 по данным магнитометрии	138
<i>Ильченко В.Л.</i> Моделирование тектонического расслоения корово-мантийной оболочки Земли по каротажным данным	142
<i>Исаев В.И., Кузьменков С.Г., Лобова Г.А., Лунёва Т.Е.</i> Прогнозирование трудноизвлекаемых запасов доюрских нефтегазоносных комплексов Нюрольской мегавпадины (Томская область)	148
<i>Калинин Д.Ф., Яновская Ю.А., Долгаль А.С.</i> Использование метода эмпирической модовой декомпозиции потенциальных полей с целью оценки региональных перспектив нефтегазоносности	153
<i>Каплун В.Б., Носырев М.Ю.</i> Глубинное строение Сихотэ-Алиня по данным магнитотеллурических зондирований и плотностного моделирования	157
<i>Керимов И.А., Степанова И.Э.</i> Методы F- и S-аппроксимации: состояние и перспективы развития.....	162
<i>Керцман В.М., Мойланен Е.В., Подмогов Ю.Г.</i> Особое место аэроэлектроразведки при детальном поисках кимберлитов	167
<i>Кишман-Лаванова Т.Н.</i> Вероятностный подход к решению обратных гравиметрических задач	172
<i>Кобрунов А. И., Бурмистрова О.Н., Мотрюк Е.Н.</i> Методы контроля оценки достоверности геологических моделей.....	177
<i>Кобрунов А. И., Дорогобед А. Н., Кожевникова П. В.</i> Информационная модель месторождения нефти и газа.....	183
<i>Кобрунов А. И., Мотрюк Е.Н., Бурмистрова О.Н.</i> Критерии оптимальности при решении обратных задач геофизики	188

<i>Кожеевникова П. В.</i> Построение нечетких петрофизических моделей: методы, их преимущества и недостатки	195
<i>Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьёв В.Н., Железняк Л.К.</i> Сравнение современных глобальных ультровысокостепенных моделей гравитационного поля Земли	199
<i>Кочнев В.А., Поляков В.С., Белолитецкий П.В.</i> Возможности детальных 2D гравитационных съемок при обработке и интерпретации сейсмических данных, получаемых в Восточной Сибири.....	202
<i>Кризский В.Н., Александров П.Н., Викторов С.В.</i> Математическое моделирование магнитного поля катодно-поляризуемого трубопровода	207
<i>Кузин А. В.</i> Комплексная интерпретация геофизических полей при прогнозировании медноколчеданного месторождения в северной части Челябинской области	212
<i>Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В., Буденный С.А., Журавлев С.Д., Григорьев Г.С.</i> Решение прямой задачи гравиразведки и магниторазведки на рельефе	215
<i>Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В.</i> Решение прямой задачи гравиразведки на сферической поверхности.....	220
<i>Кунцев В. Е., Кобрунов А. И., Мотрюк Е. Н.</i> Прогнозирование параметров эффективного фильтрационного сопротивления продуктивного пласта на основе принципов пассивной гидродинамической томографии.....	225
<i>Кунцев В. Е., Кобрунов А. И., Мотрюк Е. Н.</i> Функциональные элементы программного комплекса «Пассивная гидродинамическая томография» построения прогноза пространственного распределения фильтрационного сопротивления продуктивного пласта	229
<i>Ласкина Т.А., Колесников В.П.</i> О разработке технологии наземно-подземного электромагнитного зондирования	232
<i>Левашов С.П., Якимчук Н.А., Божжежа Д.Н., Корчагин И.Н., Дрогичкая Г.М.</i> Оперативное обнаружение участков с золоторудной минерализацией с использованием геоэлектрических и дистанционных методов	237
<i>Левашов С.П., Якимчук Н.А., Божжежа Д.Н., Корчагин И.Н.</i> Опыт использования мобильных геоэлектрических методов при проведении геофизических исследований в туннелях метрополитена глубокого заложения.....	242
<i>Левашов С.П., Якимчук Н.А., Божжежа Д.Н., Корчагин И.Н.</i> Применение геоэлектрических методов для оценки углеводородного потенциала поискового участка в транзитной зоне суша-море	247
<i>Леденгский Р.А.</i> Выяснение природы магнитной аномалии Норильско-Хараелахского прогиба	252
<i>Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Савченко А.С., Старостенко В.И., Легостаева О.В.</i> Плотностная неоднородность осадочной толщи Черноморской мегавадины и прилегающих территорий по данным трехмерного гравитационного моделирования	255
<i>Мартышко П.С., Бызов Д.Д., Черноскотов А.И.</i> О численном алгоритме решения прямой задачи гравиметрии для эллипсоидальных моделей	260
<i>Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Цидаев А.Г.</i> Построение трехмерных моделей земной коры и верхней мантии на основе комплексной интерпретации геофизических данных	264
<i>Мартышко П.С., Ладовский И.В., Гемайдинов Д.В.</i> О методе регуляризации для расчета параметров сглаживающего фильтра при аналитическом продолжении потенциальных полей.....	267
<i>Миненко П.А., Миненко Р.В., Мечников Ю.П.</i> О перспективах Анновского железорудного месторождения на больших глубинах	272

