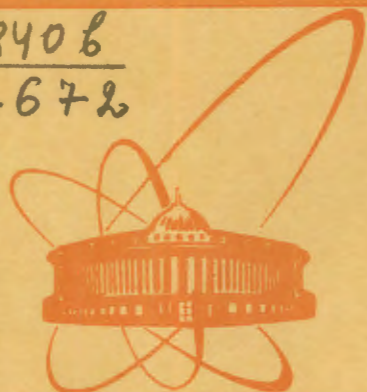


Ц8406
К-672



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

Ч963/2-79

3/12-79

10 - 12534

А.А.Корнейчук, О.К.Литвиненко

АЛГОРИТМЫ
ОБРАБОТКИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ФОРТРАНЕ

1979

10 - 12534

А.А.Корнейчук, О.К.Литвиненко

АЛГОРИТМЫ
ОБРАБОТКИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ФОРТРАНЕ

Объединенный институт
геофизических исследований
БИБЛИОТЕКА

Корнейчук А.А., Литвиненко О.К.

10 - 12534

Алгоритмы обработки гравиметрических данных
и их реализация на ФОРТРАНЕ

Описывается система программ на фортране для обработки данных измерения гравитационного поля земли, используемых для изучения строения земной коры и разведки полезных ископаемых. При обработке данных учитывается влияние ряда систематических инструментальных погрешностей, производится браковка измерений с грубыми погрешностями, усредняются многократные наблюдения для уменьшения влияния случайных погрешностей, находятся абсолютные значения силы тяжести по относительным измерениям путем решения переопределенной системы линейных алгебраических уравнений.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Kornejchuk A.A., Litvinenko O.K.

10 - 12534

FORTTRAN Programs for Earth Gravity Data
Handling

The system of FORTRAN programs for earth gravity data handling is described. These data are used to the earth-crust structure exploration and to the search of useful minerals. At data handling some systematic instrumental errors are taken into account, data with rough errors are rejected, results of repeated measurements are summed up to decrease the influence of random errors, and absolute values of earth gravity are calculated by the solution of overdetermined linear algebraic system.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Измерение гравитационного поля земли проводится *гравиметрами*, помещаемыми в заданные пункты наблюдений, расположенные на поверхности земли, как правило, нерегулярно. С помощью гравиметров измеряют *относительные* значения ускорения силы тяжести с точностью порядка 10^{-5} см/с⁻².

Последовательные наблюдения в ряде пунктов с одним и тем же прибором образуют *рейс*; рейс начинается и заканчивается в пунктах, в которых известны *абсолютные* значения силы тяжести /1,2/.

Для повышения точности наблюдения выполняются *многократно* несколькими гравиметрами.

Пункты с известными абсолютными значениями силы тяжести образуют *опорную сеть*, на которую опирается *рядовая сеть*. Наблюдения на рядовой сети выполняются с меньшей точностью, чем наблюдения опорной сети. Часто применяется методика наблюдений с большим чем 2 количеством уровней сети.

При обработке гравиметрических данных учитывается влияние ряда систематических инструментальных погрешностей /например, сползание начала отсчета гравиметра/, производится браковка измерений с грубыми погрешностями, усреднение многократных наблюдений для уменьшения влияния случайных погрешностей, нахождение абсолютных значений силы тяжести по относительным измерениям и вычисление аномальных значений.

Результатами математической обработки гравиметрических данных, обычно используемыми для решения обратной задачи /восстановления по гравитационным аномалиям структуры гравитирующих масс/, являются *аномальные значения силы тяжести*.

ли, получаемые из исходных гравиметрических данных после введения ряда поправок. Аномальные значения силы тяжести выдаются в виде таблиц /каталогов гравиметрических пунктов/ и изображаются в виде карт изолиний /карт аномалий силы тяжести/. Аномалии силы тяжести используются для изучения строения земной коры и поиска различных полезных ископаемых.

При создании системы обработки гравиметрических данных на современных ЭВМ можно выделить несколько последовательных этапов /задач/ обработки и поставить в соответствие каждому этапу обработки отдельную программу ^{3/}. В качестве языка программирования целесообразно выбрать фортран как наиболее распространенный и стандартизованный язык решения научно-технических задач с помощью ЭВМ ^{4,5/}.

