

## Малоглубинная геофизика

### Методы улучшения интерпретации микрогравитационных аномалий в городских регионах. Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas

Gabriella Castiello,<sup>1\*</sup> Giovanni Florio,<sup>2</sup> Marino Grimaldi<sup>2</sup> и Maurizio Fedi<sup>2</sup> описывают микрогравиметрические исследования подповерхностных пустот (полостей) в городских условиях Неаполя, привлекая внимание к тщательности, требуемой при проведении съемки и обработке данных для получения оптимальных результатов.

Микрогравиметрические съемки в городских районах требуют очень тщательного приобретения и обработки данных. Гравитационные аномалии, будучи типичными низкоамплитудными аномалиями, нуждаются в улучшенных и устойчивых методах фильтрации и интерпретации для сохранения информации, связанной с источником. Микрогравиметрическая съемка была выполнена в городе Cardito, Италия, вдоль профиля, пересекающего известную пустоту (полость). По этим данным мы опробовали процедуры для локальной фильтрации, основанной на вейвлет-преобразовании, и процедуры для устойчивой интерпретации, основанной на многоуровневых (многомасштабных) методах. Чтобы рассчитать аномалию Буге, мы особенно уделите удалению гравитационного эффекта от строений, находящихся вблизи пунктов измерения. Строения были детально промоделированы с помощью модели призм. Чтобы понизить уровень шума в данных вблизи пустоты и предоставить большую эффективность, чем классическая фильтрация по волновым числам в Фурье области, была использована локальная фильтрация, основанная на дискретном вейвлет-преобразовании (DWT), существенно не меняющая градиент аномалии. Многоуровневые методы оптимальным способом соединяют устойчивость и разрешающую способность. Методы с высокой разрешающей способностью, такие как многоосевая деконволюция Эйлера и определение глубины по точкам экстремума (DEXP), дают согласующиеся результаты относительно глубины и формы источника в хорошем соответствии с действительным положением и формой пустоты.

#### Описание съемки и корректировка данных

Микрогравиметрическая съемка покрыла площадь над древней полостью, созданной в прошлом при добыче пород, использованных для возведения зданий (рисунок 1). Пустота, приведенная на рисунке 2, выработана в коренных породах, представленных вулканическими туфами, (Gray Campanian Tuff), на глубине от 12 до 20 м под пешеходной зоной. Разделенная на два участка она занимает площадь около 324 м<sup>2</sup>. Пустота имеет шесть вертикальных скважин, которые обеспечивают связь с поверхностью; эти скважины имеют квадратное сечение со сторонами в 1-2 м. Вплоть до первых 12 метров скважины пробурены в нецементированных породах, залегающих на коренных породах, представленных вулканическим туфом. Такие породы составляют культурный слой почвы и свободны от пирокластических продуктов вулкана Phlegrean.

#### Получение данных

Гравиметрические данные были получены вдоль профиля длиной 119.5 м, почти перпендикулярного протяжению полости. Вдоль этого профиля мы провели съемку по 61 пунктам с помощью гравиметра CG-5. Шаг по профилю составил 1.5 м на первых 61.5 м недалеко от пустоты и 3 м на остальной части профиля. Повторные измерения выполнялись на опорном пункте приблизительно через 1 час 15 минут, чтобы учесть поправку за сползание нуля-пункта. На каждом пункте накапливалось, по крайней мере, по три значения; каждое измерение продолжалось 60 секунд. В некоторых случаях, когда измерения проводились на проезжей части дороги, из-за помех, связанных с движением автомобильного транспорта, количество записей увеличивалось до 6-9, пока стабильность измерения не становилась удовлетворительной. Стабильность считалась удовлетворительной, если расхождение между записями на пункте не превышало 5μГал. Одновременно была проведена топографическая съемка, измеряющая различия в высотах на каждом пункте, с нивелир-автоматом Wild NA-2 с плоскопараллельным микрометром и трехметровой стойкой Invar. Невязка при уравнивании не превышала 1 мм.