<i>Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Киселева Е.А., Хайретдинов С.А., Дмитриев П.Н., Карташев И.М.</i> Сопоставление данных о временных вариациях гравитационного поля (ГРЕЙС) с данными о смещениях земной поверхности (спутниковая геодезия, радарная интерферометрия) и дна океана для района землетрясения Тохоку-Оки (11 марта 2011 г)	276
<i>Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В.</i> Построение аналитической модели гравитационного поля при интерпретации нефтегазоносных структур.....	279
<i>Муравьев Л.А., Бызов Д. Д., Федорова Н.В.</i> Структурные особенности аномального магнитного поля прилегающей к Уралу части Арктики	283
<i>Натяганов В.Л., Шамина А.А.</i> Триггерное влияние вариаций солнечной активности, циклонов или тайфунов на сейсмичность	287
<i>Никитин А.А., Черемисина Е.Н.</i> Вейвлет анализ как средство максимального извлечения полезной информации	291
<i>Новикова П.Н.</i> Локализация ликвидированных скважин по данным микромагнитной съемки	294
<i>Петров А.В.</i> Технология оценки и анализ шумовых компонент геофизических полей	297
<i>Петров А.В., Зиновкин С.В.</i> Оригинальная технология объемного моделирования по данным гравиразведки и магниторазведки	299
<i>Пономарева Т.А., Пыстин А.М.</i> Новые данные по комплексной интерпретации петрофизических и геофизических данных (Полярный Урал).....	301
<i>Пономаренко И.А., Муравина О.М., Аузин А.А.</i> Изучение коллекторских свойств осадочных разрезов методом группового учета аргументов	304
<i>Причетий Т.И.</i> Применение скалярных импедансов и мнимых векторов при визуализации магнитотеллурических данных	307
<i>Романов А.М.</i> Обоснование применения геофизических методов для изучения гидродинамических структур литосферы	312
<i>Савин В.А., Санжаровская В.В.</i> Особенности обработки и интерпретации данных магниторазведки в низких магнитных широтах при картировании редкометальных пегматитов	317
<i>Сапожников В. М.</i> Способы повышения эффективности электропрофилирования при выявлении маломощных крутопадающих геологических тел.....	322
<i>Сапунов В.А, Нархов Е.Д., Денисов А.Ю., Савельев Д.В., Муравьев Л.А.</i> Современные оверхаузеровские магнитометры POS – надежный источник данных для геологической интерпретации.....	327
<i>Слепак З.М.</i> Методика полевых гравиметрических измерений при решении задач нефтяной геологии.....	332
<i>Стариков В.С., Глазнев В.Н.</i> Магнитные свойства и аномальное магнитное поле прямошовных стальных труб	337
<i>Тамахин А.С., Кислова Е.Б.</i> Стохастическое моделирование коровых отражений для метода общей глубинной точки	340
<i>Триколиди Г.Ю., Медведев Н.О., Зеленухин И.А.</i> Состояние изученности территории Сибири и Дальнего Востока среднемасштабными гравиметрическими съемками и перспективы их использования при геологическом картографировании.....	343
<i>Урдабаев А.Т.</i> Отражение палеозойских сдвигов литосферы Казахстана в структуре геопотенциальных полей	347
<i>Филатов В.В., Болотнова Л.А.</i> Прогноз динамических явлений по данным гравиразведки на Верхнекамском месторождении калийных солей	352
<i>Халиулин И.И., Мельникова М.В.</i> Применение комплексирования сейсморазведки и электроразведки при поисках газовых залежей на площадях ЯНАО	356