В связи с тем, что вычислительные центры оснащены различными ЭВМ, возникает проблема функционирования системы программ обработки гравиметрических данных на машинах с различными операционными системами и различными техническими характеристиками /длина слова, диапазон представимых чисел/. Для того чтобы свести к минимуму и локализовать зависимость текста каждой программы на фортране, соответствующей этапу обработки, от марки ЭВМ, следует, во-первых, избегать использования диалектных особенностей фортрана и, во-вторых, выделять в каждой такой программе небольшую по объему *главную программу*, которая организует взаимодействие с операционной системой /например, задание номеров внешних устройств/ и обращается к машинно-независимой *основной подпрограмме*, которая и выполняет собственно обработку.

В описываемой системе программ передача данных от одной программы к другой осуществляется *посредством файлов с последовательной организацией* ^{6/}, что позволяет использовать физические носители информации различного типа /перфокарты, магнитные диски, магнитные ленты/. Файлы состоят из строк, записанных в едином формате. Это упрощает подготовку данных и обмен данными между программами.

Для того чтобы программы описываемой системы могли работать на ЭВМ с различным объемом оперативной памяти, алгоритмы обработки построены так, что в оперативной памяти /буфере/ присутствует только часть входных данных, а файл данных, если необходимо, просматривается многократно для заполнения буфера. Такой подход позволяет вести обработку

с меньшей скоростью при малом объеме оперативной памяти и с большей скоростью при большом объеме оперативной памяти за счет увеличения размера буфера и уменьшения числа просмотров файла данных.

При обработке больших объемов данных, полученных в результате наблюдений, немаловажной проблемой является выдача диагностических сообщений об ошибках в данных и о ненормальных ситуациях, возникающих в процессе обработки. Диагностика может быть нефатальной, когда процесс обработки не прекращается, а бракуется лишь часть данных, и фатальной, когда обработка прекращается.

Каждая программа имеет набор кратких диагностических сообщений, выдаваемых в том же формате, в котором записываются данные и результаты. Строка диагностического сообщения содержит признак сообщения /какой программой выдано/, условный номер сообщения и, если необходимо, дополнительную числовую информацию к сообщению. Предполагается, что подробная расшифровка диагностических сообщений может быть сделана специальной сервисной программой.

ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Программа первоначальной обработки наблюдений вычисляет приращения силы тяжести между соседними пунктами в рейсе. При этом учитываются индивидуальные параметры приборов и дрейф начала отсчета во времени. Каждый рейс обрабатывается независимо от других рейсов.

Исходными данными для программы являются следующие файлы.

1. *Файл данных рейсов*. Содержит номера приборов, с которыми проводились наблюдения в рейсах, даты рейсов, номера пунктов наблюдений, времена наблюдений, внутренние температуры приборов в моменты наблюдений, отсчеты по шкалам приборов.

2. *Файл параметров приборов*. Содержит номера приборов, цены делений приборов, максимально допустимые дрейфы начала отсчета в единицу времени.

3. *Файл абсолютных значений силы тяжести на опорной сети.* Содержит номера пунктов опорной сети и абсолютные значения силы тяжести в этих пунктах.

Первоначальная обработка наблюдения состоит в вычислении поправок к наблюдаемым относительным значениям силы тяжести. Основная работа программы сводится к анализу, контролю и браковке отдельных наблюдений, групп наблюдений в пределах рейса или же рейсов целиком. Выдаваемые программой диагностические сообщения фиксируют отсутствие или же избыток /приводящий к переполнению внутренних таблиц/ данных различных видов, выход ряда величин за заданные пределы, нарушение последовательности наблюдений в рейсах по времени, слишком большой дрейф начала отсчета прибора.

В результате первоначальной обработки рейсов получается файл, содержащий номера пар соседних пунктов в рейсе, разность значений силы тяжести для этих пунктов /приращения силы тяжести/ и разности времен наблюдений.

АНАЛИЗ И УСРЕДНЕНИЕ МНОГОКРАТНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Входными данными для программы анализа и усреднения многократных относительных измерений /контроля связей/ является файл результатов первоначальной обработки наблюдений. При просмотре этого файла отбираются приращения силы тяжести для одной и той же пары пунктов наблюдений /одноименные связи/, из которых составляется группа одноименных связей. По каждой группе одноименных связей производится усреднение, и отбрасываются те связи, приращения силы тяжести которых значительно отклоняются от среднего значения по группе.