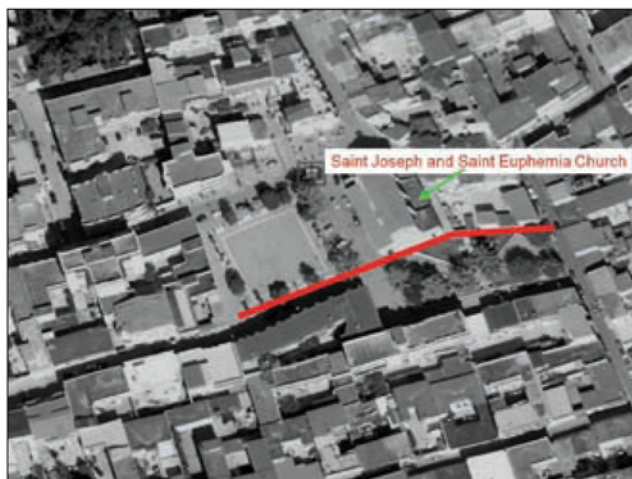


Рисунок 1 Город Cardito. Красная линия представляет профиль, выбранный для проведения микрогравиметрической съемки.

<sup>1</sup> C.I.R.A.M., University of Naples 'Federico II'.

<sup>2</sup> Earth Science Department, University of Naples 'Federico II'.

\* Автор-корреспондент, E-mail: gabriella.castiello@unina.it

## Малоглубинная геофизика

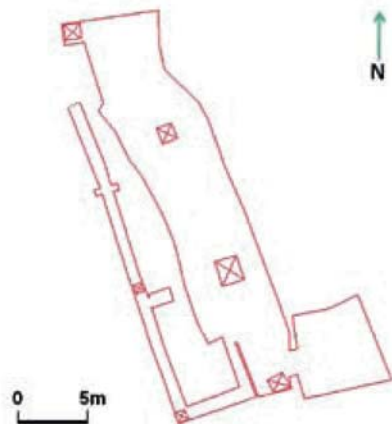


Рисунок 2 План полости.

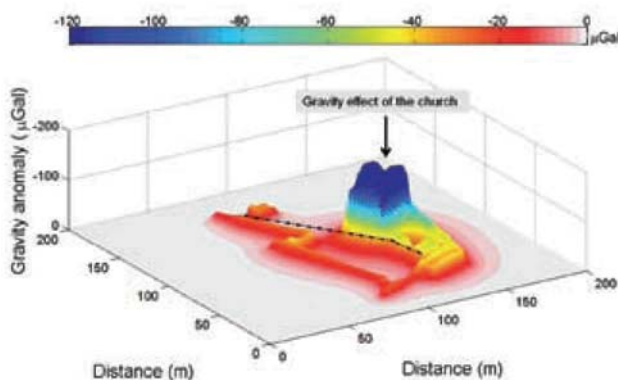


Рисунок 3 Гравитационное поле, создаваемое зданиями, расположенными вблизи гравитационного профиля (показанного пунктирной черной линией). Здания были смоделированы 64-ю призмами, представляющими основные стены; выбранное значение плотности составило  $1700 \text{ кг/м}^3$ .

**Обработка данных**

Данные были исправлены за приливно-отливные эффекты и сползание нуля-пункта прибора. Позже с помощью высоты каждого пункта в измерения были введены поправка за свободный воздух и полная поправка Буге (промежуточный слой+рельеф). Из-за небольшого размера площади съемки и ровного окружающего рельефа полная поправка Буге была рассчитана по методу Тальвани (1959), моделирующему гравитационный эффект от масс между рельефом поверхности наблюдения вплоть до низкой высоты, а именно 1.16 м под произвольным нулевым уровнем. Эта поправка требует соответствующего значения плотности. В нашем случае выбор корректной плотности был основан на стратиграфических данных по скважине, пробуренной недалеко от площади съемки.

В действительности присутствие зданий вблизи профиля, а также двух подвалов на обоих концах профиля, представляет основное «топографическое» возмущение на площади съемки. Таким образом, кроме вычисления стандартной аномалии Буге, нам необходимо было рассчитать поправку за гравитационный эффект от зданий и подвалов. Главные стены зданий были смоделированы 64-ю призмами, а их гравитационный эффект рассчитан (рисунок 3) с помощью скачка плотностей в  $1700 \text{ кг/м}^3$  (стены обычно сложены из того же вулканического туфа, лежащего на некоторой глубине на площади). Толщина каждой стены составила 0.6 м, кроме внешних стен церкви, толщина которых составила 1 м.

Из рисунка 3 ясно, что сильный гравитационный эффект создается церковью. Он существенно влияет на данные, измеренные вдоль профиля на отрезке от 18 до 36 м (рисунок 4), определяя гравитационный минимум с амплитудой более  $-50 \text{ μGal}$ . Минимальные эффекты, порядка  $15\text{-}20 \text{ μGal}$  создаются остальными зданиями и подвалами.