<i>Христенко Л.А., Степанов Ю.И., Кичигин А.В., Паршаков Е.И., Тайницкий А.А.</i> Содержательный анализ результатов классификаций данных электроразведки в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей	361
<i>Чадаев М.С., Костицын В.И., Гершанок В.А., Простолупов Г.В., Тарантин М.В.</i> Построение гравиметрических разрезов в системе ВЕКТОР при изучении земной коры	364
<i>Чепиго Л.С., Ткаченко Н.С., Лыгин И.В.</i> Определение положения и массы точечного источника гравитационного поля с учетом сферичности	368
<i>Шайхуллина А.А., Дубинин Е.П., Булычев А.А., Гилод Д.А.</i> Особенности строения юго-западной части Индийского океана на основе геофизических данных	370
<i>Шайхуллина А.А., Дубинин Е.П., Булычев А.А., Гилод Д.А.</i> Строение и эволюция поднятий Афанасия Никитина и Конрад по геофизическим данным	372
<i>Шелихов А.П.</i> К вопросу об оценке точности аэрогравиметрических работ.....	374
<i>Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Оборнев И.Е., Родионов Е.А., Ляховец Д.А.</i> Применение нейросетевого алгоритма для решения обратной задачи гравиразведки.....	377
<i>Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Чепиго Л.С.</i> Особенности плотностного моделирования в разных геологических ситуациях	379
<i>Шкиря М.С., Богданович Д.В., Айкашева Н.А., Белова А.Ю., Бухалов С.В., Жуков А.А., Давыденко Ю.А.</i> Оценка состояния водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей по результатам трехмерной инверсии наземных электромагнитных зондирований	385
<i>Щербинина Г.П., Простолупов Г.В.</i> Надсоляная толща – важный объект исследования для обеспечения безопасности разработки Верхнекамского месторождения солей	390
<i>Яицкий Н.Н., Касьянов В.В., Мельникова М.В., Халиулин И.Э.</i> Выявление и картирование флюидонасыщенных каверново трещинных зон, по комплексу геофизических полей (волновое, гравитационное, магнитное).....	395
<i>Якимчик А.И.</i> О построении аналитических аппроксимаций в гравиметрии.....	398

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<i>Боровский М.Я., Борисов А.С., Богатов В.И.</i> Профессор Э.К.Швыдкин: инновационные геофизические исследования в проблемах освоения ресурсов природных биотумов (разведка, контроль за разработкой, экология)	403
<i>Бычков С.Г., Митюнина И.Ю.</i> Состояние топливно-энергетического комплекса России и высшего образования с точки зрения пессимиста	408
<i>Вельтистова О.М., Овчарова Т.А.</i> Особенности подготовки специалистов геологического профиля в УГТУ	411
<i>Виноградов В.Б., Вандышева К.В.</i> Место и роль дисциплины «Физико-геологическое моделирование» в подготовке инженеров-геофизиков.....	415
<i>Гершанок В.А., Костицын В.И.</i> Роль математической подготовки в обучении студентов геофизических специальностей	418
<i>Гильмундинов А.Ю.</i> Разработка учебно-полевого цифрового геофизического регистратора.....	421
<i>Костицын В.И.</i> О научных исследованиях кафедры геофизики Пермского университета и проблемах в образовательной деятельности.....	423
<i>Лобанов А.М.</i> Вузовские научные направления в гравиразведке	427
<i>Спасский Б.А.</i> Особенности преподавания сейсморазведки у студентов геофизиков в ПГНИУ	429

аномалия должна иметь интенсивность 7 %, поляризуемость объекта должна составлять 50-60 %, т.е. это должны быть сплошные медноколчеданные руды.

Локальная гравитационная аномалия в северной части участка раздваивается, возможно, аномалии обусловлены рудами, залегающие на втором и третьем уровнях отложения.

Прогнозная масса верхнего (западного) рудного тела при простирации 1800м, мощности 10 м, глубине залегания до 500 м, составит 40 млн. тонн. Предполагаемое рудное тело второго уровня характеризуется локальной аномалией интенсивностью в 0,3-0,4 мгал. Его масса может быть 20 млн. тонн. При содержании меди и цинка в руде в 2 % прогнозные ресурсы рудного поля составят около 1,2 млн. тонн меди и 1,2 млн. тонн цинка. Если средние содержания золота и серебра в рудной массе принять такими же, как на Карабашских месторождениях (1,45 г/т и 14,9 г/т), то прогнозные ресурсы золота составят 88 тонн, серебра – 900 тонн.

