

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ МАСШТАБИРУЕМОГО ПРОСТРАНСТВА
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА СТРУКТУР РЕЛЬЕФА
ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ

© 2011 г. О. В. Рыбас, Г. З. Гильманова*

Учреждение Российской академии наук Институт тектоники и геофизики

им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск

* E-mail: gigulya@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2011 г.

Рассматриваются базовые положения теории масштабируемого пространства в применении к исследованию рельефа поверхности Земли. Разработана методика выявления крупных структурных элементов и деталей геологического строения в цифровых моделях рельефа SRTM03 и SRTM30_Plus (радарная съемка), включающая выделение линейных, куполообразных структур, и текстурных особенностей. В основе методики – вычисление модуля первой производной по координате – модуля градиента рельефа, характеризующего состояние поверхности по крутизне и по направлению склона (азимуту), и второй производной по координате на поверхности – лапласиана поверхности Гаусса, идентифицирующего объекты куполообразной формы. Показана эффективность использования преобразованных цифровых моделей при геологических и тектонических исследованиях.

Ключевые слова: рельеф поверхности Земли, радарные данные, цифровые модели, лапласиана поверхности Гаусса

ВВЕДЕНИЕ

Применение теории масштабируемого пространства в геоморфологии, тектонике и геологии связано с выделением структур рельефа. При этом структуры, выделенные из исходных данных разного масштаба, могут не только существенно отличаться друг от друга, но быть использованы и как взаимно дополняющие конструкции, позволяющие строить максимально полную картину о характере исследуемого сигнала. Исследуемый n -мерный сигнал рассматривается в расширенном пространстве размерности $n + 1$, где параметр масштаба занимает дополнительное измерение. Такое “расширенное” пространство определяется как масштабируемое.

Теория масштабируемого пространства (Witkin, 1983; Koenderink, 1984; Koenderink, van Doorn, 1987) дает возможность: а) представить исходную информацию в том виде, когда при увеличении масштаба детализировка монотонно уменьшается, не создавая при этом новых особенностей; б) определить характер связи разномасштабных представлений.

В предлагаемой статье теория масштабируемого пространства применена для выделения структур рельефа по данным радарной съемки дистанционного зондирования. С целью выявления крупных структурных элементов и деталей их геологического строения в цифровых моделях рельефа SRTM03 и SRTM30_Plus (радарная съемка) разработана методика дешифрирования исходного материала, включающая выделение линейных и куполообразных структур посредством операций вычисления модуля первой производной по координате – модуля градиента рельефа, характеризующего состояние поверхности по крутизне и по направлению склона (азимуту), и второй производной по координате на поверхности – лапласиана поверхности Гаусса, идентифицирующего объекты куполообразной формы.

логического строения в цифровых моделях рельефа SRTM03 и SRTM30_Plus (радарная съемка) разработана методика дешифрирования исходного материала, включающая выделение линейных и куполообразных структур посредством операций вычисления модуля первой производной по координате – модуля градиента рельефа, характеризующего состояние поверхности по крутизне и по направлению склона (азимуту), и второй производной по координате на поверхности – лапласиана поверхности Гаусса, идентифицирующего объекты куполообразной формы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ МАСШТАБИРУЕМОГО ПРОСТРАНСТВА И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Базовая идея теории масштабируемого пространства заключается в использовании свертки исследуемого сигнала с ядром Гаусса. Хотя все дальнейшие положения справедливы для пространств любой конечной размерности, в нашем случае задача сводится к выявлению структурных особенностей рельефа – плоскости, где каждой точке с координатами (x, y) поставлена в соответствие ее высота $f(x, y)$.

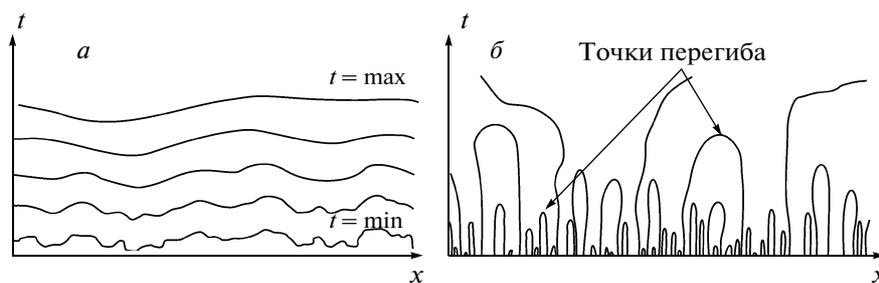


Рис. 1. а – Сглаживание формы графика при изменении параметра масштаба t ; б – зависимость расположений точек перегиба $L(x; t)$ от параметра масштаба t .

