
МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.435.83:528.8.044.204

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ФОРМ РЕЛЬЕФА

© 2017 г. В. Ю. Абакумова

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН,
ул. Недорезова, 16а, г. Чита, 672014, Россия. E-mail: faith-sh@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

После исправления 04.10.2016 г.

В статье рассмотрен ряд методов обработки изображений, увеличивающих их контрастность, и применение этих методов к цифровой модели рельефа для разграничения территорий с характерным геоморфологическим строением. Показано, что “Фильтр Лапласа над гауссианом” с оптимальным соотношением сглаживания и усиления контрастности эффективен для вышеуказанных целей. Использование метода главных компонент для нескольких изображений, обработанных “Фильтром Лапласа над гауссианом” с разными размерами ядра свертки, позволило выделить на одной карте разномасштабные объекты. При сопоставлении полученных изображений с геологической картой исследуемой территории стало видно, какие геологические структуры хорошо выражены в рельефе, а какие – нет, то есть, в большей степени подверглись влиянию экзогенных факторов рельефообразования. В результате сложения обработанных изображений и карты высот, предварительно приведенных к одинаковым единицам измерения, появилась возможность рассматривать выделенные элементы с точки зрения соотношения их высотных уровней. Кроме того, “Фильтр Лапласа над гауссианом” можно использовать для выделения дренажной сети.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, фильтрация изображений, геологические структуры.

ВВЕДЕНИЕ

При геоморфологических исследованиях в последнее время все более широкое применение получают цифровые модели рельефа (ЦМР). Использование ЦМР открывает широкие возможности для морфометрического анализа, выделения очертаний форм и комплексов форм рельефа, определения их количественных показателей. Кроме того, ЦМР позволяют проводить геоморфологические исследования с разной степенью генерализации и изучать разномасштабные объекты и явления (например, [10]).

Цель данной работы – изучение возможностей применения методов обработки изображений для анализа ЦМР и использования их для выделения характерных форм рельефа. В данной работе рассматриваются только растровые ЦМР с регулярной сеткой.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существует множество методов анализа ЦМР, при этом используются как исходные высотные данные, так и производные показатели (уклон,

экспозиция, относительные превышения, водосборные площади, кривизна поверхности и др.). Исходная ЦМР, содержащая данные об абсолютных высотах каждой ячейки, несет определенную информацию о характере рельефа, а гипсографическая кривая дает представление об интенсивности эрозионных и аккумулятивных процессов. Для выделения линейных структур (линеаментов) используется уклон, близкий к нему модуль градиента [8], показатель кривизны поверхности [10]; для выделения кольцевых структур и интрузивных массивов – теневой рельеф с различными углами источника света [4, 13]; для выделения неотектонических структур – построение базисных и вершинных поверхностей [3], вертикальное и горизонтальное расчленение и др. Два последних показателя зависят от алгоритмов выделения речной сети, что влечет за собой некоторую субъективность при интерпретации результатов.

Вместе с тем рассмотрение ЦМР как любого другого изображения (или массива числовых данных) позволяет значительно расширить спектр методов для анализа рельефа и получать изображения, не отражающие существующий рельеф

и даже искажающие его, но позволяющие выявить его какие-либо характеристики. К таким методам относится фильтрация, алгоритмов которой существует уже несколько десятков, и новые все продолжают появляться. Эти методы с успехом применяются, в том числе и при изучении рельефа (например, [7]). Большая доля фильтров оперирует двумя процессами: сглаживание (устранение шума) и усиление контрастности (выделение границ). Один из эффективных инструментов в решении второй задачи – “Фильтр высоких частот” (ФВЧ), в английской терминологии “High-pass filter”, присваивающий центральной ячейке значение, полученное путем вычитания значения центральной ячейки из среднего арифметического окружающих его соседних ячеек, количество которых определяется размером и формой скользящего окна. В результате применения ФВЧ-границы между разнородными объектами становятся более резкими. Чем темнее участок, тем он ниже по сравнению с окружающей его областью. И наоборот: чем светлее, тем выше; серые тона обозначают примерно одинаковое высотное положение. При увеличении размера скользящего окна выявляются границы между более крупными объектами, одновременно “размываются” границы между малыми объектами. В среднем линейные размеры выделяемых объектов, как правило, в 4–10 раз больше шага сетки ЦМР [10]. В зависимости от свойств территории, то же можно сказать и про размер скользящего окна. ФВЧ чувствителен к шуму, случайным или систематическим ошибкам в исходной ЦМР, при небольшом размере скользящего окна появляются помехи в виде полос и клеток. “Фильтр Лапласа над гауссианом” (ЛГ-фильтр), в английской терминологии “Laplacian of Gaussian” (LOG), менее чувствителен, так как изображение предварительно сглаживается, а потом в нем выделяются границы. В этом случае вес окружающих соседних ячеек не одинаковы, а убывают от центра к периферии в соответствии с законом Гаусса (т.е. нормально распределены). Вместо скользящего окна ЛГ-фильтр оперирует ядром свертки [8], которое задается не количеством ячеек, а величиной стандартного отклонения: чем оно больше, тем больше ячеек участвуют в вычислениях. Аналогично ФВЧ масштаб выделяемых объектов зависит от величины ядра свертки. Пример использования двух вышеозначенных методов фильтрации для выделения линейных геологических структур приведен в работе [12].

Кроме визуальной интерпретации изменений изображения с увеличением масштаба с помощью статистических показателей можно оценить

их количественно. Наиболее распространены такие статистические показатели, как линейный парный коэффициент корреляции, пространственная автокорреляция, линейная регрессия, а также построение графиков взаимозависимостей и диаграмм распределения частот, показывающих, с какой частотой переменные попадают в определенный интервал.