Список литературы

1. Иванов С. Н., Меркулов М, И. Дегтярское колчеданное месторождение на Урале. М.-Л.: Цветметиздат, 1937.-124 с.
2. Кузин А. В., Папулов Н. Б. Эволюция магматизма, металлогения Тагильской палео-островодужной системы //Изв. вузов. Геология и разведка.-1996,№4.-С.101-105.
3. Кузин А. В. Рудоносные формации Карабашского района на Среднем Урале //Уральский геологический журнал. 2002, №4(28).-С.109-120.
4. Кузин А. В. Уфалейский вулcano-плутонический комплекс// Известия вузов. Геология и разведка. 2005. №3. С. 27-30.
5. Кузнецов Е. А. Геология зеленокаменной полосы восточного склона Среднего Урала. М.: Изд. АН СССР, 1939.-217 с.
6. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения. Екатеринбург, 1985.-289 с.
7. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Минерация шовных зон Урала. Часть 2. Дегтярско-Карабашская колчеданноносная зона (Средний Урал): Научное издание /Под ред. акад. РАН В. А. Коротеева. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003.-68 с.

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ НА РЕЛЬЕФЕ

Кузнецов К.М. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, kirillkuz90@gmail.com),
Булычев А.А. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва),
Лыгин И.В. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва),
Буденный С.А. (ООО «Инжиниринговый центр МФТИ», г. Долгопрудный),
Журавлев С.Д. (ООО «Инжиниринговый центр МФТИ», г. Долгопрудный),
Григорьев Г.С. (ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Санкт-Петербург)

Аннотация. Рассмотрен алгоритм решения трехмерной прямой задачи грави- и магниторазведки на рельефе.

Ключевые слова: прямая задача, гравirazведка, магниторазведка, БПФ

На сегодняшний день благодаря повышению точности измерения гравитационного и магнитного полей и увеличению объема данных все шире применяется трехмерная интерпретация потенциальных полей в комплексе геофизических методов для решения различных геологических задач.

Вопросам решения трехмерной прямой задачи грави- и магниторазведки посвящено множество работ Г.Я. Голиздра, Г.Г. Кравцова, В.Н. Страхова, В.Р. Мелихова, А.А. Булыче-

ва, Ю.И. Блоха и др. Применяемые подходы и средства их реализации обладают большим разнообразием. Их развитие связано, как с развитием и усложнением математического аппарата, применяемого при решении прямых задач, так и с развитием компьютерной техники.

Прямая задача гравиразведки и магниторазведки в общей постановке может быть сведена к интегралу:

$$\varphi(x, y, z) = \iiint_V \sigma(\xi, \eta, \zeta) K(\xi - x, \eta - y, \zeta - z) dx dy dz \quad (1)$$

где $\varphi(x, y, z)$ – наблюдаемая функция физического поля; $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ – функция физического параметра горных пород (плотность в случае гравиразведки и намагниченность в случае магниторазведки); $K(\xi - x, \eta - y, \zeta - z)$ – ядро интеграла типа свертки в виде функции,

Одним из эффективных алгоритмов расчета прямого гравитационного и магнитного эффектов от сложного трехмерного распределения масс или магнитной восприимчивости соответственно является алгоритм, предложенный в работах [1; 5], основанный на быстрой дискретной свертке. Идея этого подхода состоит в следующем. Трехмерная модель физических свойств представляется набором горизонтальных плоскопараллельных пластов. Распределение плотности (магнитной восприимчивости) в таком пласте задается в виде двумерной матрицы с равномерным шагом по площади. Тогда гравитационный (магнитный) эффект такого пласта может быть определен как результат дискретной свертки матрицы физических свойств с эффектом прямоугольной призмы. Горизонтальные размеры этой призмы равны размерам ячеек. В результате такой свертки может быть определен гравитационный или магнитный эффект этого пласта на горизонтальной плоскости. Вычисление дискретной свертки возможно осуществить следующим образом: 1) осуществить дискретное преобразование Фурье (ДПФ), т.е. рассчитать дискретные спектры сворачиваемых последовательностей, 2) перемножить полученные спектры и 3) осуществить обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ). Такой подход к вычислению дискретной свертки во много раз сокращает число машинных операций, если для вычисления ДПФ и ОДПФ использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), и носит название быстрой дискретной свертки (БДС).