Для любого непрерывно дифференцируемого и интегрируемого отображения $f: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$ существует множество $L: \mathbf{R}^2 \times \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}$, которое будем называть *масштабным представлением* (изображением) f , определенным как (Witkin, 1983; Koenderink, 1984, 1987; Lindeberg, 1993; Romeny, 2003)

$$L(x, y; t) = (g \otimes f)(x, y; t) = \int_{(\xi, \eta) \in \mathbf{R}^2} f(x - \xi, y - \eta) g(\xi, \eta; t) d\xi d\eta, \quad (1)$$

где \otimes – оператор свертки, $g: \mathbf{R}^2 \times \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}$ – *ядро свертки Гаусса* на плоскости

$$g(x, y; t) = \frac{1}{2\pi t} e^{-\frac{x^2+y^2}{2t}}, \quad t > 0, \quad (2)$$

и t – параметр масштаба. Результат свертки $L(x, y; t)$ – это масштабное представление поверхности $f(x, y)$ с коэффициентом масштаба t .

Напомним, что результатом операции свертки двух элементов – ядер Гаусса – будет третий элемент, который также является ядром Гаусса и принадлежит исходному множеству

$$g(\cdot; t_1 + t_2) = g(\cdot; t_1) \otimes g(\cdot; t_2), \quad t_1, t_2 > 0.$$

При $t = 0$ ядро свертки превращается в импульсную функцию и $f(\cdot) = g(\cdot; 0) \otimes f(\cdot)$.

Заметим, что каждый элемент масштабного представления $L(x, y; t_2)$ можно получить как сверткой ядра $g(x, y; t_2 - t_1)$ по отношению к предыдущему преобразованию $L(x, y; t_1)$, так и прямой сверткой $g(x, y; t_2)$ по отношению к функции $f(x, y)$. Это дает свободу выбора при построении фильтров различных масштабов и позволяет контролировать величину масштаба конечного результата в ходе последовательных (комплексных) преобразований. Масштабная компонента t не может принимать отрицательных значений, следовательно, не существует обратных элементов, которые превратили бы исследуемый объект в группу. Этот факт является формальным подтверждением того, что не существует преобразований,

которые в грубом исходном материале могли бы “найти” тонкие структуры.

Геометрический смысл свертки поверхности $f(x, y)$ с ядром Гаусса – это сглаживание поверхности с определенным параметром масштаба t . При этом величина t связана с результатом операции $L(x, y; t)$ таким образом, что из исходного изображения удаляются все детали, линейные размеры которых не превышают величину \sqrt{t} . Это позволяет, с одной стороны, избавиться от шумов исходного материала (или хотя бы существенно их ослабить), и, с другой, – произвести его генерализацию, т.е. оставить элементы рельефа такой линейной размерности, которая необходима на текущем этапе обработки.

Для иллюстрации указанных положений рассмотрим набор функций от одной переменной $L(x; t)$, где исходная функция $f(x) = L(x; 0)$. На рис. 1а показано сглаживание формы графика при изменении параметра масштаба t . Зависимость расположений точек перегиба $L(x; t)$ (горизонтальная ось x) от масштаба (вертикальная ось t) представлена на рис. 1б. Точка перегиба находящаяся на склоне графика, характеризуется условием $L_{xx} = 0$ и $L_{xxx} \neq 0$, где индексы означают вторую и третью производные соответственно. Тогда каждый трек такой точки можно рассматривать как некий объект (полудугу), показывающий ее пространственную миграцию в зависимости от степени сглаживания t . Так как обрабатываемая функция (сигнальная последовательность) непрерывно дифференцируема, то для каждой точки перегиба может быть найдена другая сопряженная с ней относительно соседнего внутреннего локального экстремума (минимум–максимум) точка, и знаки третьей производной будут разные. В процессе сглаживания при достижении масштаба t некоторого критического значения треки двух сопряженных точек перегиба (полудуг) соединятся и прекратят свое существование (аннигилируют). В этой точке $L_{xxx}(x; t) = 0$. Следует обратить внимание, что дуги, сформированные парой точек перегиба, могут быть закрыты (существует точка, где касательная параллельна оси x) сверху, но всегда открыты снизу, т.е. невозможна ситуа-

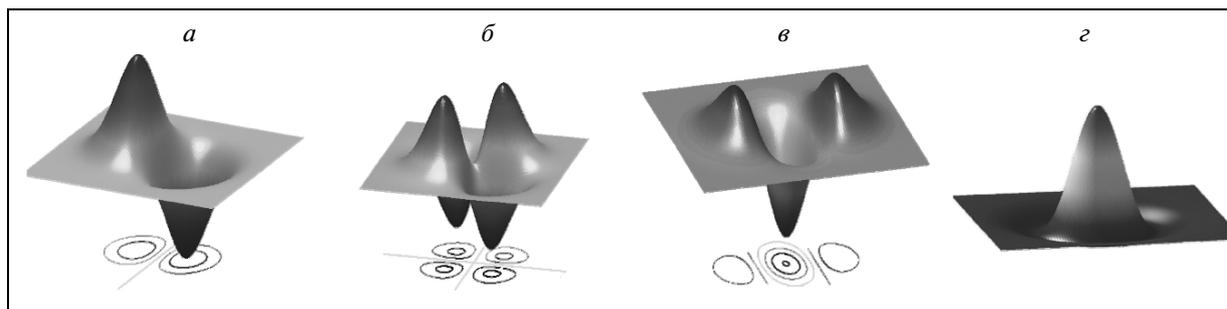


Рис. 2. Наиболее часто используемые Гауссовы производные: *а* – первая производная g_x ; *б* – смешанная вторая производная g_{xy} ; *в* – вторая производная g_{xx} ; *г* – оператор Лапласа.

