

разработанного программного кода для расчета распространения излучения в средах со сложной геометрией позволит в перспективе эффективно использовать его как для моделирования работы различных систем оптической биомедицинской диагностики, так и для планирования лучевой терапии.

Авторы выражают благодарность Меерову Иосифу Борисовичу и Донченко Роману. Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», проект № 02.740.11.0839.

Список литературы

1. LihongWang, Steven L. Jacques. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered Tissues in Standard C.1992.
2. Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК Пресс, 2010.
3. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. – М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.

¹П.И. Балк, ²А.Г. Деменев, ²А.С. Долгаль,

²О.В. Леденцов, ³А.В. Мичурин

¹Германия, г. Берлин

²Пермский государственный университет

³Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ

Попытки в 60–70-х годах использовать методы линейного (в том числе и целочисленного) программирования при решении нелинейной обратной задачи гравиметрии (ОЗГ) по оценке геометрии области, занятой массами известной (постоянной) плотности, не увенчались успехом. Причиной тому была плохая со-

вместимость сеточных моделей и классических методов минимизации в вопросах учета разнообразной априорной информации. В 70-х годах отечественными геофизиками проводились масштабные исследования по поиску наиболее эффективных (среди известных) методов решения условно-экстремальных задач для целей минимизации невязки в процессе подбора допустимых решений нелинейной обратной задачи в различных модельных классах, отличных от сеточных. Но отыскать подходящий на все случаи алгоритм (или хотя бы четко очертить классы интерпретационных моделей, для которых оптимальным является тот или иной метод минимизации) так и не удалось [1]. Поэтому обозначилась необходимость разработки проблемно ориентированных методов минимизации, жестко привязанных к специфике обратных задач гравиметрии и магнитометрии.

В работах А.В. Овчаренко [2] и В.Н. Страхова [3] (в соавторстве с М.И. Лапиной) предлагался, по существу, новый принцип структурирования итерационного процесса подбора допустимого решения нелинейной ОЗГ в сеточных классах источников поля, обеспечивающий удобный контроль за соблюдением требования связности и односвязности подобранного приближения к неизвестному носителю аномалиеобразующих масс. В.Н. Страхов предложил называть его монтажным. Конструктивно этот принцип был реализован им в алгоритме регулируемой направленной кристаллизации (РНК). В последующем различные аспекты монтажных алгоритмов затрагивались в работах И.И. Корчагина, У. Шеффера, Т.В. Балк, А.С. Долгалея [4, 5]. В цикле работ П.И. Балка метод РНК был обобщен, а сам монтажный подход распространен на постановки обратных задач магнитометрии, случай многосвязной аномалиеобразующей среды с различными значениями плотностей парциальных источников, на задачи совместной интерпретации различных компонент гравитационного и магнитного полей, случай смешанной структурно-рудной задачи.

В этой работе рассматривается метод оценки достоверности решения нелинейной обратной задачи гравиметрии (ОЗГ) на основе гарантированного подхода, позволяющего выделять области геологического пространства, заведомо содержащие ано-

маниеобразующие объекты. Развитие гарантированного подхода к интерпретации поля силы тяжести во многом обусловлено возросшими потребностями геофизической отрасли в оперативной интерпретации больших объемов цифровых данных и тесно связано с возросшими вычислительными возможностями компьютеров. Необходимость применения высокопроизводительных вычислений для решения крупномасштабных задач наблюдается даже в 2D, а тем более в 3D-варианте.

Теория и метод. В самых общих чертах рассматриваемый метод оценки достоверности решения нелинейной обратной задачи гравиметрии (ОЗГ) представляет собой двухуровневый итерационный процесс, во внутреннем цикле которого производятся эффективные (с точки зрения решения основной проблемы) допустимые решения ОЗГ, а во внешнем – осуществляется корректировка текущих приближений D_1^* и D_2^* к искомым областям D_1 и D_2 , первая из которых содержит аномальные массы, заключенные в неизвестном объеме S^T , а другая целиком заполнена фрагментами аномальных масс: $D_2 \subset S^T \subset D_1$. Если априорная информация содержит (как это всегда и бывает на практике) неопределенность, то итерационный процесс становится трехуровневым, в самом внешнем цикле которого осуществляется переход к все более размытым априорным представлениям о параметрах интерпретационной модели, вносящих указанную неопределенность. Платой за усложнение вычислительного процесса является возможность упорядочения отдельных подобластей из D_1 по вероятности обнаружения в их пределах источников гравитационной аномалии.

Центральное место в технологиях построения пары $\langle D_1, D_2 \rangle$ занимает собственно алгоритм построения отдельных допустимых решений. От него требуется не только высокая эффективность по быстродействию, но и способность вырабатывать «особые» допустимые решения, небольшое число которых могло бы составить некое репрезентативное подмножество, коллективно обладающее теми же свойствами, что и все множество допустимых решений (являющееся, вообще говоря, бесконеч-

ным). В плане обеспечения приемлемого времени построения отдельно взятого допустимого решения весьма желательно, чтобы алгоритм допускал распараллеливание процесса вычислений, обеспечивающее возможность для использования многопроцессорной вычислительной техники.