Для одновременного отображения на одной карте объектов разного масштаба существует ряд методов мультимасштабного анализа (например, [8, 11]). В данной работе предложено использовать метод главных компонент (Principal component analysis), который трансформирует набор исходных изображений в набор изображений компонент, каждая из которых не коррелирует с остальными. Изображения, построенные по расчетам первых компонент, содержат максимальное число общих элементов для всех исходных изображений. Последние компоненты вносят самый малый вклад в общую дисперсию и имеют минимальную корреляцию со всеми исходными изображениями. Широко данный метод применяется при обработке мультиспектральных изображений для нахождения оптимальной комбинации спектральных каналов, а также для отсеивания шумов и помех, которые обычно связаны с компонентами больших порядков. Использование метода главных компонент с входными изображениями теневого рельефа разных углов наклона и направлений для оконтуривания различных форм рельефа описано, например, в [14]. Если в качестве исходных задать несколько изображений с разным размером скользящего окна (или ядра свертки), т.е. с разным масштабом выделяемых объектов, получим ряд изображений компонент, организованных в порядке убывания сходства со всеми исходными изображениями, другими словами – в порядке убывания количества общих объектов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – южная часть Читино-Ингодинской впадины, участки ее горного обрамления (хребтов Черского и Яблонового), а также часть Даурского хребта (рис. 1). Являясь одной из крупнейших впадин Забайкальского края (около 280 км длиной) и характеризуясь единством генезиса, она состоит из нескольких блоков, что представляет интерес для геоморфологического изучения. Впадина имеет мезо-кайнозойское происхождение, тектоническое заложение произошло в юрском времени [1]. Различное строение

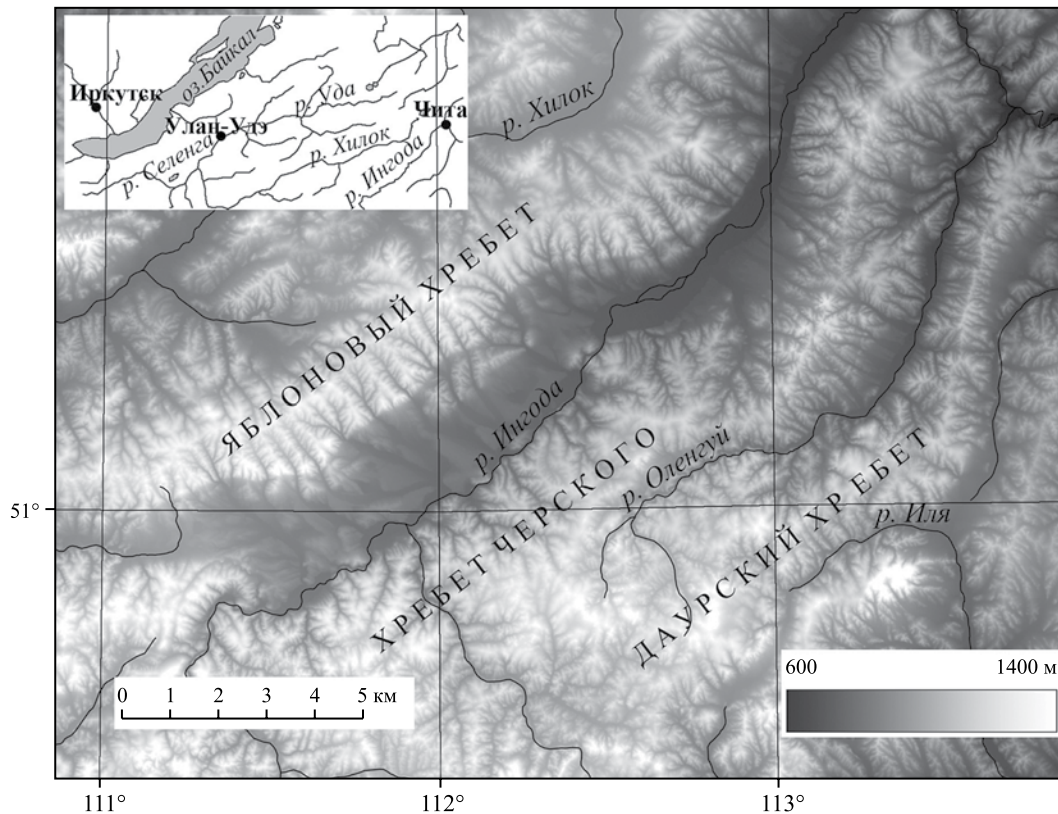


Рис. 1. ЦМР района исследования со значениями абсолютных высот.