ция, когда найдется точка, которая в состоянии породить новый экстремум при увеличении t .

Неспособность порождения новых (ложных) структур – это одно из важнейших свойств Гауссовых сглаживаний, и Гауссовы функции являются единственными, обладающими такими свойствами (Florack, 1992; Young, 2001).

Для любого фиксированного значения t существуют частные производные, которые также обладают свойством коммутативности

$$L_{x^a y^b}(x, y; t) = \partial_{x^a y^b} L(x, y; t) = (\partial_{x^a y^b} g(x, y; t)) \otimes f(x, y) = g(x, y; t) \otimes \partial_{x^a y^b} f(x, y),$$

где индексы a и b означают порядок дифференцирования по каждой из пространственных переменных. Производная любого порядка по каждой из переменных может быть получена тремя путями: а) дифференцированием сглаженной поверхности $L(x, y; t)$; б) сверткой поверхности $f(x, y)$ с дифференцированным ядром Гаусса; в) сглаживанием дифференцированной поверхности $f(x, y)$. Оператор $\partial_{x^a y^b} g(x, y; t)$ имеет собственное название “ядро производной Гаусса” (Gaussian derivative kernel), или “производная Гаусса”. Семейство таких операторов также является коммутативной и ассоциативной полугруппой, следовательно, производная мультимасштабного представления наследует свойства каскадного сглаживания (Lindberg, 1993, 1997, 1998), что позволяет не учитывать порядок дифференцирования в случае частных производных высоких порядков.

Мультимасштабное представление, основанное на сглаженных производных (Гауссовых производных), было предложено в работе (Koenderink, 1984, Koenderink et al., 1987). На рис. 2 показаны некоторые наиболее часто используемые Гауссовы производные. Частная производная по каждой из пространственных переменных для поверхности рельефа L_x и L_y – это характеристика изменения высот по соответствующим направлениям, вектор $(L_x, L_y)^T$ – это градиент функции $L(x, y; t)$, ко-

торый указывает направление наискорейшего роста функции в каждой точке (x, y) и модуль которого равен скорости ее изменения в этом направлении. Таким образом, градиент характеризует состояние поверхности как по крутизне, так и по направлению склона (азимуту). Модуль градиента и его азимут вычисляются по формулам

$$|\text{grad} L| = |\nabla L| = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad \text{и} \quad \varphi = \text{arctg} \frac{L_y}{L_x}$$

соответственно.

Для анализа структуры сигнала существует достаточно большой набор методов, основанных на частных производных второго порядка L_{xx} , L_{yy} и L_{xy} , но для анализа структуры рельефа применяются L_{xy} и оператор Лапласа ($\nabla^2 L = L_{xx} + L_{yy}$).

Необходимость использования мультимасштабного представления определяется тем, что для объектов реального мира не существует такого универсального масштаба, когда можно было бы выделить все элементы структуры в течение единственной серии преобразований. Чаще всего тонкие особенности лучше проявляются при малых значениях сглаживающего параметра масштаба t , при этом теряются грубые формы. При увеличении t происходит генерализация обрабатываемой поверхности $f(x, y)$ с потерей детальности, но появляется возможность проявить более крупные региональные структурные составляющие. Таким образом, при проведении серии обработок поверхности $f(x, y)$ (это может быть модуль градиента, Лапласиан на поверхности Гаусса, любое другое преобразование) с различной степенью генерализации может быть получена серия результатов, которая в свою очередь может быть использована для дальнейшей обработки в аналитических системах (линементы, текстуры и др.). Например, выделяя линементы из модуля градиента фиксированного параметра сглаживания t , мы всегда можем знать характеристики необходимых на данном этапе обработки объектов и отфильтровывать ненужные. Прделав эти операции для каждого из уровней генерализации, на последнем ша-