На рисунке 5 мы сопоставили гравитационную аномалию, созданную синтетической моделью пустоты, с конечной аномалией Буге, исправленной за влияние здания и подвалов. Сопоставление двух кривых удовлетворительное (после введения поправки за постоянную величину), и это является показателем, в целом, хорошего качества принятой процедуры поправок, в частности выбора плотностей для поправки за рельеф и при моделировании зданий.

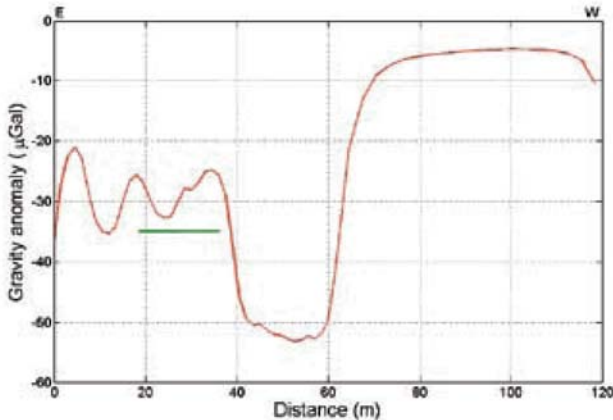
Кроме помех с высоким волновым числом, основное различие между двумя кривыми может быть отмечено к западу от известной пустоты на участке профиля  $42 < x < 55 \text{ м}$ , ориентировочно связанное с церковью, где существует другой относительный гравитационный минимум, наложенный на главный тренд возрастания значений в западном направлении. Этот минимум может быть обусловлен некорректным моделированием гравитационного эффекта церкви. Однако мы пересчитали гравитационное поле, создаваемое церковью, дополнительно смоделировав вспомогательные внутренние стены и изменив плотность стен. Эти изменения не повлияли существенно на форму и положение гравитационного минимума, поэтому наша интерпретация заключается в том, что эта аномалия может быть обусловлена фактическим локальным изменением плотности под землей и, возможно, дополнительной неизвестной камерой. Эта камера может располагаться под церковью, но это предположение, как оказалось, противоречит информации об истории здания и его архитектуре, поэтому мы можем предположить, что камера располагается под дорогой перед церковью. Безусловно, имея только один профиль, секущий эту аномалию, мы не можем дать какую-либо количественную интерпретацию этой аномалии.

**Ограниченная фильтрация**

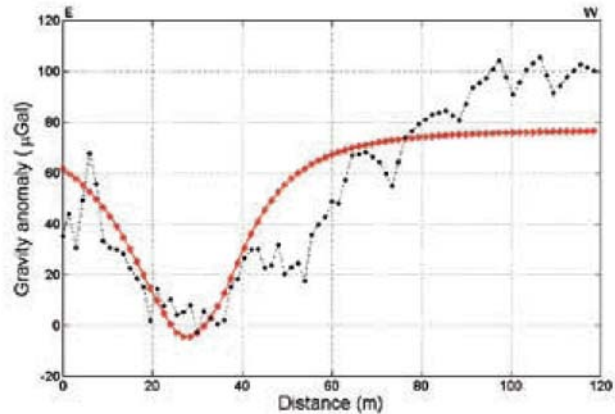
Как уже говорилось, аномалия Буге (рисунок 5) имеет некоторые возмущающие осцилляции с высоким волновым числом, которые связаны либо с малоглубинными геологическими неоднородностями, либо с процедурами измерения и обработки данных. Перед интерпретацией данных необходимо уменьшить эту помеху. На первый взгляд это может быть легко выполнено с помощью стандартной низкочастотной фильтрации, рассчитанной в Фурье области (например, Oppenheim and Schaffer, 1975). В то же время такое уменьшение помехи должно по возможности сохранять форму аномалий, связанных с пустотами. Посредством фильтрации в Фурье области мы способны выполнить только общее сглаживание: частотные компоненты, которые должны быть удалены, не являются локально адаптированными, ибо они установлены по спектральному анализу, отнесенному ко всему профилю. Таким образом, Фурье фильтрация может исказить форму аномалии, будучи эффективной в некоторых частях профиля, но наоборот, меняя градиент аномалий в другом месте. Это плохое выполнение влияет на результаты интерпретации, обычно увеличивая оцениваемые глубины.