участков впадины осложняется также чередованием мульд, разделенных поднятиями по поперечным разломам. Наклон фундамента приурочен то к юго-восточному, то к северо-западному борту впадины [5]. Вдоль юго-западной части впадины проходит глубинный разлом, разделяющий структурно-формационные зоны. Яблоневый хребет находится в Селенга-Витимской зоне, хребет Черского на данном участке – в пределах Хэнтей-Даурского сводового поднятия [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ЦМР исследуемой территории построена по данным “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) с разрешением 3 угловые секунды. Все вычисления проводились в программе “White Box” (<http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/Whitebox/>). Размер ячейки после перехода в систему координат UTM составил около 77 м. Фильтрация изображений выполнялась с помощью ФВЧ с несколькими размерами скользящего окна от 3 до 33 ячеек (или около 230–2500 м). Затем вычислялась линейная парная корреляция полученных изображений с исходными данными об абсолютных высотах (рис. 2), которая показала равномерное увеличение коэффициента корреляции с величиной

скользящего окна. Для сравнения был также получен ряд изображений с помощью “Фильтра Лапласа над гауссианом” (ЛГ-фильтр) с размером ядра свертки от 1 до 7 стандартных отклонений, которые оценивались по тем же показателям (см. рис. 2). Существует статистически достоверная корреляция между ФВЧ и ЛГ-фильтром с соответствующими параметрами (например,

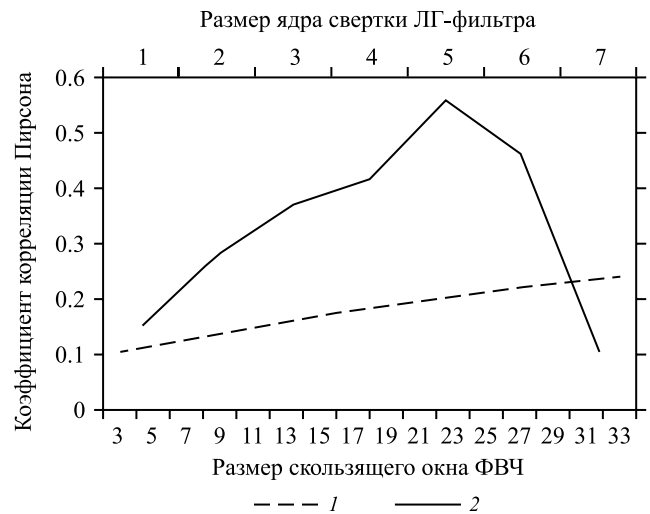


Рис. 2. Линейная парная корреляция ЦМР с изображениями после обработки: 1 – ФВЧ, 2 – ЛГ-фильтром.

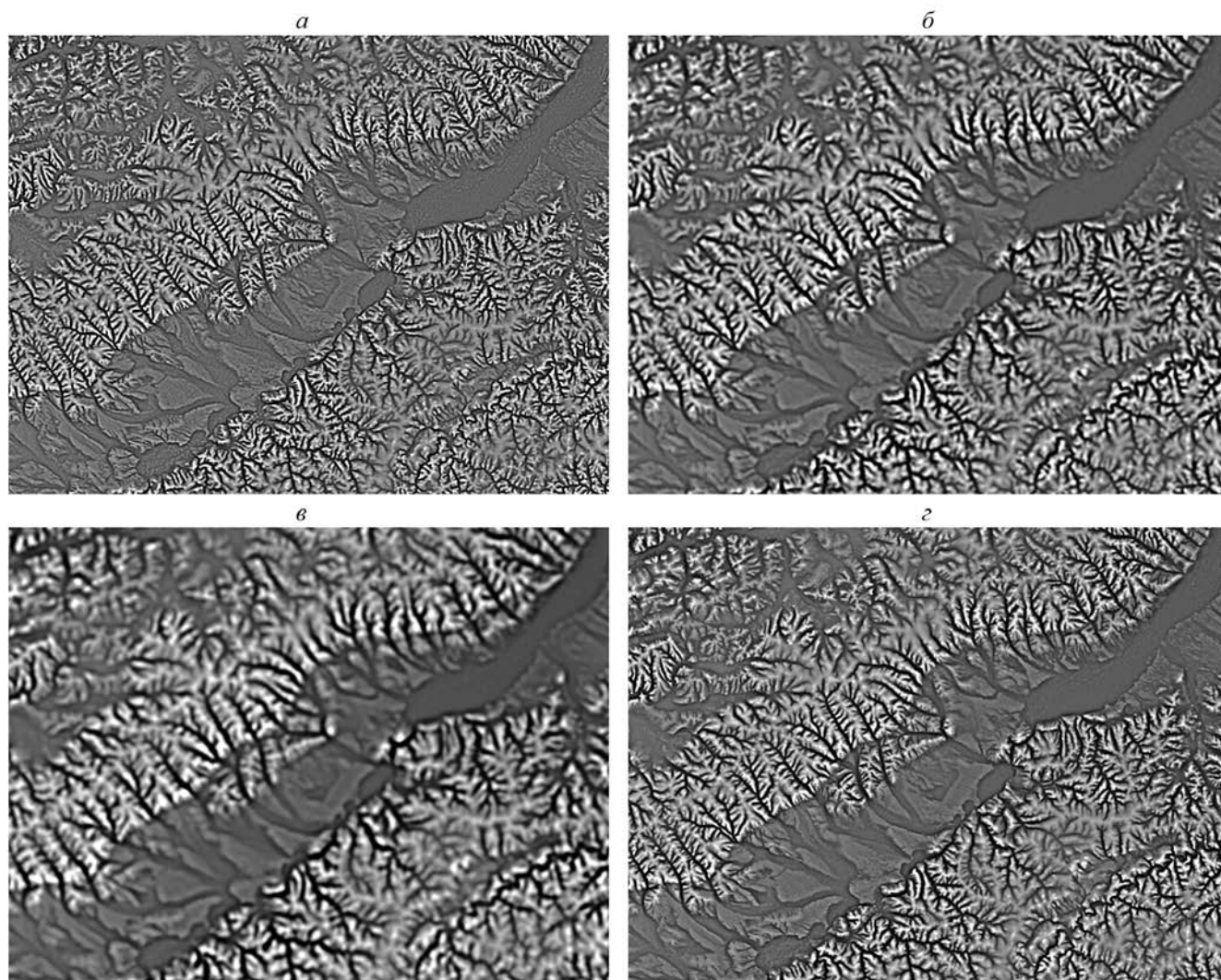


Рис. 3. Фрагмент изображения после обработки ЛГ-фильтром с ядром свертки: *а* – 2, *б* – 4 и *в* – 6 стандартных отклонений; *г* – первая компонента, полученная методом главных компонент из трех изображений *а*, *б*, *в*.