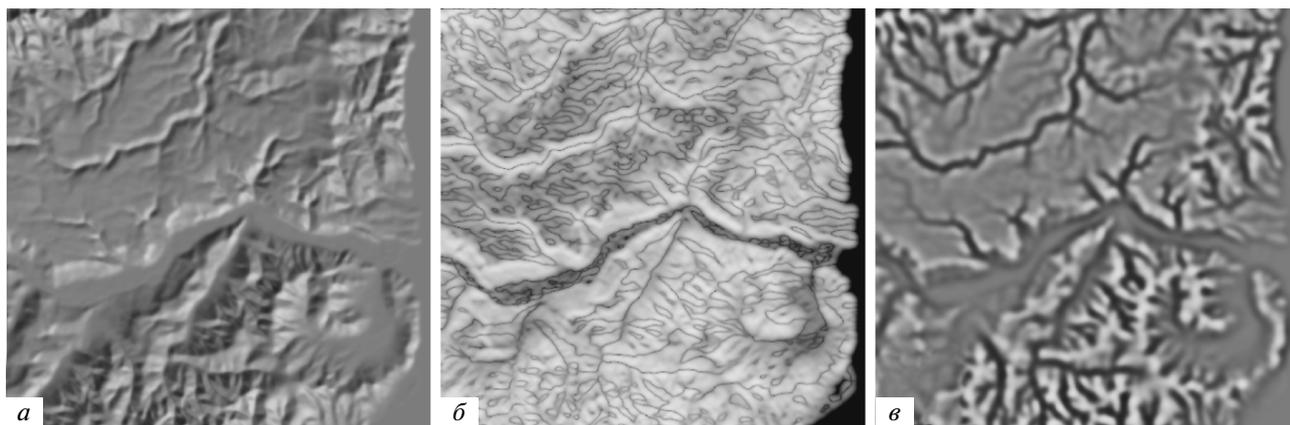


Рис. 3. Фрагмент цифровой модели (DEM) радарной съемки SRTM 03 (разрешение 90 м) в районе Иннокентьевской бухты на побережье Татарского пролива: *а* – подсвеченный рельеф; *б* – обработанный модулем градиента; *в* – обработанный оператором Лапласа.

ге можно объединить все выделенные линеаменты для получения общей картины.

ВЫДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ РЕЛЬЕФА

Рельеф является одним из основных показателей развития геодинамических процессов, протекающих в приповерхностном слое Земли, и отражает геологическое строение территории. В данном разделе представлена методика выделения нескольких типов геоморфологических объектов.

Исходным материалом для исследований и обработки служила цифровая модель рельефа: SRTM03. Распространяемые данные SRTM03 имеют следующие характеристики: размер ячейки 3×3 арксекунды (примерно 90 м), проекция Lat/Lon на эллипсоиде WGS84 (World Geodetic System 1984) с исходной отметкой над уровнем моря, определяемой геоидом WGS84-EGM96 (Earth Gravitational Model). Абсолютные погрешности горизонтального позиционирования и высоты для евразийского континента составляют 8.8 м и 6.2 м соответственно. Данные кодируются 16 битами, что позволяет представлять весь набор высот от 0 до 65535 м с дискретностью 1 м. Другие уточняющие данные по приполярной зоне, горным массивам, и др. были взяты из различных источников (Smith et al., 1997; Becker et al., 2009).

Рассмотрим растровую модель поверхности рельефа как трехмерный объект в системе координат растрового изображения (x, y) . Значения в каждой точке $f(x, y)$ являются численными значениями реальных высот поверхности над уровнем моря в метрах. Так как исходное изображение имеет полную информацию о привязке и системе координат, то на этапе обработки нет необходимости в отслеживании информации о географической привязке, она возвращается на финальном шаге для дальнейшей работы в ГИС-приложении. Таким образом, для упрощения записи и при-

вязки к общепринятым обозначениям будем принимать значение высоты f в метрах в ячейке растра (x, y) .

Задача сводится к выделению нескольких типов объектов. Отметим, что рельеф (как растр) обладает некоторыми особенностями, которые включают в себя отсутствие резких границ, т.е. не бывает резких перепадов высот между соседними зонами, отсутствие ярко выраженных линейных объектов, неявные и не всегда очевидные линейные и кольцевые структуры, которые, собственно, и предстоит выделять. Кроме линейных и кольцевых структур в качестве самостоятельного объекта можно рассматривать текстуры – зоны с ярко выраженными морфометрическими признаками (осадочные бассейны, горные массивы и т.д.), которые могут быть предметом как дальнейшей автоматизированной обработки, так и визуальной оценки.

Линейные объекты

Модуль градиента является наиболее эффективным инструментом для выделения линейных структур, так как в зонах разрывных нарушений почти всегда присутствуют пространственно вытянутые участки с близкими значениями градиентов. Кроме того, в любой точке экстремума значение модуля градиента близко к нулю, что позволяет отчетливо выделять долины и хребты в виде протяженных линейных объектов (рис. 3б). В результате обработки с участием частных производных первого порядка получается изображение, готовое для дальнейшей обработки средствами линеаментного и текстурного анализа. Азимут и модуль градиента также могут быть использованы в качестве текстурных параметров.