Таким образом, алгоритм решения прямой задачи, основанный на БДС должен включать в себя способ построения трехмерного распределения параметров среды и алгоритм вычисления свертки дискретного массива плотности или магнитной восприимчивости с эффектом призмы. Кроме того, как уже отмечалось, результатом работы такого алгоритма будет эффект на горизонтальной плоскости. В то же время при решении интерпретационных задач необходимо учитывать, тот факт, что аномальные значения измеряемых полей отнесены к дневному рельефу. Это означает, что разрабатываемый алгоритм должен иметь возможность расчета гравитационного эффекта не только на горизонтальной плоскости, но и на рельефе.

Расчет эффекта на горизонтальный нулевой уровень

Рассматривая в качестве модели куб плотностей, создающий гравитационный эффект, прямая задача будет сведена к численному решению интеграла:

$$g(x, y, 0) = G \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \sigma(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta)^2]^{1/2}} \right) d\xi d\eta d\zeta \quad (2)$$

где $g(x, y, 0)$ – гравитационный эффект в точке $(x, y, 0)$, G – гравитационная постоянная, σ – плотность.

При численной реализации для вычисления поля на нулевом уровне модель среды разбивается на горизонтальные слои, которые в свою очередь представляются системой прямоугольных призм, с размерами, равными шагу расчетной сети. Тогда уравнение (2) можно представить в виде:

$$g(x_m, y_n, 0) = \sum_{k=0}^{N_z-1} g_k(x_m, y_n, 0) \quad (3)$$

где g_k – эффект от горизонтального пласта, N_z – число горизонтальных слоев.

Поскольку эффект рассчитывается на равномерную сеть, гравитационное поле, создаваемое таким k -м горизонтальным пластом может быть представлен дискретной сверткой поля прямоугольной призмы с единичной плотностью и массива плотностей:

$$g_k(x_m, y_n, 0) = \sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} g_{\Pi}(x_i - x_m, y_j - y_n, z_k) \cdot \sigma(x_i, y_j, z_k) \quad (4)$$

где g_{Π} – эффект от прямоугольной призмы с единичной плотностью (ядро свертки), σ – плотность ячейки, N_x – число точек по оси Ox , N_y – число точек по оси Oy , z_k – глубина центра ячейки (глубина середины k -го горизонтального слоя).

Непосредственное вычисление такой суммы может занимать большое количество времени. Для ускорения процесса вычисления используется алгоритм быстрой дискретной свертки [1; 8]. Суть его заключается в вычислении дискретных спектров плотности слоя и эффекта прямоугольной призмы и в дальнейшем перемножении этих спектров. Этот алгоритм позволяет значительно сократить время расчетов.

Для сокращения математических операций можно использовать алгоритм «быстрого преобразования Фурье» [8] и некоторые свойства ДПФ.

1) Линейность. Если $U_1(m_x, m_y)$ и $U_2(m_x, m_y)$ периодические последовательности с периодом N_x и N_y отсчетов, а $\hat{U}_1(n_x, n_y)$ и $\hat{U}_2(n_x, n_y)$ их дискретные спектры, то дискретное преобразование Фурье последовательности $U_1(m_x, m_y) + U_2(m_x, m_y)$ равно $\hat{U}_1(n_x, n_y) + \hat{U}_2(n_x, n_y)$.

2) Симметрия. Если $U_1(m_x, m_y)$ периодическая последовательность с периодом N_x и N_y отсчетов является действительной, то ее дискретное преобразование Фурье $\hat{U}_1(n_x, n_y)$ удовлетворяет следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\hat{U}_1(n_x, n_y)) &= \operatorname{Re}(\hat{U}_1(N_x - n_x, N_y - n_y)) \\ \operatorname{Re}(\hat{U}_1(n_x, N_y - n_y)) &= \operatorname{Re}(\hat{U}_1(N_x - n_x, n_y)) \\ \operatorname{Im}(\hat{U}_1(n_x, N_y - n_y)) &= -\operatorname{Im}(\hat{U}_1(N_x - n_x, n_y)) \\ \operatorname{Im}(\hat{U}_1(n_x, n_y)) &= -\operatorname{Im}(\hat{U}_1(N_x - n_x, N_y - n_y)) \\ n_x &= \overline{0, N_x - 1}, n_y = \overline{0, N_y - 1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Указанные два свойства могут использоваться для повышения эффективности вычислений ДПФ. Также существование данных условий позволяет вдвое сократить вычисления значений ДПФ, за счет того, что значения в первом квадранте однозначно определяют значения в третьем и значения во втором квадранте также однозначно определяют значения в четвертом квадранте.