ФВЧ с размером скользящего окна 15 ячеек и ЛГ-фильтр с размером ядра свертки 2 стандартных отклонения имеют коэффициент линейной корреляции Пирсона около 0.99). Однако ЛГ-фильтр, по нашему мнению, физически более обоснован, так как учитывает ослабевание пространственных взаимосвязей с увеличением расстояния между географическими объектами.

Методом главных компонент построено три синтезированных изображения из трех исходных, обработанных ЛГ-фильтром с размерами ядра свертки 2, 4 и 6 стандартных отклонений. Первое задавалось исходя из минимального достаточного сглаживания и устранения большинства шумов и помех, последнее – как находящееся перед резким падением кривой на графике (рис. 2), 4 стандартных отклонения – как среднее значение. Изображение, содержащее первую компоненту,

имеет наибольшее сходство со всеми исходными и объясняет 79% общей дисперсии (см. рис. 3 и таблицу).

Для усиления резкости изображения выполнялось так называемое “выравнивание контрастности” (Contrast Stretch), которое модифицирует исходные значения ячеек в соответствии с заданным видом распределения. В данном случае гистограмма распределения подгонялась к нормальному закону при одновременном отбросе “хвостов” (т.е. редких значений, слишком малых и слишком больших) определенной величины.

На полученном изображении за счет тонового контраста визуально выделяются следующие формы рельефа (рис. 4): поверхности выравнивания – по “размытому” серому рисунку на вершинах хребтов; речные долины – по однородному

Характеристики изображений, полученных методом главных компонент из трех изображений, обработанных ЛГ-фильтром с размером ядра свертки 2, 4, 6 стандартных отклонения

Компоненты	Общая дисперсия, %	Накопленная дисперсия, %	Собственные значения	Факторные нагрузки		
				2	4	6
1	78.75	78.75	2.3624	0.87	0.96	0.83
2	17.24	95.98	0.5171	-0.46	-0.06	0.55
3	4.02	100	0.1206	-0.18	0.27	-0.12

