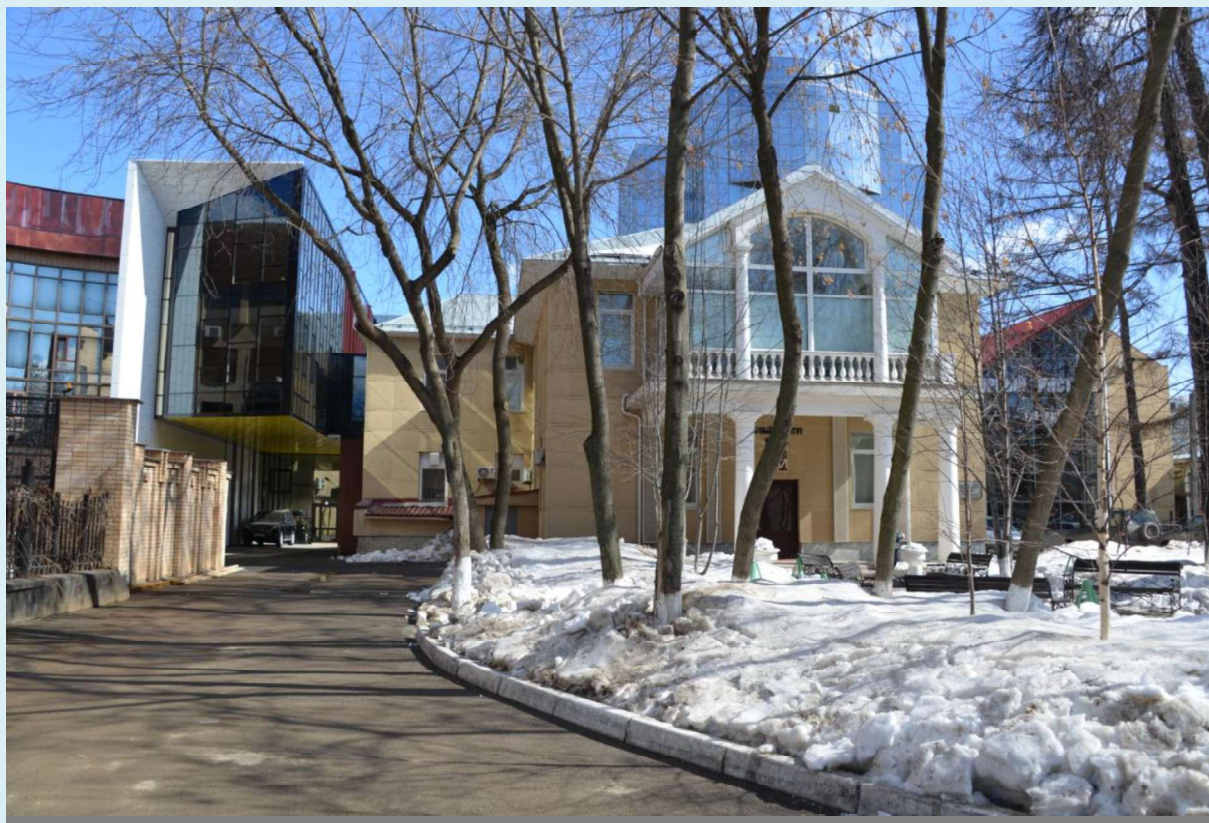




ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

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 алмазодобывающей 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 нефтегазодобываемости 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 мегаплатины (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

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.

Однако, выражение элементов гравитационного поля такой призмы не имеет конечного аналитического решения с помощью элементарных функций, что приводит к усложнению вычислительного алгоритма.