Есть возможность использования данных свойств для еще большего ускорения работы алгоритма быстрой свертки. Поскольку требуется вычисление спектра для двух независимых действительных двумерных функций, то можно реализовать это через одно БПФ.

Покажем это, для чего рассмотрим комплексную функцию $f = U + iV$, где U и V – некоторые действительные функции. При преобразовании Фурье функции f получаем:

$$\begin{aligned}
\hat{f}(n_x, n_y) &= \hat{U}(n_x, n_y) + i\hat{V}(n_x, n_y) \\
&= (Re\hat{U}(n_x, n_y) + i Im\hat{U}(n_x, n_y)) + i(Re\hat{U}(n_x, n_y) + i Im\hat{V}(n_x, n_y)) \\
&= (Re\hat{U}(n_x, n_y) - Im\hat{V}(n_x, n_y)) + i(Im\hat{U}(n_x, n_y) + Re\hat{V}(n_x, n_y))
\end{aligned} \tag{6}$$

Учитывая свойства четности действительной части и нечетности мнимой части преобразования Фурье, описанные в первых двух равенствах системы (5), можем записать:

$$\begin{aligned}
Re\hat{f}(n_x, n_y) &= Re\hat{U}(n_x, n_y) - Im\hat{V}(n_x, n_y) \\
Re\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y) &= Re\hat{U}(n_x, n_y) + Im\hat{V}(n_x, n_y) \\
Im\hat{f}(n_x, n_y) &= Im\hat{U}(n_x, n_y) + Re\hat{V}(n_x, n_y)
\end{aligned} \tag{7}$$

$$Im\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y) = -Im\hat{U}(n_x, n_y) + Re\hat{V}(n_x, n_y)$$

Из приведенных четырех равенств можно вывести:

$$\begin{aligned}
Re U(n_x, n_y) &= \frac{Re\hat{f}(n_x, n_y) + Re\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y)}{2} \\
Im U(n_x, n_y) &= \frac{Im\hat{f}(n_x, n_y) - Im\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y)}{2} \\
Re V(n_x, n_y) &= \frac{Im\hat{f}(n_x, n_y) + Im\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y)}{2} \\
Im V(n_x, n_y) &= -\frac{Re\hat{f}(n_x, n_y) - Re\hat{f}(N_x - n_x, N_y - n_y)}{2}
\end{aligned} \tag{8}$$

Заменим функцию U на функцию ядра свертки g , которая описывает гравитационный эффект от одной ячейки, а функцию V на функцию σ – функцию распределения плотности:

$$f = \sigma + ig \tag{9}$$

Произведя лишь одно преобразование Фурье от функции f и используя равенства (8) становится возможным вычисление дискретных спектров последовательностей $\hat{g}$ и $\hat{\sigma}$. Этот шаг позволяет сократить время выполнения алгоритма за счет однократного использования прямого быстрого дискретного преобразования Фурье.

В численном виде гравитационный эффект прямоугольной призмы с единичной плотности выражается уравнением [3; 2]:

$$\begin{aligned}
g(x, y, 0) &= (\xi - x) \ln(\eta - y + r) + (\eta - y) \ln(\xi - x + r) \\
&\quad + \zeta \arctg\left(\frac{\zeta r}{(\xi - x)(\eta - y)}\right) \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2}
\end{aligned} \tag{10}$$

где $r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta)^2}$.

Все приведенные выше выкладки верны и для вычисления компонент аномального магнитного поля.

Компоненты аномального магнитного поля прямоугольной призмы можно записать [4, 9]:

$$X = V_1 I_x + V_2 I_y + V_3 I_z; \tag{11}$$

$$Y = V_2 I_x + V_4 I_y + V_5 I_z;$$

$$Z = V_3 I_x + V_5 I_y + V_6 I_z,$$

где I_x, I_y, I_z – компоненты намагниченности, коэффициенты $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} V_1 &= -\arctg \frac{\eta * \zeta}{\xi * r} \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \\ V_2 &= \ln(r + \zeta) \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \\ V_3 &= \ln(r + \eta) \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \\ V_4 &= -\arctg \frac{\xi * \zeta}{\eta * r} \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \\ V_5 &= \ln(r + \xi) \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \\ V_6 &= -\arctg \frac{\xi * \eta}{\zeta * r} \left| \frac{\xi_2}{\xi_1} \right| \left| \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \left| \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right| \end{aligned} \quad (12)$$