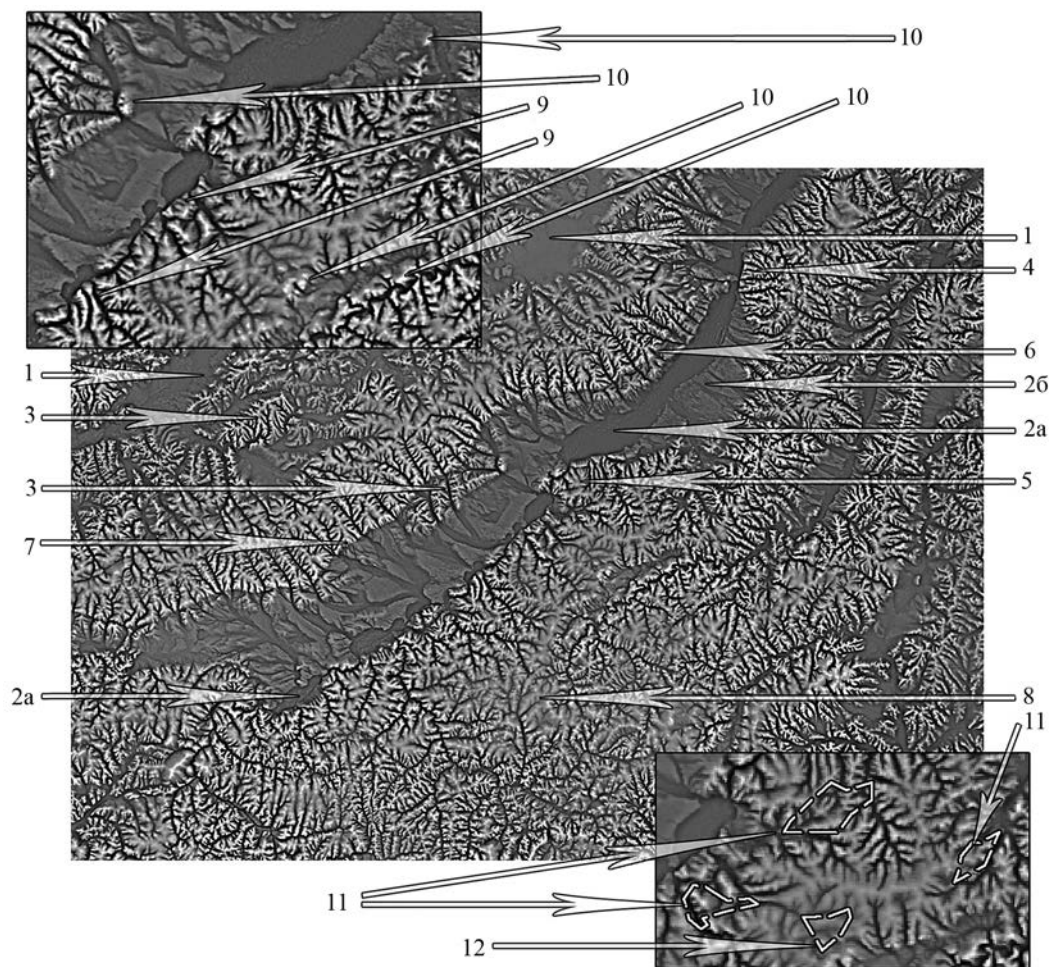


Рис. 4. Изображение первой компоненты, полученной из трех изображений после обработки ЛГ-фильтром с ядром свертки 2, 4, 6 стандартных отклонения и некоторые геологические структуры: 1 – сложенные меловыми отложениями; аллювиальные отложения: 2а – пойм, 2б – высоких надпойменных террас; 3 – среднеюрская харюлгатинская свита; 4 – Кукинский выступ, представленный раннетриасовым куналейским гранит-сиенитовым комплексом; 5 – Улетовское поднятие, сложенное раннепалеозойскими отложениями; 6 – глубинный разлом, 7 – надвиг, 8 – поверхности выравнивания, 9 – меловые базальты, 10 – вулканогенные породы и субвулканические тела, 11 – раннепалеозойский газимурский комплекс, 12 – нижне-меловая верхняя тургинская подсерия.

серому фону; границы пойм, террас, различные ступенчатые формы, например скальные стенки, уступы или отдельные останцы и другие формы с большими уклонами на краях, – по резкому переходу от светлого к темному тону. Отчетливо выделяется эрозионная сеть, представляющая собой

темные линии на светлом или сером фоне; чем они темнее, тем глубже врез и круче склоны. При этом выявляется характер расчлененности различных участков поверхности как по густоте, так и по глубине в зависимости от контраста между темным и светлым тоном: чем он больше, тем глубже

расчлененность. Участки, выделяющиеся возрастанием контраста, например светлые пятна, означают возвышенность по сравнению с окружением в определенном радиусе, темные – понижение, серые указывают на отсутствие резких изменений высоты.

При совмещении полученного изображения с геологической картой масштаба 1 : 500 000 [2] и при их сравнении видно, какие геологические структуры отчетливо выражены в рельефе, а какие – нет. Наиболее четко прослеживаются границы между долинными комплексами, сложенными меловыми и аллювиальными четвертичными породами, и горным обрамлением (см. рис. 4). На участке Аблатуй-Арта северо-западного борта Читино-Ингодинской впадины отчетливо выделяется конгломератовая толща, залегающая с угловым несогласием на юрских образованиях харюлгатинской свиты [5], она выглядит как обособленный вытянутый объект. Эта свита прослеживается и далее по северо-западному склону Яблонового хребта. Например, к ней относится сильно расчлененный по сравнению с окружением овальный объект. Хорошо видны Кукинский выступ фундамента (полукруглый с радиальным рисунком эрозионной сети большой контрастности), Улетовское поднятие (выдвинутое поперек впадины светлое пятно с черными линиями по сравнению с прилегающим серым фоном), тектонический уступ на северо-западном борту, связанный с крупным региональным разломом [1] (протяженная линия четкого контраста светлого и серого тонов), и некоторые другие разломы. Имеются также и менее очевидные признаки. Например, участки с возрастанием черно-белого контраста вдоль юго-восточного борта Читино-Ингодинской впадины указывают на цепочку меловых базальтов [5], светлые пятна – на некоторые вулканические породы и субвулканические тела. Геологические структуры, которые не видны при использовании данного метода, очевидно, в большей мере подверглись воздействию экзогенных факторов, не имеют четких границ, выраженных в рельефе. Например, на рис. 4 (врезка в нижнем правом углу) показаны участки раннепалеозойского газимурского комплекса и нижнемеловой верхней тургинской подсерии.

При размере ядра свертки, равном 7 стандартным отклонениям (и последующем выравнивании контрастности полученного изображения), возрастает масштаб выделяемых элементов, они более ярко проявляются (за счет увеличения контраста между светлыми и темными участками), и одновременно сглаживаются неоднородности внутри этих элементов, т.е. становятся неразличимыми составляющие их мелкие объекты (рис. 5). Более заметными

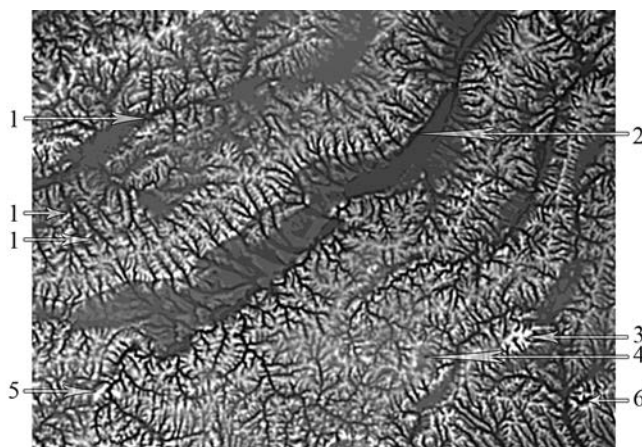


Рис. 5. Изображение после обработки ЛГ-фильтром с ядром свертки 7 стандартных отклонений: 1 – разломы, 2 – участок с большим перепадом высот вдоль левого борта впадины, 3 – позднеюрский джаргалантуйский вулканический комплекс, 4 – раннеюрские субвулканические образования сохондинского комплекса, 5 – раннепалеозойский ингодинский габбровый комплекс, 6 – позднеюрский кукульбейский лейкогранитовый комплекс.