Чтобы избежать это, мы выбрали программу локализованного фильтра дискретного вейвлет преобразования (Fedi and Quarta, 1998). Таким способом мы определили компоненты, которые должны быть локально удалены, например, только те, которые связаны с зонами минимума, относящегося к пустотам, где присутствуют осцилляции поля до  $10 \text{ μGal}$ . Вейвлет преобразование гораздо более гибкое, чем Фурье преобразование. Оно

Малоглубинная геофизика



**Рисунок 4** Гравитационный эффект от зданий и подвалов вдоль профиля измерения. Зеленый отрезок показывает местоположение полости.



**Рисунок 5** Сопоставление между аномалией Буге (черный цвет) и синтетической аномалией (красный цвет). Вдоль профиля очевидны некоторые аномалии с высоким волновым числом (помеха).

особенно полезно при анализе нестационарных или коэффициенты вейвлета, включенные в область, переходных аномалий, при изучении аномалий в различных определенных уровнями (-6, -5 и -4) и положениями  $15 < x < 40$  масштабах, или при определении очень локальных м (рисунок 6).

особенностей, таких как сингулярность (Mallat, 1989). Теоретически, Фурье преобразование представляет Исходный сигнал и выбранное для локализованной разложение сигнала в ряд функций синусов и косинусов, фильтрации окно. б) Анализ с переменной разрешающей характеризующих различными амплитудами, частотой и способностью аномалии и с) фильтрованного сигнала (в фазой, но не длительно локализованных; при вейвлет выбранном окне три коэффициента трех самых маленьких преобразовании аномалия вместо этого разлагается в ряд уровней равны нулю).

масштабированных и преобразованных вариантов первоначального вейвлета, называемого материнским вейвлетом, который является компактным, имеет нулевое значение и является пространственно локализованной. По сравнению с Фурье преобразованием вейвлет анализ не является фиксированным, а выбирается по статистическому или детерминистскому критерию.

Для целей фильтрации удобно использовать дискретное вейвлет преобразование, которое уменьшает ряд степеней до степени два (двоичный уровень  $2^m$ ) и позицию вейвлета на  $n \cdot 2^m$  позиций. Аномалия может быть восстановлена следующим образом:

$$f(x) = \sum_m \sum_n D_{m,n} \Psi_{m,n}(x) \quad (1)$$

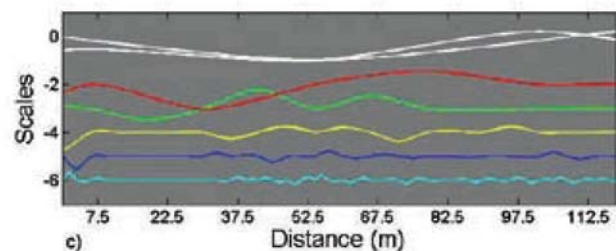
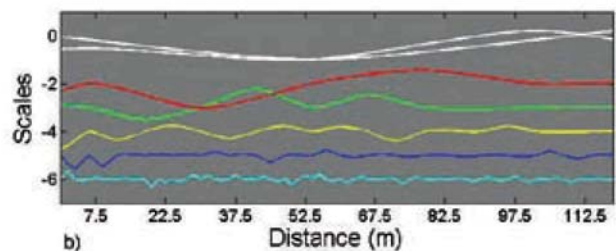
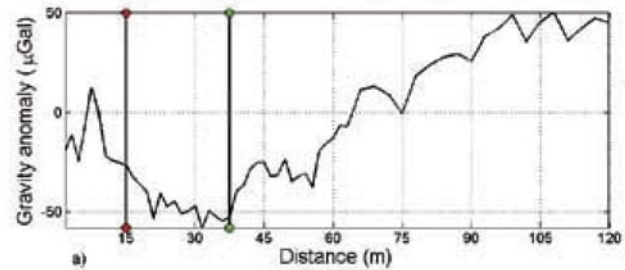
где ряд функции

$$\Psi_{m,n}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \Psi\left(\frac{x - n \cdot 2^m}{2^m}\right),$$