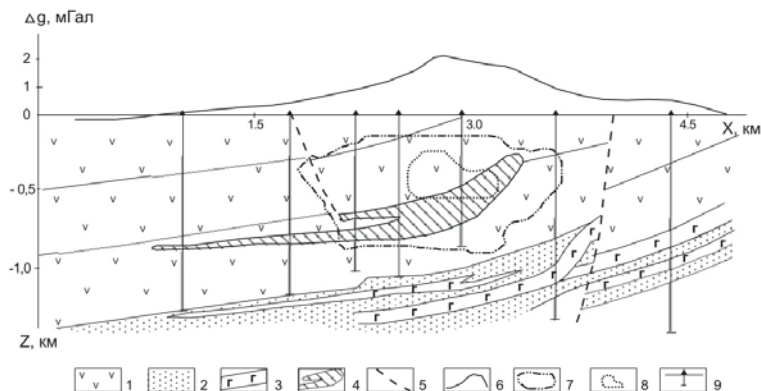


Рис. 1. Результаты интерпретации поля Δg месторождения «Норильск-1»:

1 – породы туфовой толщи; 2 – отложения тунгусской серии; 3 – силлы габро-долеритов; 4 – рудоносная интрузия; 5 – дизъюнктивные нарушения; 6 – локальная составляющая наблюдаемого поля Δg ;

7 – контур области D_1 , содержащей все источники локальной аномалии Δg ; 8 – контур области D_2 , гарантированно содержащей фрагмент аномалиеобразующего объекта; 9 – буровые скважины

Пример применения метода. На рис. 1 приведены результаты решения ОЗГ по данным крупномасштабной гравиметрической съемки, выполненной над месторождением платино-медно-никелевых руд «Норильск-1». В основу модели среды положены следующие допущения: аномалия в основном обусловлена рудоносной интрузией базит-гипербазитового состава, ее избыточная плотность (по отношению к вмещающим породам трапповой формации) составляет 0,2 г/см. С помощью монтажного метода при различных центрах кристаллизации (начальных приближениях) было построено около 400 различных вариантов пространственных распределений масс, удовлетво-

ряющих априорным допущениям. Их синтез позволил выделить область D_2 (рис. 1, контур 8), с высокой степенью достоверности принадлежащую источнику аномалии при предполагаемом уровне помех $\varepsilon = \pm 0,15$ мГал.

Программная реализация и распараллеливание. Представленный подход решения обратной задачи гравиметрии и оценки достоверности результатов ее количественной интерпретации до недавнего времени был программно реализован с использованием системы объектно ориентированного программирования Delphi 7.0 для Windows. Время последовательного счета даже в 2D-варианте с использованием одного процессора типа Intel Core составляет при 100–150 точках задания поля и всего одном возмущающем объекте более часа, а в отдельных случаях (при сложных задачах) – и сутки.

При сжатых сроках выполнения работ требуется применение высокопроизводительных вычислений для решения крупномасштабных задач даже в 2D, а тем более 3D-варианте. На высокопроизводительных многопроцессорных системах Linux установлен значительно чаще, чем Windows. Поэтому важно было обеспечить возможность использования компьютеров с различными операционными системами. Была создана переносимая программная реализация алгоритма оценки достоверности решения ОЗГ в 2D-варианте. Для этой цели использовался кроссплатформенный компилятор FreePascal Compiler и совместимая с ним среда разработки Lazarus.

Решено было использовать распределенные вычисления, которые обычно эффективны для решения вычислительносложных задач, не требующих интенсивного обмена информацией между параллельными подзадачами. Для реализации этих вычислений могут быть использованы средства распределенной вычислительной инфраструктуры программы «Университетский кластер» («УК»)[6]. Участие в этой Программе принимают несколько институтов РАН и многие российские вузы, в том числе и Пермский госуниверситет. Parallel Compute: MPI-сервис уровня инфраструктуры программы «УК», который обеспечивает

разработку и выполнение MPI-программ для вычислительных систем с распределенной памятью. Поэтому предложена схема распараллеливания вышеуказанной программы на основе MPI.

Одной из характеристик эффективности параллельного алгоритма является ускорение – отношение между временем выполнения задания с данными размера m асимптотически оптимальным последовательным алгоритмом и временем выполнения того же задания параллельным алгоритмом на машине с p -процессорами. Для априорной оценки ускорения применена сетевая формула Амдала [7], которая учитывает потери времени на межпроцессорный обмен данными в параллельном приложении.

$$S_p(m) = \frac{1}{D + f + (1 - f) / p},$$

где $f = f(n)$ – доля последовательных операций, $D = D_{alg} D_{tech}$ – коэффициент сетевой деградации. При этом D_{alg} определяет алгоритмическую составляющую коэффициента деградации, обусловленную свойствами алгоритма, а D_{tech} – техническую составляющую, зависящую от соотношения технического быстродействия процессора и аппаратуры сети. Далее, $D_{alg} = W_{comm} / W_{comp}$, где W_{comm} – количество операций передачи данных, а W_{comp} – количество вычислительных операций. $D_{tech} = t_{comm} / t_{comp}$, где t_{comm} – среднее время выполнения одной операции передачи данных, t_{comp} – среднее время одной вычислительной операции.