становятся различия в расчлененности густой сетью коротких водотоков Яблонового хребта (южнее Кукинского выступа) по сравнению с протяженными и разветвленными водотоками хребта Черского. Резче становятся очертания наиболее врезанных и наиболее приподнятых участков, сужения и расширения долин водотоков, выровненных участков вершин хребтов, осевые линии хребтов. Согласно [1], в юго-западной части Читино-Ингодинской впадины до Улетовского поднятия поверхности блоков фундамента имеют наклон к правому борту, севернее поднятия – к левому борту. Это видно на северном участке по темной полосе вдоль левого борта впадины (см. рис. 5). Два наиболее ярких светлых пятна соответствуют участкам позднеюрского вулканического комплекса и раннепалеозойского габбрового комплекса, серое однородное пятно на водоразделе – раннеюрскому субвулканическому образованию, черная полоса, окаймленная белым фоном, – одному из участков лейкогранитового комплекса (см. рис. 5).

Интерес представляет изображение, полученное при сложении упомянутых выше изображений с картой абсолютных высот, с предварительным выравниванием контрастности для устранения различий единиц измерения в разных изображениях (рис. 6). Оно не имеет таких четких границ по сравнению с изображением после обработки ЛГ-фильтром, но более детальное по сравнению с картой абсолютных высот. При этом появляется дополнительная информация о соотношении высотных уровней тех или иных выделенных элементов и структур, а также их составных частей. Например, можно сравнить

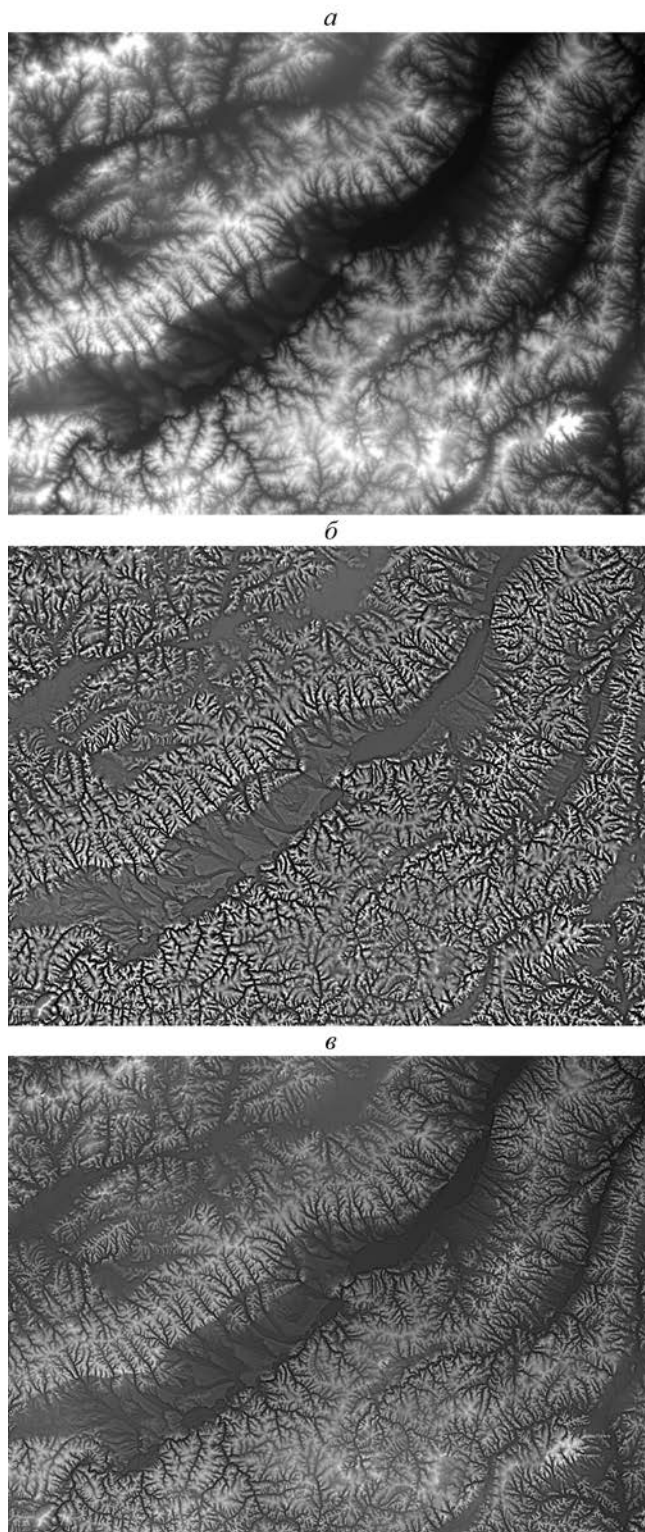


Рис. 6. Фрагмент изображения: *a* – после выравнивания контрастности ЦМР с абсолютными высотами, *б* – после выравнивания контрастности первой компоненты, полученной из трех изображений, обработанных ЛГ-фильтром с ядром свертки 2, 4, 6 стандартных отклонений, *в* – суммы изображений *a* и *б*.

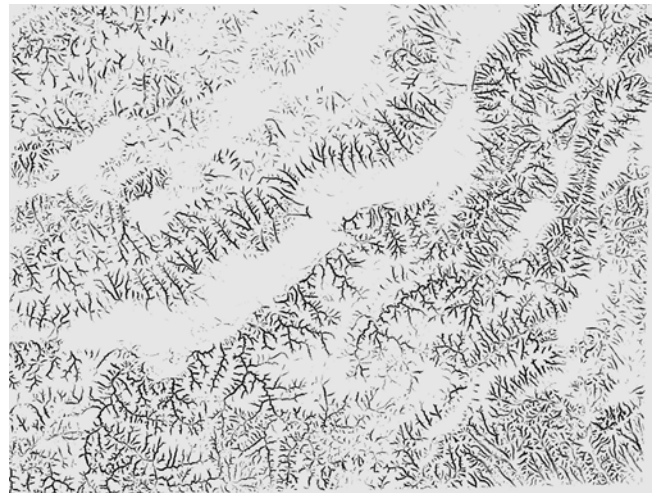


Рис. 7. Фрагмент дренажной сети.