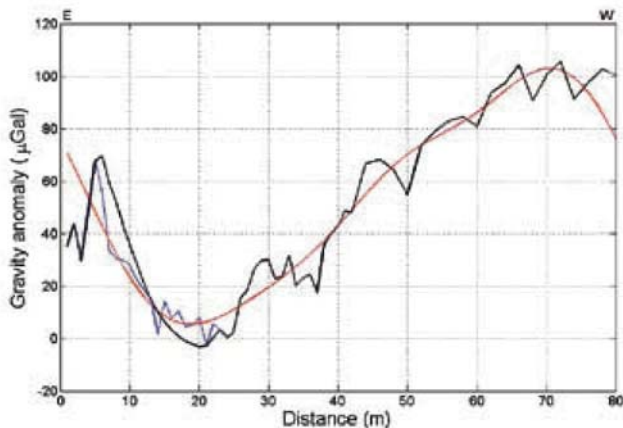
для всех  $m$  и  $n$  образует ортонормированный базис, а  $D_{m,n}$  является рядом коэффициентов.

Фильтр был применен в пространственном окне размером  $15 < x < 40$  м. Примененный родительский (материнский) вейвлет был «интерполирующим» из-за его формы, напоминающей вейвлет аномалий потенциального поля. Первым этапом является проведение анализа с переменной разрешающей способностью, в котором аномалия разделяется на несколько компонент разного уровня. На каждом уровне определяется вклад вейвлетов в разные положения в пространстве (Fedi and Quarta, 1998) и выполняется локальное удаление помех, выбирающее, на каком уровне и в каких местах компоненты помехи должны быть удалены. В нашем примере мы решили отфильтровать

**Рисунок 6** Локализованная фильтрация. а)





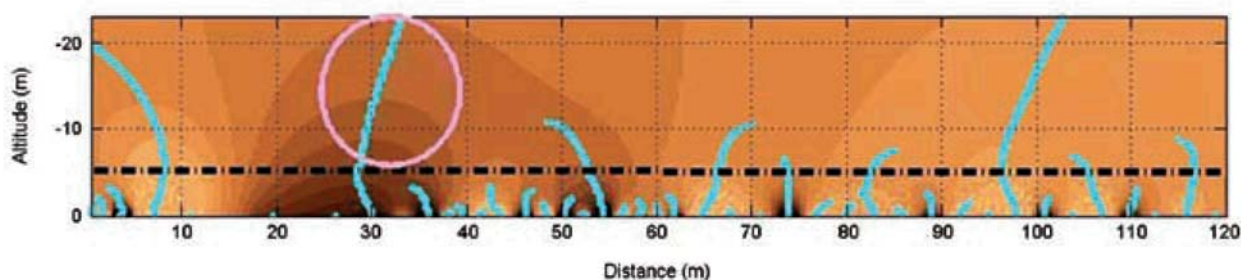


**Рисунок 7** Сопоставление между нефильрованной аномалией Буге (синяя линия), регионально фильтрованной аномалией с помощью фильтрации в Фурье области (красная линия) и локально фильтрованной аномалией с помощью DWT (черная линия).

На рисунке 7 приведены результаты локализованной фильтрации и сопоставлены с исходной аномалией и с аномалией, отфильтрованной простым низкочастотным фильтром Hanning со срезанием волны длиной в 30 м. Как и ожидалось, наблюдаемая и вейвлет фильтрованная гравитационные аномалии различаются только по положению места, где применен локальный вейвлет фильтр. С другой стороны, сглаживание, проведенное фильтром Фурье, является общим (региональным). Характеристика локального фильтра важна всякий раз, когда поле должно быть обработано с интерпретационными целями для оценки глубины и других параметров источника. Она базируется исключительно на локальном поведении помехи, производя, таким образом, оптимальное удаление помехи на значительной части профиля, где гравитационная аномалия обусловлена развитием пустот.

#### Интерпретация фильтрованных данных многоуровневыми (многомасштабными) методами

К отфильтрованным аномалиям были применены методы анализа и интерпретации, основанные на многоуровневом исследовании гравитационного поля (Florio and Fedi, 2006; Fedi and Florio, 2006; Fedi, 2007; Fedi et al., 2009). Эти методы исследуют вертикальные разрезы поля, созданные продолжением данных в верхнее полупространство, и дают информацию о месте положения и типе источника по особым участкам поля: осям аномалий (гребням). Оси аномалий, созданные простыми источниками, генерирующими однородные поля, прямолинейны (Fedi et al., 2009), тогда как сложные источники и в основном интерференция многих источников предполагает искривленные оси.



**Рисунок 8** Вертикальный разрез поля первых производных. Оси первого типа (голубые линии) хорошо прослеживаются и являются прямыми выше 5 м.