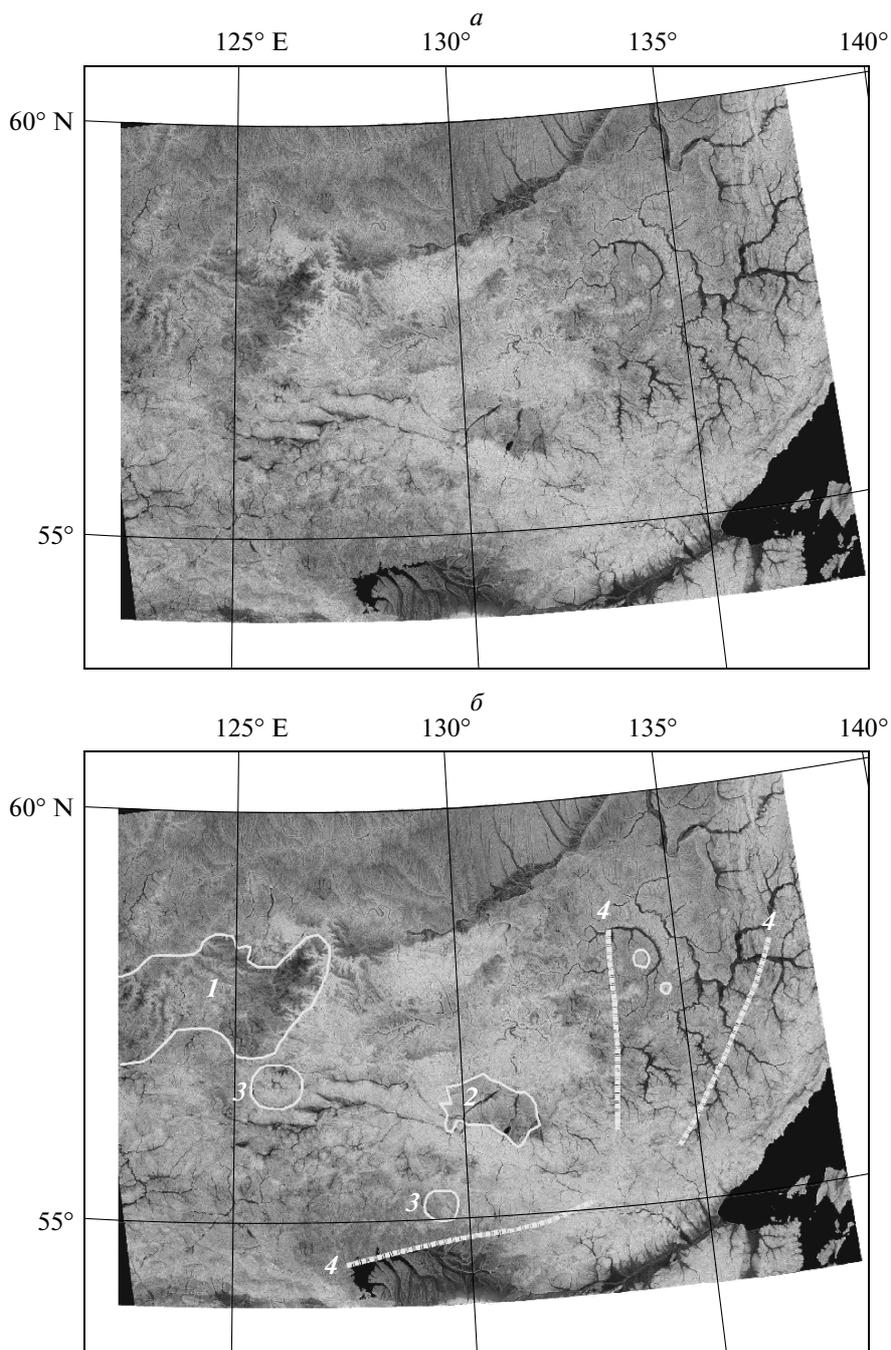


Рис. 4. Пример выделения геологических объектов по цифровой модели рельефа: *a* – обработанная модулем градиента цифровая модель; *б* – выделяемые объекты: 1 – Нимныро-Чугинский блок архейского фундамента; 2 – юрские угленосные отложения; 3 – кольцевые структуры; 4 – разломы.

Объекты куполообразной формы

Для выделения объектов куполообразной формы используется оператор Лапласа. Фильтр, построенный на базе поверхности Гаусса с применением к ней этого оператора, называют “Лапласианом поверхности Гаусса” (Laplacian-of-a-Gaussian – LOG). Результатом работы фильтра будет максимальная ответная реакция на объекты

куполообразной формы (отдельно стоящие пики, горные хребты), очертания которых максимально близко соответствуют форме ядра свертки LOG, и минимальная реакция – на объекты противоположной формы (депрессии, долины). Поэтому поверхность $\nabla^2 L = L_{xx} + L_{yy}$ является индикатором пиков/депрессий, линейные размеры которых зависят от масштабного параметра сглаживания t .