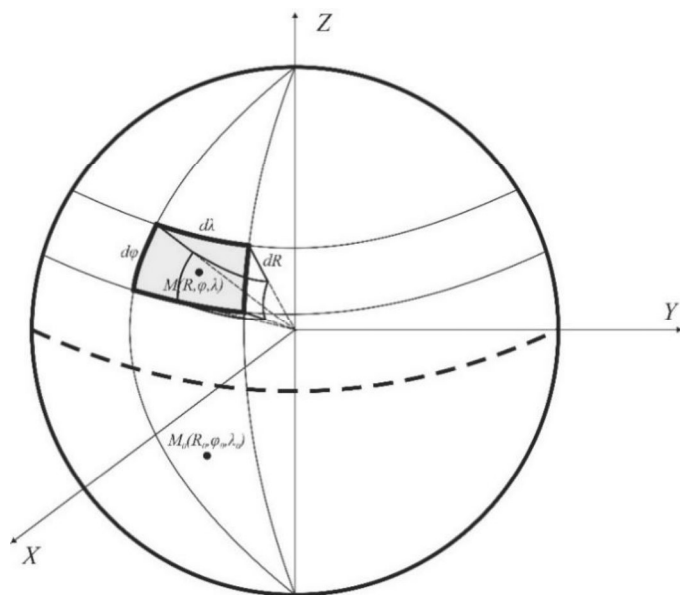


Рис.1. Расположение «сферической» призмы

расчете потенциала и силы притяжения на поверхности сферы радиусом R_0 (рис. 2). Информация об плотности задана в виде наборов сеточных файлов с постоянным шагом по широте $d\varphi$ и долготе $d\lambda$, на заданных глубинах. Каждый из таких слоев можно представить в виде набора многогранников каждая из которых имеет свою постоянную плотность. Размеры этих призм определяются их географическим положением и расстоянием от центра сферы.

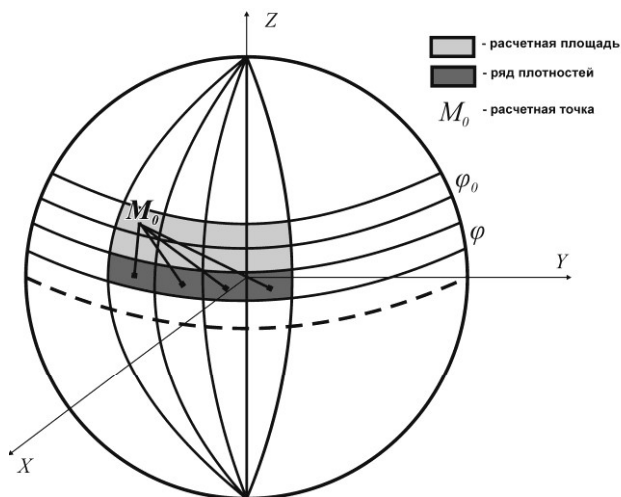


Рис.2. Взаимоотношение расчетных точек и широтных слоев на сфере

В работах [2, 7] был предложен алгоритм решения прямой задачи гравиметрии с учетом сферичности Земли, основанный на аппроксимации «сферической» призмы многогранником (рис. 1). Однако даже в этом случае расчет прямого гравитационного эффекта от слоя будет достаточно трудоемким и требовать значительных временных затрат, особенно для случая, когда необходимо рассчитать эффект слоя на всей сферической поверхности с равномерным шагом по широте и долготе. Значительно сократить вычислительное время возможно за счет применения алгоритма быстрой дискретной свертки на основе дискретного преобразования Фурье [3].

Рассмотрим вычислительный алгоритм более подробно. Задача состоит в

Стоит отметить, что в пределах одного широтного пояса все эти призмы одинаковы. Эти призмы можно аппроксимировать многогранниками, все грани которых представляют четырехугольные пластины. Верхняя и нижняя грани этих призм проходят через вершины соответственно внешней и внутренней поверхности сферической призмы.

Рассмотрим, каким образом можно представить элементы гравитационного поля, создаваемого многогранником с постоянной плотностью.

Потенциал многогранника связан с потенциалом грани:

$$V(M) = \frac{\sigma}{2} \sum_{q=1}^Q (\zeta^q - z^q) U_q(M), \quad (1)$$

где σ — плотность многогранника, Q — число его граней, $U_q(M)$ — потенциал притяжения q -ой грани с единичной поверхностной плотностью, ζ^q и z^q — координаты грани и расчетной точки в системе координат, связанной с q -ой гранью. В этой новой системе координат ось oZ^q сов-

падает с внешней нормалью грани n_q , а плоскость OX^qZ^q компланарна плоскости грани. Соответственно, $(\zeta^q - z^q)$ - высота точки наблюдения над плоскостью q -ой гранью многогранника.

Поле притяжения, создаваемое многогранником с постоянной плотностью, представляется следующим образом [4]:

$$\bar{g} = -\sigma \sum_{q=1}^Q 1\bar{n}_q U_q(M). \quad (2)$$

При решении прямой задачи на сфере необходимо вычислить проекцию вектора притяжения многогранника на радиус-вектор расчетной точки M :

$$g = -\sigma \sum_{q=1}^Q \cos(1r, 1\bar{n}_q) U_q(M); \quad (3)$$

Как видно из полученных соотношений, для вычисления аномального гравитационного потенциала и аномального поля силы притяжения необходимо уметь вычислять потенциал плоской пластины с распределенной по ней постоянной поверхностной плотностью σ_{Π} .

Вопрос аналитического представления потенциала притяжения многоугольной пластины с постоянной плотностью и алгоритм вычисления потенциала $U_q(M)$ рассматривался в работах [1; 4; 10].