**Многоосевой (Multiridge) анализ и деконволюция Эйлера**  
 Многоосевой анализ потенциальных полей исследует эволюцию осей, чтобы получить информацию о положении и форме аномальных источников. Можно определить три типа осей (Fedi et al., 2009): i) оси первого типа – геометрическое место точек, где первые горизонтальные производные поля равны нулю; ii) оси второго типа – геометрическое место точек, где первые вертикальные производные поля равны нулю; iii) оси третьего типа – геометрическое место точек, где само потенциальное поле равно нулю. Чтобы оценить параметры полости, такие как глубина и форма, мы применили деконволюцию Эйлера к полевым данным вдоль осей первого типа. Процесс оценки является устойчивым по отношению к помехам, благодаря свойствам продолженного в верхнее полупространство поля. Уменьшение разрешающей способности, предполагаемое при продолжении в верхнее полупространство, может быть эффективно преодолено дифференцированием по вертикали анализируемого поля, даже с высокой степенью, благодаря комбинированному влиянию суммы преобразований этих данных на полосовую фильтрацию (Fedi et al., 2009). В нашем случае мы интерпретировали первую вертикальную производную и выбрали оптимальные высоты для продолжения в верхнее полупространство с помощью исследования вертикального разреза такого, как приведенный на рисунке 8. Здесь можно видеть, что на низких высотах (от 0 до 5 м) вертикальный разрез характеризуется многими осями, связанными с помехами; однако эти оси не распространяются на большие высоты, и мы можем легко выбрать область (высоты выше 5 м), где в поле господствуют регулярные и прямолинейные оси, удобные для интерпретации.

Вдоль выбранной оси (обведена розовой окружностью) была применена деконволюция Эйлера для получения одновременной оценки структурного индекса и глубины тела источника (Florio and Fedi, 2006; Fedi et al., 2009). Анализ проведен с помощью приведенной системы уравнений Эйлера, связанных только с вертикальной производной (так как вдоль оси первого типа горизонтальная по x производная равна нулю), и перемещения одномерного окна переменного размера вдоль оси. Неизвестными используемого уравнения являются глубина,  $z_0$ , и структурный индекс,  $N$ , который является параметром, указывающим обобщенную форму источника, будучи (в случае гравитационного поля) равным -1 для источника в форме контакта, 0 для источника в форме пласта, 1 для цилиндрического источника и 2 для точечного источника.

Малоглубинная геофизика

Здесь мы обсудим результаты для структурного индекса  $N$  как структурного индекса для случая гравитационного поля, от  $-1$  до  $2$  несмотря на порядок дифференцирования, использованный для входных данных. На рисунке 9 приведены результаты в виде средних значений параметрических оценок для каждого использованного размера окна. На рисунке 10 мы приводим 25 лучших полученных решений независимо от использованного окна. Мы видим, что оцененные значения являются более устойчивыми независимо от размера окна и концентрируются около средней глубины приблизительно в  $16.5$  м, а структурный индекс близок к  $1$ . Эти результаты хорошо согласуются с теоретическим значением структурного индекса для горизонтального цилиндра, являющегося хорошей аппроксимацией действительной формы полости, и с реальной глубиной центра полости (около  $16$  м).

**Метод DEXP**

Метод DEXP (глубина по точкам экстремума) (Fedi, 2007) позволяет оценить глубины источников, структурный индекс и плотность по точкам экстремума поля  $f$ , пересчитанного согласно экспоненциальному закону от высоты, с помощью следующего отношения:

$$W(z) = z^{\frac{N}{2}} f(z), \text{ где } z - \text{высота} \quad (2).$$

Метод является быстрым и устойчивым, опять же благодаря нормальному поведению потенциального поля с увеличением высоты пересчета. Благодаря этому преобразование DEXP может быть успешно применено к производным поля даже высшего порядка без возрастания помех несмотря на увеличение разрешающей способности (Cella, Fedi, Florio, 2009). Самым важным свойством преобразованного поля  $W$  над простым источником с глубиной  $z_0$  является то, что оно достигает максимального или минимального значения на высоте  $z = -z_0$ .