Средние значения приращений, оставшиеся после отбраковки, переносятся в файл результатов.

Файл данных и файл результатов программы контроля связей имеют одинаковую структуру и содержат номера соседних пунктов рейса, разности значений силы тяжести в этих пунктах и разности времен наблюдения /для файла результатов - среднее арифметическое разностей времен наблюдения по группе одноименных связей/.

Диагностические сообщения программы контроля связей фиксируют отсутствие или слишком большое количество пунктов наблюдений в файле данных, а также несоответствие размеров рабочих полей оперативной памяти количественным характеристикам данных. Нефатальная диагностика информирует об отбракованных единичных связях или группах одноименных связей.

УРАВНИВАНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

После контроля связей получается сравнительно небольшое число абсолютных значений силы тяжести n , как правило, в несколько десятков раз большее число приращений - разностей значений силы тяжести для пары пунктов наблюдений. Используя эти приращения, можно передать известные абсолютные значения во все пункты сети, но результат передачи из-за погрешностей в наблюдениях будет зависеть от пути, по которому выполняется передача. Здесь возникает переопределенная система уравнений вида

$$\begin{aligned} s_{i_m} - s_{j_m} &= d_m, \quad m = 1, 2, \dots, M, \\ s_{k_n} &= a_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad /1/$$

где s_{ℓ} - искомые абсолютные значения силы тяжести, часть из которых /значения в пунктах опорной сети/ известны, d_m - приращения, M - количество приращений, N - количество известных абсолютных значений силы тяжести. При этом i_m, j_m, k_n не превосходят L , где L - количество пунктов наблюдений. Количество неизвестных равно $L - N$.

Система /1/ решается по методу наименьших квадратов, т.е. минимизируется суммарная невязка

$$\sum_{m=1}^M (s_{i_m} - s_{j_m} - d_m)^2. \quad /2/$$

Поскольку порядок линейной системы, дающей минимум функционала /2/, может составлять несколько сотен, применяется итерационный метод Зейделя^{11/}.

В процессе итераций производится анализ и браковка приращений, дающих слишком большой вклад в функционал /2/.

Исходными данными для программы уравнивания гравиметрических наблюдений являются следующие файлы.

1. *Файл абсолютных значений силы тяжести на опорной сети.* Содержит номера пунктов наблюдений и абсолютные значения силы тяжести в этих пунктах.

2. *Файл приращений.* Содержит номера пар пунктов и разности значений силы тяжести для этих пар пунктов.

Результатом уравнивания гравиметрических наблюдений является файл абсолютных значений силы тяжести в пунктах опорной и рядовой сети.

Программа выдает диагностические сообщения о фатальных ошибках /отсутствие либо избыток данных/, а также информирует о парах наблюдений, отбракованных в процессе уравнивания.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Файл геодезических данных содержит номера пунктов наблюдений, координаты пунктов наблюдений в проекции Гаусса-Крюгера^{8/} и высоты пунктов наблюдений над уровнем моря.

Файл гравиметрических данных содержит номера пунктов наблюдений и абсолютные значения силы тяжести.

Программа объединения геодезических и гравиметрических данных формирует файл координат и значений силы тяжести, содержащий номера пунктов наблюдений, геодезические координаты и абсолютные значения силы тяжести. Порядок следования пунктов наблюдений в файле результатов тот же, что и в файле геодезических данных.

Программа выдает диагностические сообщения о тех пунктах файла геодезических данных, которых нет в файле гравиметрических данных.

ВЫЧИСЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Входными данными для программы вычисления аномальных значений силы тяжести являются геодезические координаты и абсолютные значения силы тяжести. При вычислении аномаль-

ных значений силы тяжести учитываются высоты пунктов наблюдений над уровнем моря и плотность слоя между поверхностью земли и уровнем моря. Нормальное гравитационное поле земли вычисляется в предположении, что земля обладает постоянной плотностью и имеет некоторую аналитически заданную поверхность /геоид/^{9/}. Для вычисления нормального поля необходимо найти для каждого пункта наблюдения его географические координаты /широту и долготу/ по известным геодезическим координатам.