Поскольку, как отмечалось ранее, в пределах одного широтного пояса все призмы одинаковы, то для этого случая предлагается алгоритм, основанный на использовании алгоритма быстрой дискретной свертки с использованием быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) [3, 7].

Опишем основные особенности рассматриваемого алгоритма.

Эффект от всего широтного пояса, состоящего из ячеек, аппроксимируемых многогранниками, в точке φ, λ будет определяться суммой влияния всех ячеек этого пояса в данную точку, т.е.:

$$u(\varphi, \lambda) = \sum_i u_{\varphi}(\lambda_i - \lambda) \cdot m(\lambda_i), \quad (4)$$

где u_{φ} - эффект ячейки с единичной плотностью (ядро свертки), m - плотность ячейки. Таким образом, гравитационный эффект широтного пояса описывается дискретной сверткой (рис. 1). Влияние всей сферы в расчетных точках на широте φ является суммой эффектов от каждого широтного пояса отдельно.

Алгоритм быстрой дискретной свертки основан на том, что расчет значений функции $u(\varphi, \lambda)$ по формуле (4) осуществляется через вычисление дискретных спектров функций $u_{\varphi}(\lambda_i)$ и $m(\lambda_i)$, их перемножении и вычислении обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Однако и эту процедуру можно оптимизировать, а именно, можно рассчитать значения ДПФ двух действительных функций (двух широтных рядов плотностей или двух ядер свертки) с помощью одного дискретного преобразования Фурье основываясь на четности действительной и нечетной мнимой частей спектров функций.

Ускорение вычислений также возможно за счет применения в качестве ядра свертки эффектов от более простых моделей. При удалении от расчетных точек сферическую призму можно аппроксимировать простой моделью точечного источника.

Перемножая спектр ядра свертки и спектр функции распределения плотности, рассчитывается спектр гравитационного эффекта от широтного пояса. Стоит отметить, что, основываясь на свойствах линейности преобразования Фурье, суммирование эффектов возможно произвести в частотной области.

Поскольку вычисления гравитационных эффектов от различных широтных рядов являются независимыми, то можно реализовать их параллельное вычисление на компьютерах с несколькими вычислительными ядрами. Такой подход позволяет в разы увеличить скорость расчётов без потери точности.

На рисунке 3 изображена блок-схема алгоритма вычисления эффекта от «сферического куба» плотностей.