между собой высотное положение межгорных впадин, а также различных частей хребтов.

Еще один результат исследования – возможность выделять с помощью ЛГ-фильтра дренажную сеть, если убрать светлые и оставить только темные тона (рис. 7). Причем мы получаем не только ее пространственные очертания, но и ширину и глубину, которые соответствуют насыщенности цвета, что можно рассматривать как альтернативу существующим методам, основанным на вычислении направления потоков воды (Flow Point, Flow Accumulation). Анализ дренажной сети (наряду с речной сетью) используется, в том числе, и для целей геологического изучения (например, [9]).

В заключение подчеркнем, что единицы измерения в представленных картах – не метры (или километры), а относящиеся только к этому типу изображений, или, после выравнивания контрастности, единицы насыщенности цвета.

ВЫВОДЫ

Методы обработки изображений, применяемые к цифровым моделям рельефа, представляют полезный инструмент в геоморфологических исследованиях. Они позволяют повысить объективность при выявлении отдельных геоморфологических единиц и их разграничении. Один из способов фильтрации изображений, делающий границы между разнородными объектами более четкими и улучшающий визуальное выделение этих объектов, – “Фильтр Лапласа над гауссианом” (ЛГ-фильтр). В зависимости от заданного размера ядра свертки более четкими становятся объекты разного масштаба.

Для получения изображений, совмещающих основные элементы разного масштаба, использован метод главных компонент. Применение данного метода для территории южной части Читино-Ингодинской впадины и ее горного обрамления показало, что он достаточно эффективен для выделения различных форм рельефа, их элементов и тех геологических структур, которые отчетливо выражены в рельефе. Для изучения соотношений высотных уровней выделенных элементов построена карта путем сложения обработанных ЛГ-фильтром изображений с картой высот, предварительно приведенных к одинаковым единицам измерения.

Кроме того, ЛГ-фильтр можно применять для выделения дренажной сети и получения ее пространственных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабашев Е.В., Сизиков А.И., Фомин И.Н. К геоморфологии Читино-Ингодинской впадины // Записки Забайкальского отдела географического общества СССР. Вып. 22. 1963. С. 71–76.
2. Геологическая карта Читинской области. Масштаб 1:500000 /Ред. И.Г. Рутштейн. М.: Изд-во МПГИТ, 1992.
3. Ермолаев О.П., Семёнов Ф.В. Использование цифровых моделей рельефа для морфометрического анализа тектонических структур и поиска россыпей аллювиального генезиса // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 142–147.
4. Костин А.В. Моделирование карты теневого рельефа Якутии средствами ГИС для прогнозирования потенциальных рудно-магматических систем //Наука и образование. 2010. № 1. С. 63–69.
5. Мезозойская тектоника Забайкалья /Отв. ред. И.В. Лучицкий. Новосибирск: Наука, 1975. 206 с.
6. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья /Отв. ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1974. 359 с.
7. Орлов Т.В., Садков С.А. Исследование карстового рельефа восточной части плато Лаго-наки методами высотного лазерного сканирования (LIDAR) и дешифрирования аэрофотоснимков высокого разрешения // Геоэкология. 2015. № 4. С. 365–376.
8. Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Применение теории масштабируемого пространства для выделения и анализа структур рельефа по радиолокационным данным //Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 45–52.
9. Сизиков А.И., Уфимцев Г.Ф. Анализ речной сети при изучении новейшей и современной тектоники Забайкалья //Геоморфологические и гидрологические исследования. М.: Изд-во Московского университета, 1968. С. 45–53.
10. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа //Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пушкино, 2010. 42 с.
11. Lindsay J.B., Cockburn J.M.H., Russell H.A.J. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis //Geomorphology. 2015. Vol. 245. P. 51–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.025>.
12. Pirasteh S., Pradhan B., Safari H.O., Ramli M.F. Coupling of DEM and remote-sensing-based approaches for semi-automated detection of regional geostructural features in Zagros mountain, Iran //Arabian Journal of Geosciences. 2011. DOI: 10.1007/s12517-011-0361-0.
13. Reimold W.U., Cooper G.R.J., Romano R., Cowan D.R., Koeberl C. Investigation of Shuttle Radar Topography Mission data of the possible impact structure at Serra da Cangalha, Brazil //Meteoritics & Planetary Science. 2006. 41. N2. P. 237–246.
14. Smith M.J., Clark C.D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping //Earth Surface Processes and Landforms. 2005. 30. P. 885–900. DOI: 10.1002/esp.1210.