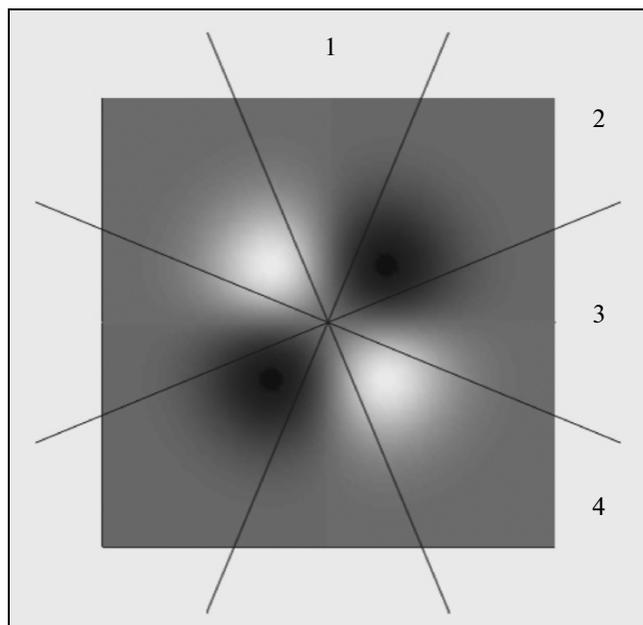


Рис. 5. Вторая смешанная производная Гаусса g_{xy} . Угол вращения $\varphi_1 = 80^\circ (260^\circ)$.

На практике это преобразование используется для выделения кольцевых структур и для текстурного анализа (рис. 3б). В свою очередь текстурные особенности рельефа могут служить индикатором состава пород и крупных литолого-петрографических комплексов.

Приведем пример использования цифровой модели рельефа, обработанной модулем градиента и Лапласианом на поверхности Гаусса для геологоструктурного районирования. Район (52–61° с.ш., 120–133° в.д.) охватывает южную часть Сибирской платформы (Алдано–Становой щит), юго-восточный фланг каледонского Селенга–Станового и западную часть индосинийского Монголо–Охотского орогенных поясов (рис. 4). Область характеризуется активными геодинамическими проявлениями, как в настоящее время, так и в геологическом прошлом, что отразилось в структуре рельефа. Анализировалось цветное изображение, которое было получено как сочетание результатов расчетов Модулем градиента рельефа при $t = 1, 16$ (каналы R, G) и Лапласианом на поверхности Гаусса при $t = 4$ (канал B). На рисунке показано, как по текстурным особенностям хорошо выделяются блоки, угленосные отложения, кольцевые структуры и разломы. По результатам полного дешифрирования была составлена структурно-тектоническая схема юго-востока Сибирской платформы (Рыбас и др., 2010), которая здесь не приводится, так как ее полное описание выходит за рамки данной статьи.

Разрывные нарушения

Выделим разрывные нарушения с помощью второй смешанной производной Гаусса g_{xy} . Общий вид этого ядра представлен на рис. 5, где светлые и темные зоны в оттенках серого цвета представляют положительные и отрицательные значения соответственно. Очевидно, что такое ядро в результате свертки будет давать максимальную ответную реакцию на объекты исходного изображения седловидной формы, более того, – на объекты строго ориентированные (в приведенном примере хребет -45° , долина $+45^\circ$ в географической системе координат). Разделим ядро на восемь сегментов (фактический интерес представляют только четыре сегмента, т.к. фигура центрально-симметрична) и рассмотрим, какой вклад в величину ответного сигнала дает каждый из сегментов. Сегменты “1” и “3” близки к нулевым значениям, соответственно их влияние минимально, максимальная ответная реакция исходит от сегментов “2” и “4” (на плоских участках они компенсируют друг друга, и конечный результат также будет близок к нулевым значениям). Отсюда следует вывод, что ядро свертки g_{xy} является индикатором ориентированных протяженных объектов – хребтов и долин.

Прежде, чем переходить к примеру использования такого фильтра, приведем полезное пояснение. При поиске ориентированных объектов необходимо построить ядро таким образом, чтобы можно было контролировать их направление. Фактически нужно просто “провернуть” ядро вокруг центральной точки симметрии аффинными преобразованиями на необходимый угол. Для этого введем новую систему координат (x', y')

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

Относительно нее построим вторую производную по смешанным переменным $\partial_{x'y'}g(x', y'; t)$ и сделаем обратное преобразование в начальную систему координат. Учитывая центральную симметрию, угол φ может принимать значения от 0° до 180° . В начале обработки нового рельефа чаще всего неизвестны главные направления разрывных нарушений, поэтому бывает полезно построить серию вторых производных масштабных представлений L_{xy} с разными углами вращения для выявления наиболее ярко выраженных и в дальнейшем уже с ними вести более подробную работу.