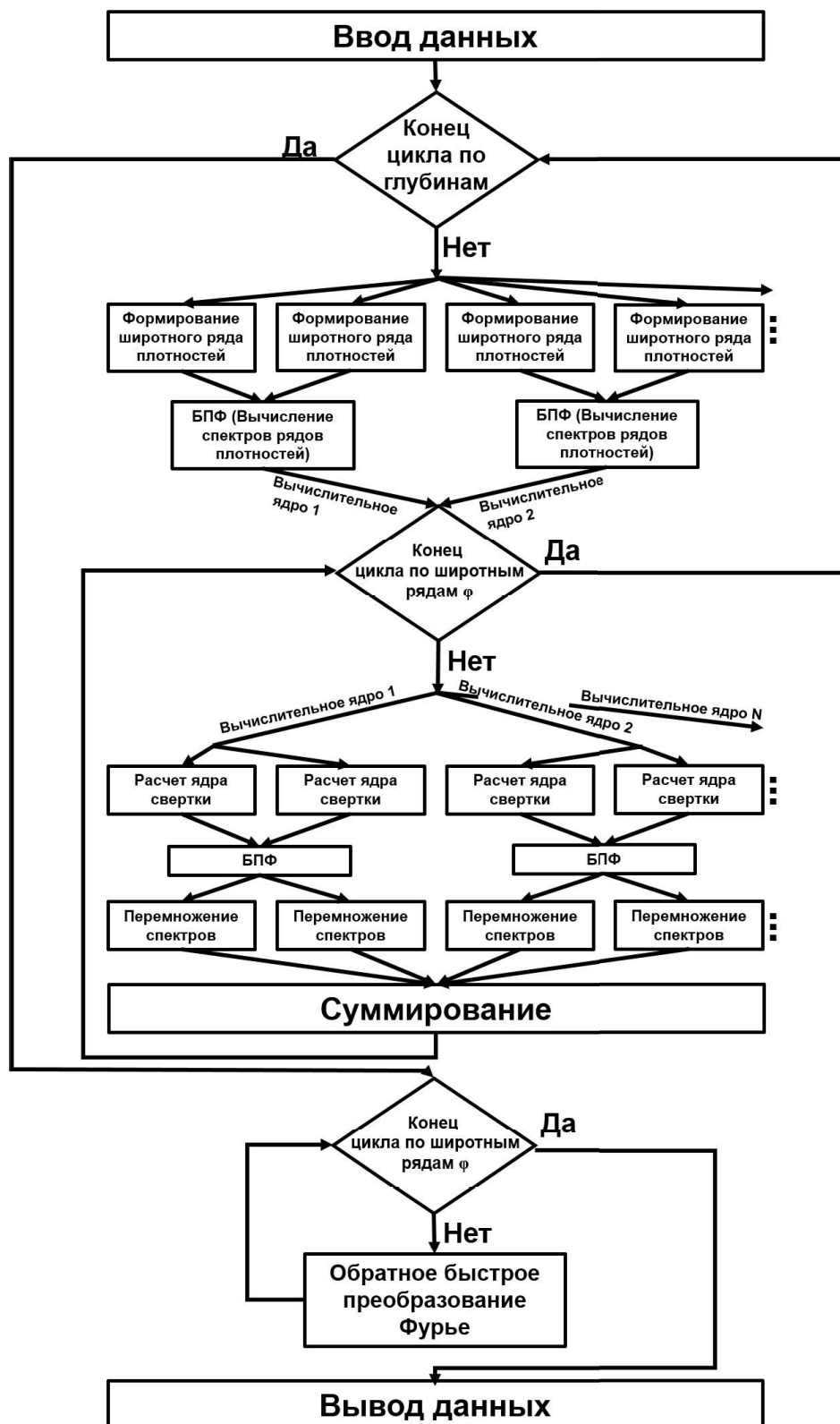


Рис.3. Блок-схема вычисления гравитационного эффекта от объемного распределения плотности на сфере

Для вычисления элементов притяжения сферической призмы производился перевод географических координат в декартову систему, где ось oZ направлена от центра сферы (Земли) к северному полюсу, ось oX образуется пересечением плоскости экватора и плоскости нулевого меридиана, а ось oY - пересечением экваториальной плоскости с плоскостью меридиана 90° в.д.

Расчет эффекта ведется послойно, последовательно рассчитывается эффект от каждого слоя ячеек, расположенных на одной глубине. Также стоит отметить, что поскольку гравитационный эффект убывает с расстоянием, то можно проводить расчеты в окне заданного радиуса, что позволяет сократить время вычисления при минимальных потерях точности.

В каждом таком слое последовательно рассчитывается гравитационный эффект от каждого широтного ряда на широте φ в точки на широте φ_0 .

Затем, путем перемножения двух полученных спектров, вычисляется спектр гравитационного эффекта. Результативные спектры эффектов в каждом широтном ряду суммируются. После, гравитационный эффект вычисляется путем обратного преобразования Фурье.

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

Список литературы

1. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий / М. МГГРУ. 2009. С. 48-58. (<http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf>).
2. Булычев А.А., Гилод Д.А., Кривошея К.В. Построение трехмерной плотностной модели литосферы океанов по полю высот геоида. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2002. №2. С. 40-47.
3. Булычев А.А., Кривошея К.В., Мелихов В.Р., Зальцман Р.В. Вычисление аномального гравитационного потенциала и его производных на сфере. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология 1998. Т.4. № 2. С. 42-46.
4. 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. (geophys.geol.msu.ru/STUDY/facultet/forward08_03_2011.pdf)
5. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь. УрО РАН. 2015. 142 с.
6. Геофизические поля и строение дна океанских котловин. Под редакцией Яценко В.В. / Ленинград. Наука. 1990. С. 66-79.
7. Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Булычев А.А. Алгоритм численного решения прямой задачи гравиметрии от сферического слоя переменной плотности. // Геофизика. 2017. №1. С. 22-27.
8. Старостенко В.И., Манукян А.Г., Заворотько А.Н. Методы решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии на шарообразных планетах. / Киев. Наукова думка. 1986. 112 с.
9. Старостенко В.И., Пятаков Ю.В. Решение прямых задач гравиметрии для сферических аппроксимирующих тел. Алгоритмы. // Изв.Томского политехн. Ун-та 2013. Т.322. №1. С. 28-34
10. Страхов В.Н., Лапина М.И. Прямые задачи гравиметрии и магнитометрии для однородных многогранников. // Геофиз. Журн. 1986. Т.8. №6. С. 20-31.
11. Хохлова В.В. Учет сферичности Земли при обработке гравиметрических данных. // Геофизика. №5. 2015. С. 59-64.
12. Hellinger S. J. A method for computing the geoid height contribution of three-dimensional bodies within a spherical earth. // Geophysics. 1983. Vol.48 № 12. p. 1664-1670.
13. Johnson L. R., Litehiser J. J. A Method for Computing the Gravitational Attraction of Three-Dimensional Bodies in a Spherical or Ellipsoidal Earth. // Geophysics. 1972. Vol. 77 № 35. p. 6999-7009.