Чтобы откорректировать уровень поля, мы должны определить структурный индекс. С этой целью Fedi (2007) предложил исследование поведения масштабной функции  $\tau$  вдоль оси, где  $\tau$  легко рассчитывается как:

$$\tau = \frac{\partial \log f}{\partial \log z} \quad (3)$$

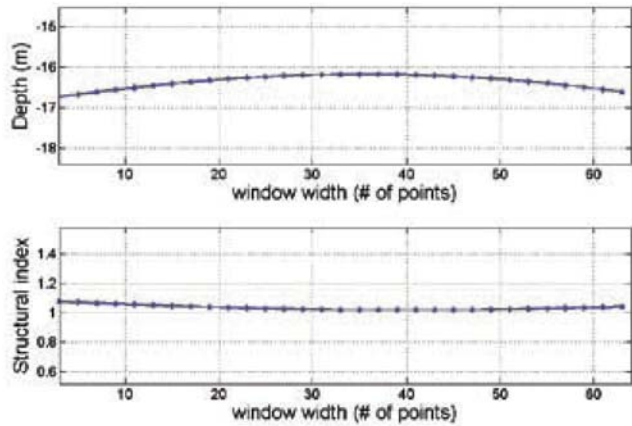
Причина заключается в том, что  $\tau$  действительно связана со структурным индексом (Fedi, 2007; Florio et al., 2009):

$$\tau = -N \frac{z}{z - z_0} \quad (4).$$

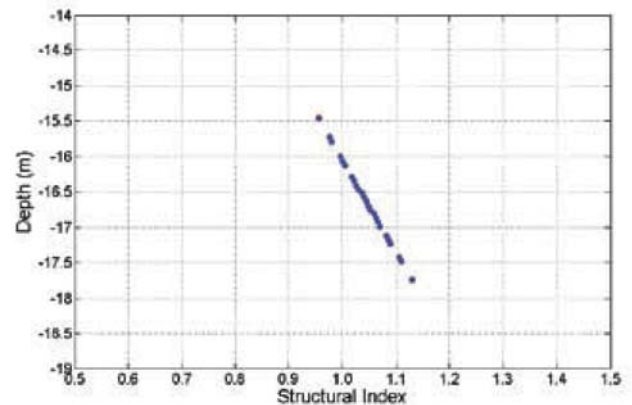
В этом случае оценка структурного индекса не зависит от оценки глубины и находится по точке пересечения функции  $\tau$  от  $1/z$ . Как и прежде, мы определили значение структурного индекса по исследованию первой вертикальной производной поля. Как показано на рисунке 11, значение на пересечении равно  $1$ . Этот структурный индекс подтверждает и результат, полученный по деконволюции Эйлера, и показывает горизонтальный цилиндрический источник гравитационной аномалии.

Для оценки глубины мы применили метод DEXP к первым вертикальным производным поля, задавая  $N=1$  в уравнении 2. Как показано на рисунке 12, около точки  $x=30$ м,  $z=16$  м существует интенсивный минимум, созданный аномалией

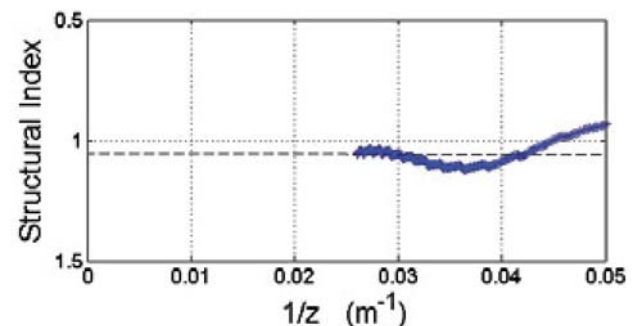
полости. Эти значения хорошо согласуются с действительным положением средней точки полости. Напротив, при интерпретации регионально фильтрованной аномалии метод DEXP позволяет нам оценить глубину в  $25$  м, не согласующуюся с глубиной до центра полости (рисунок 13).



**Рисунок 9** Результаты, полученные для глубины  $z_0$  и структурный индекс  $N$ . Мы видим, что оценки довольно устойчивы относительно размера использованного окна.

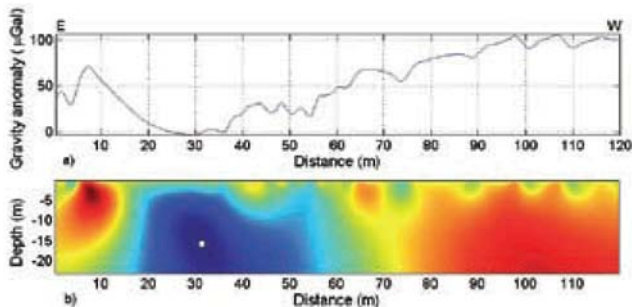


**Рисунок 10** Многоосевая деконволюция Эйлера, 25 лучших решений. Они сконцентрированы около среднего значения структурного индекса, равного  $1$ , теоретического значения для горизонтального цилиндра. Согласующаяся с этим значением  $N$  глубина до средней точки полости оценивается в  $16.7$  м, и является очень близкой к реальному значению центра полости.