Пересчет поля в верхнее полупространство

В ряде случаев требуется узнать значения рассчитанного поля в точках наблюдения. Для получения значений в этих точках возможно произвести пересчет полученного поля вверх с нулевой поверхности в каждую точку заданной поверхности рельефа. Эта процедура для гравитационного поля и компонент магнитного поля выполняется на основании следующего интеграла Пуассона [6]:

$$g(x, y, h) = \frac{h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\xi, \eta, 0)}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta)^2]^{3/2}} d\xi d\eta \quad (13)$$

где $g(x, y, h)$ – гравитационный (магнитный) эффект на высоте h , а $g(\xi, \eta, 0)$ – рассчитанный гравитационный (магнитный) эффект на нулевом уровне. Этот интеграл представляет из себя интеграл типа свертки. Тем самым, можно использовать алгоритм быстрой дискретной свертки. Частотная характеристика продолжения в верхнее полупространство описывается уравнением [6]:

$$\begin{aligned} \hat{K}(n_x, n_y, 0) &= e^{-\omega h}, \\ \omega &= \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}, \quad \omega_x = \frac{2\pi}{N_x} n_x, \quad \omega_y = \frac{2\pi}{N_y} n_y \end{aligned} \quad (14)$$

Для восстановления сигнала в каждой точке рельефа требуется произвести обратное преобразование Фурье спектра гравитационного или магнитного эффекта, помноженного на соответствующие значения спектра оператора продолжения вверх (13). Используя свойства симметрии, которые описаны выше также, как и в предыдущем пункте возможно ускорить процесс вычисления.

Расчёт эффекта от масс, находящихся между нулевым уровнем и рельефом

В тех случаях, когда требуется узнать значения рассчитанного поля в точках наблюдения. В связи с тем, что слой с верхней кромкой рельефом и нижней кромкой нулевым уровнем не может быть представлен набором одинаковых призм, то невозможно использовать алгоритм быстрой дискретной свертки. Поэтому рассчитывается эффект в каждую точку сети от призмы, которая имеет верхнюю грань на уровне точки заданного рельефа, нижнюю грань на нулевом уровне, а боковые грани задаются границами ячеек сети.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Работы № 18-05-00127).

Список литературы

1. Булычев А.А. Методы обработки и интерпретации потенциальных полей на основе аппарата спектральных преобразований. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. М.: МГУ. – 1985. – 145 с.
2. Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций). М.: Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2010. – 164 с.
3. Гравиразведка, Справочник геофизика/ под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова, – М.: Недра – 1990. – 607 с.
4. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра. – 1979. – 351 с.
5. Мелихов В.Р. Устойчивая численная обработка и интерпретация гравимагнитных наблюдений на основе спектральных преобразований. // Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М.: МГУ. – 1988. – 438 с.
6. Миронов В.С. Курс гравиразведки. – Л.: «Недра». – 1980. – 543 с.
7. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки. – М.: «Радио и связь». – 1985. – 248 с.
8. Plouff D. Gravity and Magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. Geophysics – № 4. - vol. 41. – 1976 – pp 727-741

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кузнецов К.М. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, kirillkuz90@gmail.com),

Булычев А.А. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва),

Лыгин И.В. (МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва)

Аннотация: Рассмотрен эффективный алгоритм решения прямой задачи от объемного распределения плотности на сферической поверхности. Он основан на использовании быстрой дискретной свертки. Также рассмотрены особенности его программной реализации.

Ключевые слова: прямая задача, гравиразведка, быстрая дискретная свертка

Развитие технологий и накопление большого объема знаний о гравитационном поле позволяют решать различные задачи моделирования в рамках всей Земли и ее крупных регионов. Для решения таких задач необходимо использование эффективного вычислительного алгоритма расчета прямой задачи гравиметрии с учетом сферичности Земли.

Активный интерес к созданию таких алгоритмов и вычислительных программ появился еще в 70 - 80-х годах прошлого века [12; 13]. Один из подходов к решению прямой задачи гравиметрии на сферической поверхности был предложен в работах В.И. Старостенко и его коллег [8] и получил дальнейшее развитие в работах [5; 9; 11]. Он основан на аппроксимации гравитирующих масс набором прямоугольных «сферических» призм постоянной плотности.