Результатом работы программы является файл аномальных значений, содержащий номера пунктов наблюдений, географические координаты, геодезические координаты, абсолютные значения силы тяжести, нормальные значения силы тяжести и ряд аномальных значений, вычисленных при различных предположениях о плотности слоя между поверхностью земли и уровнем моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени известен ряд систем обработки гравиметрических данных для ЭВМ 2-го поколения /БЭСМ-4 и Минск-22/: система^{10/}, реализованная в машинном коде БЭСМ-4; система^{9/} в машинном коде Минск-22 и система^{10/}, реализованная на алголе для БЭСМ-4 /транслятор ТА-2М/.

Описываемая в настоящей работе система является *машинно-независимой*. Она прошла первичную отладку на контрольных вариантах данных небольшого объема на ЭВМ CDC-6500 /операционная система NOS/BE 1/^{11,12/} и БЭСМ-6 /ОС "Дубна"/^{13/} в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, а также опытную эксплуатацию на данных модели высокоточной гравиметрической съемки /2200 наблюдений в 760 пунктах/ на ЭВМ ЕС1020 / (ДОС ЕС)^{14/}.

При создании системы программ обработки гравиметрических данных применялись методы структурного программирования^{15/} и подготовки программной документации с помощью ЭВМ^{16/}.

Для каждой программы, соответствующей этапу обработки данных, был подготовлен файл программной документации, со-

державший описание программы, текст программы, данные и результаты контрольного варианта. Описание программы включает в себя сведения о назначении программы, алгоритме ее работы, структуре файлов данных, результатов и диагностических сообщений, а также словарь обозначений в тексте программы. Текст программы имеет иерархическую блочную структуру, соответствующую постепенной детализации алгоритма при продвижении от главного блока к блокам низшего уровня.

Файл программной документации используется, во-первых, для выдачи его на АЦПУ CDC-6500 с помощью модифицированной версии программы^{/16/} в виде брошюры с автоматическим разбиением на страницы, выделением глав, параграфов, пунктов и абзацев и другими возможностями; во-вторых, для получения из иерархической блочной структуры с помощью специального препроцессора текста программы на фортране; в-третьих, для проверки правильности работы программы при ее модернизации и постановке на ЭВМ - по данным и результатам контрольного варианта.

Общий объем программной документации по данной системе - около 3000 строк, из которых одну треть составляют операторы фортрана и две трети - комментарии.

Авторы выражают благодарность Н.Н.Говоруну за интерес, проявленный к настоящей работе, и ее поддержку и Н.Ю.Шириковой за предоставление модифицированной версии программы^{/16/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник геофизика, т. 5. Гравиразведка. "Недра", М., 1968.
2. Сорокин Л.В. Гравиметрия и гравиметрическая разведка. Госгостехиздат. М.-Л., 1953.
3. Литвиненко О.К. и др. Автоматизированная система обработки и интерпретации результатов гравиметрических наблюдений. "Недра", М., 1973.
4. Карпов В.Я. Алгоритмический язык фортран /фортран-Дубна/. "Наука", М., 1976.

5. Салтыков А.И., Макаренко Г.И. Программирование на языке фортран. "Наука", М., 1977.
6. Пеледов Г.В., Райков Л.Д. Введение в ОС ЕС ЭВМ. "Статистика", М., 1977.
7. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. т. 2, Физматгиз, М., 1960.
8. Закасов П.С. Курс высшей геодезии. "Недра", М., 1978.
9. Старосенко В.И. и др. Автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии. "Наукова думка", Киев, 1972.
10. Болдырева В.А. и др. Автоматизированный комплекс обработки гравиметрических измерений. "Недра", М., 1976.
11. NOS/BE Reference Manual. Control Data Corporation Publication No. 60493800. 1977.
12. Ширикова Н.Ю. ОИЯИ, P11-11739, Дубна, 1978.
13. Мазный Г.Л. Программирование на БЭСМ-6 в системе "Дубна", "Наука", М., 1978.
14. Битель Ю.Ю. и др. Операционная система ДОС ЕС. Справочник. "Статистика", М., 1977.
15. Дал У., Дейкстра Э., Хоор К. Структурное программирование. "Мир", М., 1975.
16. Gage B. Text Formatting Program (BARB). CERN Program Library, Q500.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 июня 1979 года.