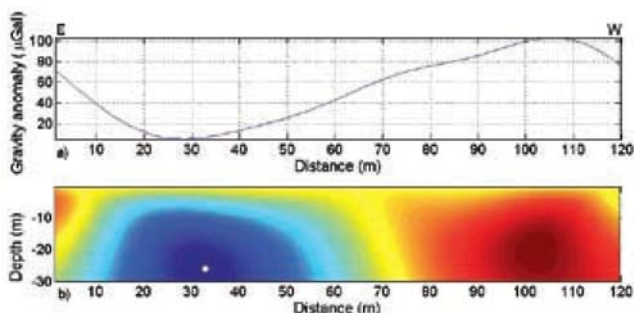


**Рисунок 11** Анализ масштабной функции вдоль оси. Значение пересечения на координатной оси дает оценку структурного индекса  $1$ , указывающего на горизонтальный цилиндрический источник.

## Малоглубинная геофизика



**Рисунок 12** Анализ DEXP для первых производных гравитационного поля. а) Входной сигнал, б) разрез DEXP. Белая точка на  $x=31$  м указывает оцененную глубину ( $z=16$  м) относительно широкого минимума, созданного полостью. Для  $x=50$  м существует дополнительный минимум, вероятно связанный с неизвестной полостью.



**Рисунок 13** Анализ DEXP для первых производных фильтрованного поля с помощью преобразования Фурье. а) Входная аномалия, б) разрез DEXP. Белая точка указывает оцененную глубину полости ( $z=25$  м), которая переоценена.

Этот результат интерпретации подтверждает превосходное выполнение локализованной фильтрации по дискретному вейвлет преобразованию для удаления помех из микрогравиметрических данных.

**Выводы**

Микрогравиметрическая съемка является одним из самых эффективных методов для выявления подземных полостей, особенно в городских районах, где другие геофизические методы трудно применимы. Применение микрогравиметрии требует большой точности в течение съемки и на стадии обработки. Мы применяли этот метод для выявления известной полости под землей в городском районе недалеко от Неаполя (Италия). Мы исследовали точность введения поправок и обработки данных с помощью недавно предложенных многоуровневых методов интерпретации. Точность в течение измерения и на этапе обработки вместе с выбором низкочастотного фильтра, который не нарушает форму сигнала, позволил нам получить оценки положения и глубины, хорошо соответствующие реальному положению и форме полости. Кроме того, профиль аномалий Буге представляет другие минимумы, вероятно связанные с неизвестными подземными полостями.

**Литература**

- Cella, F., Fedi, M. and Florio, G. [2009] Toward a full multiscale approach to interpret potential fields. *Geophysical Prospecting*, 57, 543-557.
- Fedi, M. [2007] DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields structures. *Geophysics*, 72, 2, 11-110.
- Fedi, M., Florio, G. and Quarta, T. [2009] Multiridge Analysis of Potential Fields: Geometrical Method and Reduced Euler Deconvolution. *Geophysics*, 74, 4, L53-L65.
- Fedi, M. and Florio, G. [2006] SCALFUN: 3D analysis of potential field scaling function to determine independently or simultaneously Structural Index and depth to source. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, New Orleans*, 963-967.
- Fedi, M. and Quarta, T. [1998] Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies. *Geophysical Prospecting*, 46, 507-525.
- Florio, G. and Fedi M. [2006] Euler deconvolution of vertical profiles of potential field data. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, New Orleans*, 958-962.
- Florio G., Fedi M. and Rapolla A. [2009] Interpretation of regional aeromagnetic data by multiscale methods: the case of Southern Apennines (Italy). *Geophysical Prospecting*, 57, 479-489.
- Mallat, S. [1989] A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, 674-693.
- Oppenheim, A.V. and Schaffer, R.W. [1975] *Digital signal processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Talwani, M., Worzel, J. L. and Landisman, M. [1959] Rapid Gravity Computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocine Submarine Fracture Zone. *J. Geophysical Research*, 64, 49-61.