На рис. 6 показан участок сейсмоактивной зоны северного Сахалина (район Нефтегорска), где развита правосторонняя сдвиговая тектоника. Приведено шесть вариантов расчетов L_{xy} , где использовался масштабный параметр $t = 1, 4, 64$ и углы вращения второй производной $\varphi_1 = 80^\circ (260^\circ)$ и $\varphi_2 = 130^\circ (310^\circ)$, каждый вариант сопровождается формой производной ядра Гаусса.

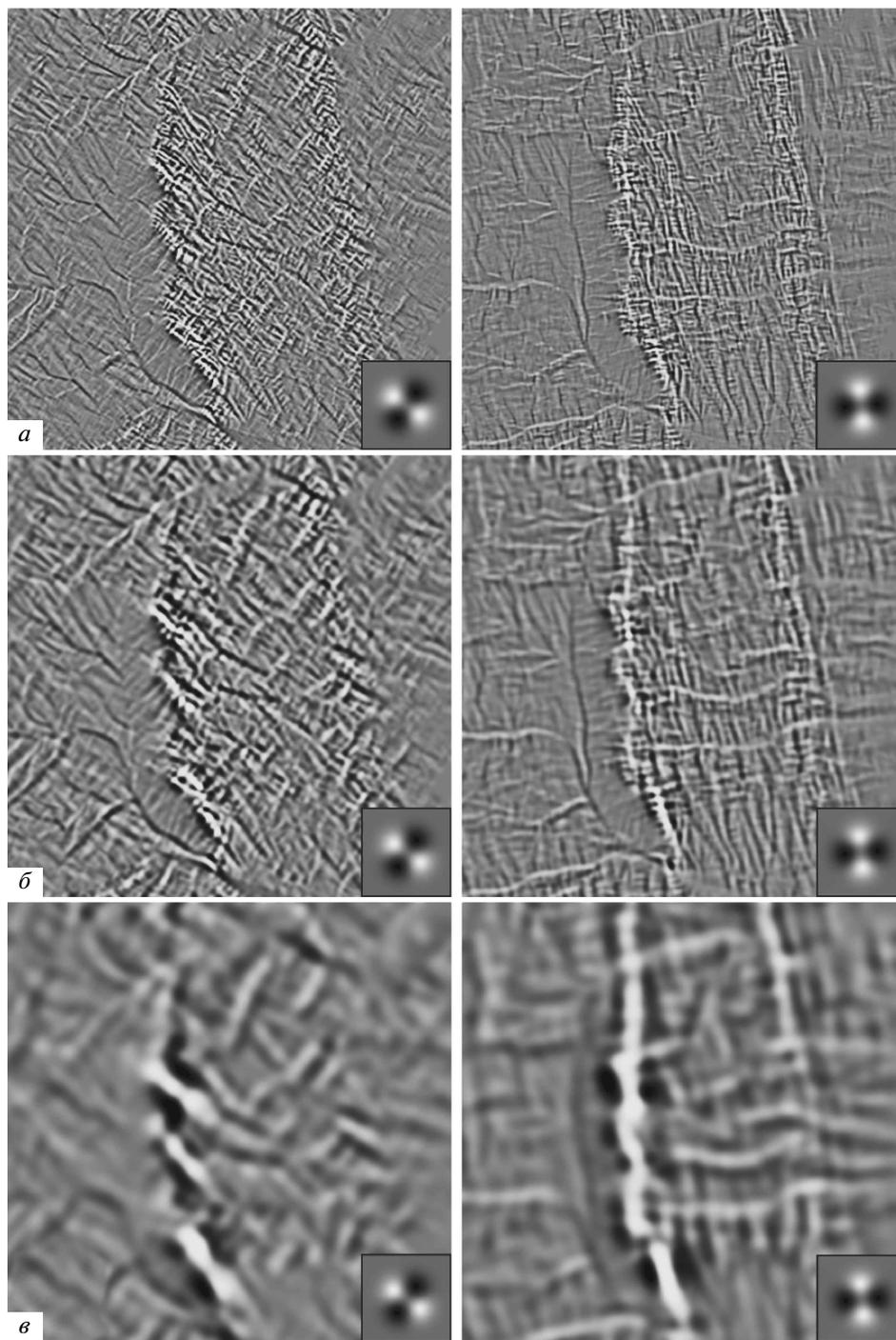


Рис. 6. Участок сейсмоактивной зоны северного Сахалина (район Нефтегорска), где развита правосторонняя сдвиговая тектоника. Шесть вариантов L_{xy} при $t = 1, 4, 64$ (*а, б, в* соответственно) и $\varphi_1 = 80^\circ(260^\circ)$ (левые) и $\varphi_2 = 130^\circ(310^\circ)$ (правые). Каждая сцена сопровождается формой производной ядра Гаусса.