Рассмотрена типичная 2D-задача размером $m = 19200$ монтажных элементов. Оценено соответствующее типичное соотношение последовательной и параллельной части алгоритма $f = 2,8 \cdot 10^{-5}$. На учебном вычислительном кластере компьютерного центра механико-математического факультета ПГУ оценен соответствующий коэффициент сетевой деградации $D = p \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}$. Оценка показывает, что применение высокопроизводительных вычислительных кластеров позволяет кардинально

снизить время расчета. В результате распараллеливания программы время счета удается существенно сократить (в примере до 340 раз). Дальнейшее увеличение количества вычислительных ядер (процессоров) сверх оптимального (в примере – 512) лишь замедляет работу программы, так как накладные расходы на передачу информации между процессорами кластера начинают превосходить выигрыш за счет распараллеливания (рис. 2).

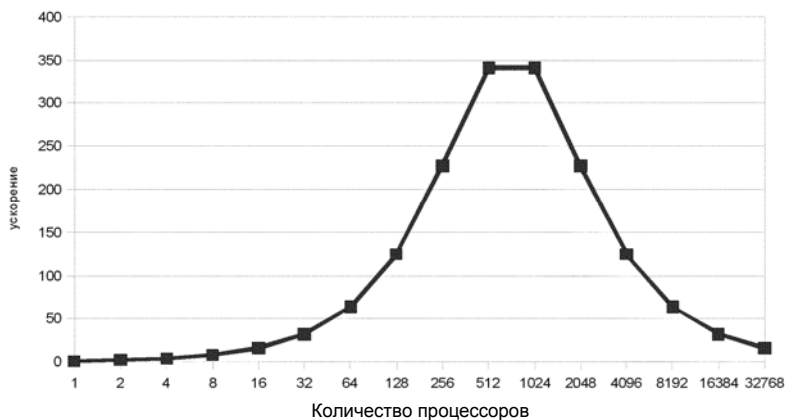


Рис. 2. Зависимость ускорения от числа вычислительных ядер (процессоров)

Создана переносимая программная реализация алгоритма оценки достоверности решения ОЗГ в 2D-варианте. Предложена схема распараллеливания вышеуказанной программы на основе MPI. Априорная оценка ускорения с помощью сетевой формулы Амдала показывает, что применение высокопроизводительных вычислительных кластеров позволяет кардинально снизить время расчета. Оценка достоверности результатов количественной интерпретации в терминах пары множеств D_1, D_2 может существенно повысить вероятность вскрытия искомых аномалиеобразующих объектов в заданных интервалах глубин поисковыми и разведочными скважинами, рекомендованными по гравиметрическим данным. Актуальным в области гарантированного подхода будет проведение исследований по следующим направлениям:

1. Параллельные реализации предложенного способа для 3D-задач.

2. Разработка алгоритма монтажного метода в модификации регулируемой направленной раскристаллизации для 2D- и 3D-задач.

3. Проектирование и реализация в инфраструктуре программы «Университетский кластер» проблемно ориентированного веб-сервиса для автоматизации интерпретации результатов гравиметрии.

Работа поддержана в рамках проекта «Развитие центра коллективного пользования высокопроизводительными вычислительными ресурсами» Программы развития национального исследовательского университета ПГУ.

Список литературы

1. Гольдшмидт В.И. Оптимизация процесса количественной интерпретации данных гравиразведки. – М.: Недра, 1984. – 184 с.

2. Овчаренко А.В. Подбор сечения двухмерного тела по гравитационному полю. Вопросы нефтяной и рудной геофизики. – Алма-Ата, 1975. Вып. 2. – С. 71–75.

3. Страхов В.Н., Лапина М.И. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 227, № 2. – С. 344–347.

4. Балк П.И. Использование априорной информации о топологических особенностях источников поля при решении обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. – 1989. – № 5. – С. 1082–1084.

5. Балк П.И. Долгаль А.С., Балк Т.В. Сеточные модели плотностной среды и опыт их применения при прослеживании дифференцированных интрузий по данным гравиразведки // Геология и геофизика. – 1993. – № 5. – С. 127–134.

6. Программа «Университетский кластер». – URL: <http://www.unicluster.ru>.

7. Деменев А.Г. Анализ параллельных вычислительных алгоритмов: учеб.-метод. пособие; Перм. ун-т. – Пермь, 2007. – 43 с.