REFERENCES

1. Barabashev, E.V., Sizikov, A.I., Fomin I.N. *K geomorfologii Chitino-Ingodinskoi vpadiny* [Geomorphology of Chita-Ingoda depression]. *Zapiski Zabaikal'skogo otdela geograficheskogo obshchestva SSSR* [Notes of TransBaikal branch of the USSR geographic society]. Chita, 1963, vol. 22, pp. 71–76 (in Russian).
2. *Geologicheskaya karta Chitinskoi oblasti. Masshtab 1:500000*. [Geologic map of Chita area. Scale 1:500000]. Rutschstein, I.G., Editor-in-chief, Moscow, MPGIT Publ., 1992 (in Russian).
3. Ermolaev, O.P., Semenov, F.V. *Ispol'zovanie tsifrovyykh modelei rel'efa dlya morfometricheskogo analiza tektonicheskikh struktur i poiska rossypei allyuvial'nogo genезisa* [Use of digital terrain models in morphometric analysis of tectonic structures and prospecting of placers of alluvial genesis]. *Geografіa i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2014, no. 1, pp. 142–147 (in Russian).
4. Kostin, A.V. *Modelirovanie karty tenevogo rel'efa Yakutii sredstvami GIS dlya prognozirovaniya potentsial'nykh rudno-magmaticheskikh sistem* [Modeling of Yakutia shaded relief map using GIS for the purpose of detection of ore-magmatic structures]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education]. 2010, no. 1, pp. 63–69 (in Russian).
5. *Mezozoiskaya tektonika Zabaikal'ya* [Mesozoic tectonics of TransBaikal region], Luchitskii I.V., Editor-in-chief, Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 206 p. (in Russian).

6. Nagor'ya Pribaikal'ya i Zabaikal'ya [Uplands of Trans- and CisBaikal regions], Florensov, N.A., Editor-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1974. 359 p. (in Russian).
7. Orlov, T.V., Sadkov, S.A. *Issledovanie karstovogo rel'efa vostochnoi chasti plato Lago-naki metodami vysotnogo lazernogo skanirovaniya (LIDAR) i deshifrirovaniya aerofotosnimkov vysokogo razresheniya* [Investigation of karst relief in the eastern part of Lago-naki plateau by LIDAR and high-resolution airborne images]. *Geoekologiya* [Geoecology]. 2015, no. 4, pp. 365–376 (in Russian).
8. Rybas, O.V., Gilmanova, G.Z. *Primenenie teorii masshtabiruemogo prostranstva dlya vydeleniya i analiza struktur rel'efa po radiolokatsionnym dannym* [Application of scale-space theory for the selection and analysis of relief structures]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing]. 2011, no. 6, pp. 45–52 (in Russian).
9. Sizikov, A.I., Ufimtsev, G.F. *Analiz rechnoi seti pri izuchenii noveishei i sovremennoi tektoniki Zabaikal'ya* [Analysis of stream network for the study of the newest and recent tectonics in Transbaikal region]. *Geomorfologicheskie i gidrologicheskie issledovaniya* [Geomorphologic and hydrologic research]. Moscow, Mosk. gos. univ. Publ., 1968, pp. 45–53 (in Russian).
10. Florinskii, I.V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'efa* [Theory and applications of mathematically cartographic relief modeling]. Extended abstract of Doctoral Sci. (Techn.) Diss., Pushchino, 2010, 267 p. (in Russian).
11. Lindsay, J.B., Cockburn, J.M.H., Russell, H.A.J. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. *Geomorphology*, 2015, vol. 245, pp. 51–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.025>.
12. Pirasteh, S., Pradhan, B., Safari, H.O., Ramli, M.F. Coupling of DEM and remote-sensing-based approaches for semi-automated detection of regional geostructural features in Zagros mountain, Iran. *Arabian J. Geosci*, 2011. DOI: 10.1007/s12517-011-0361-0.
13. Reimold, W.U., Cooper, G.R.J., Romano, R., Cowan, D.R., Koeberl, C. Investigation of Shuttle Radar Topography Mission data of the possible impact structure at Serra da Cangalha, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41, no. 2, pp. 237–246.
14. Smith, M.J., Clark, C.D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, no. 30, pp. 885–900. DOI: 10.1002/esp.1210.

DIGITAL ELEVATION MODEL TRANSFORMATION FOR THE GEOMORPHOLOGIC ANALYSIS

V. Yu. Abakumova

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Nedorezova, bld. 16a, Chita, 672014 Russia. E-mail: faith-sh@mail.ru*

The article is devoted to methods of digital elevation model filtering and contrast stretching. These methods allow finding geomorphologic units with different terrain features. The study area is the southern part of Chita-Ingoda depression in Zabaikalskii kray (Transbaikalia, Russia), its catchment area and adjoining mountain ridges. Digital elevation model for the study area is based on 3-arcsecond Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM data. All estimations have been done in White Box Geospatial Analysis Tools, a free soft, developed by J. B. Lindsay. High-pass filters with a number of filter sizes and the Laplacian of Gaussian filters with a number of convolution kernels have been used to emphasize the spatial heterogeneity. The derived images have close correlation, but the Laplacian of Gaussian filter seems to be a more relevant spatial filter. The Principal Component Analysis has been used to get the multi-scale images. Input images for Principal Component Analyses are three images which have been derived by applying of Laplacian of Gaussian filters with 2, 4, 6 standard deviations convolution kernels. The first component image contains the greatest amount (79%) of explained variance, so it has been compared with geologic map of the study area. The edges of Cretaceous and alluvial Quaternary geologic structures are the clearest. The edges of tectonic terraces, some Jurassic structures, effusive structures, big regional faults, planation surfaces on hill tops are also clear enough. In addition, the sum of the first component image and the elevation image has been done. After the input images were contrast stretched, they were summed. The output image allows getting more information about geomorphologic units. The proposed method may be useful for the study of erosion extent, fluvial activity, and drainage network.

Key words: *digital elevation model, spatial filtering, Laplacian of Gaussian filter, Principal Component Analysis, spatial heterogeneity, geomorphologic units.*