При данных углах вращения второй производной выделялись диагональные (северо-восток, юго-запад) и ортогональные (широтные и меридиональные) системы линейных структур. Очевидно, что по мере увеличения масштабного параметра происходят генерализация сетей линейных

структур, выделение их региональных составляющих. Такие исследования важны для построения тектонических карт, выделения локальных и глобальных сетей разрывных нарушений, поиска и анализа активных разломов, изучения полей напряжений, обусловивших их появление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана эффективность применения теории масштабируемого пространства для выделения по данным радарного зондирования структур рельефа, зон различных типов, разрывных нарушений, тектонических блоков; возможность более точного определения размеров различных геоморфологических, тектонических и геологических объектов. Разгрузка от отвлекающих и маскирующих деталей преобразованных радарных снимков способствует выявлению наиболее существенных крупных черт геологического строения региона, генерализованных проекций региональных и глобальных структур.

На основе разработанной методики дешифрирования исходного материала, включающей операции вычисления модуля градиента рельефа и лапласиана поверхности Гаусса, выделены линейные и куполообразные структуры, разрывные нарушения в различных регионах.

Широкие возможности преобразованных цифровых моделей рельефа при тектоническом районировании территорий, геологическом картировании, структурных построениях, линеаментном анализе могут найти свое применение на всех этапах региональных геологических исследований. Особо важно применять подобного рода исследования в трудно доступных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рыбас О.В., Гильманова Г.З., Горошко М.В. Применение преобразованных мелкомасштабных цифровых моделей рельефа для выделения крупных блоков земной коры // Тез. докл. XIII Рос. конф. Распределенные информационные и вычислительные ресурсы (DICR'2010). Новосибирск, 30 ноября–3 декабря 2010. С. 28. <http://conf.nsc.ru/dicr2010/ru/reportview/31576>

Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Braud J., Binder B., Depner J., Fabre D., Factor J., Ingalls S., Kim S-H., Ladner R., Marks K., Nelson S., Pharaoh A., Sharman G., Trimmer R., vonRosenburg J., Wallace G., Weatherall P. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS // Marine Geodesy. 2009. V. 32. № 4. P. 355–371.

Florack L.M.J., Romeny B.T.H., Koenderink J.J., Viergever M.A. Scale and the Differential Structure of Images // Image and Vision Computing. 1992. V. 10. № 6. P. 376–388.

Koenderink J.J. The structure of images // Biol. Cyb. 1984. V. 50. P. 363–370.

Koenderink J.J., van Doorn A.J. Representation of Local Geometry in the Visual System // Biol. Cyb. 1987. V. 55. P. 367–375.

Lindeberg T. Discrete derivative approximations with scale-space properties: A basis for low-level feature extraction // J. Math. Imag. Vis. 1993. V. 3. № 4. P. 349–376. <http://www.nada.kth.se/~tony/abstracts/Lin93-JMIV.html>

Lindeberg T. On the axiomatic foundations of linear scale-space: Combining semi-group structure with causality vs. scale invariance. Chapter 6 / Eds. Sparring J., Nielsen M., Florack L., Johansen P. // Gaussian Scale-Space Theory: Proc. PhD School on Scale-Space Theory. Copenhagen, Denmark, May 1996. Kluwer Academic Publishers, 1997.

Lindeberg T. Edge detection and ridge detection with automatic scale selection // Int. J. Comp. Vis. 1998. V. 30. № 2. P. 117–154. <http://www.nada.kth.se/cvab/abstracts/cvab191.html>

Romeny B.T.H. Front-End Vision and Multi-Scale Image Analysis. Kluwer: Springer, 2003. 484 p.

Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. V. 277. P. 1957–1962.

Witkin A.P. Scale-space filtering // Proc. 8th Int. Joint Conf. Art. Intell. 1983. P. 1019–1022.

Young R.A., Lesperance R.M., Meyer W.W. The Gaussian Derivative model for spatial-temporal vision: I. Cortical model // Spatial Vision. 2001. V. 14. № 3, 4. P. 261–319.

Application of Scale-Space Theory for the Selection and Analysis of Relief Structures

O. V. Rybas, G. Z. Gilmanova

Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk

The article covers the basic tenets of Scale-Space Theory for the application to the study of surface topography of the Earth. A method developed for identifying major structural elements and details of the geological structure of the digital elevation models SRTM03 and SRTM30_Plus (radar imagery), including the selection of linear, dome-shaped structures, and textural features. The basis of the method is calculating the modulus of the first derivative of the coordinate – modulus of the gradient relief, characterizing the surface condition on the steepness of the slope and direction (azimuth) and the second derivative of the coordinate on the surface – the surface Laplacian of Gauss, identifying dome shape objects. The efficiency has been proven of the converted digital models in geological and tectonic studies.

Keywords: surface topography of the Earth, radar imagery, digital elevation models, Laplacian-of-a-Gaussian