



УДК 551.4.011.02:(528.92:001.891.54)(571.15)

ГИС-КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МОРФОКОМПЛЕКСОВ ЧУЙСКОЙ КОТЛОВИНЫ НА ОСНОВЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Д. А. Чупина, И. Д. Зольников, В. А. Лямина

Предложен подход к автоматическому картографированию генетических типов рельефа по морфометрическим показателям на основе управляемых классификаций, которые успешно используются для распознавания ландшафтов на мультиспектральных космоснимках. Классификации реализуются в виде последовательной серии по дереву решений; при этом все выделенные типы рельефа отчлняются от анализируемых при помощи масок. Методика апробирована на примере четвертичного рельефа днища Чуйской котловины. Подход имеет ряд достоинств и ограничений. Разработанная технология перспективна для построения геоморфологических карт при среднемасштабном ландшафтном и геологическом картографировании.

Ключевые слова: морфометрия, морфокомплексы, управляемые классификации, геоморфологическое районирование.

GIS-MAPPING OF CHUISK DEPRESSION MORPHOCOMPLEXES BASED ON MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS

D. A. Chupina, I. D. Zolnikov, V. A. Lyamina

The article introduces approach to automatic mapping of topography genetic types according to the morphometric data which is based on supervised classification being successfully used to identify landscape on the multispectral space images. Classifications are realized as a successive series through a solution tree; in doing so all distinguished topography types are separated from the analyzed ones by means of masks. The technique was evaluated by working at quaternary topography of ChuisK depression bottom. This approach has several advantages, as well as some restrictions. The developed technique is promising for geomorphological mapping at the medium-scale landscape and geological mapping.

Key words: morphometry, morphocomplexes, supervised classification, geomorphological zoning.

Морфометрический анализ рельефа используется в геологических исследованиях уже более полувека. В России это научное направление приобрело популярность при поиске тектонических структур для прогноза нефтегазоносности [14]. Однако большая трудоемкость метода ограничила его применение и постепенно снизила интерес к его изучению. На рубеже XX и XXI вв. внимание к морфометрическому анализу рельефа снова возросло в связи с бурным развитием персональных компьютеров и геоинформационных технологий. В результате область предметно-тематического применения морфометрического анализа существенно расширилась. В частности, новейшие методы морфологических исследований активно применяются в экологическом картографировании [7]. Эффективны они и при картографировании подводного рельефа [8]. Не вдаваясь в перечисление примеров применения, отметим, что современный этап геоморфологических исследований характеризуется активным использованием ГИС-технологий для районирования территорий и картографирования форм и типов рельефа. Но степень внедрения геоинформационных методов в геоморфологическое картографирование существенно различается у представителей разных научных и образовательных орга-

низаций. До сих пор остро ощущается недостаток стандартных методик, пригодных для тиражирования с целью решения производственных задач, в частности при геологическом и ландшафтном картографировании. Для решения этих задач авторами статьи предлагается использование методов управляемых классификаций, обычно применяемых для распознавания объектов на мультиспектральных космических снимках.

Состояние вопроса

Морфология земной поверхности – одна из составляющих геоморфологической триады, которая используется для картографирования рельефа (морфология, генезис и геологический возраст рельефа) [10]. Изначально характеристика морфологических особенностей территорий описывалась обыденным языком. После создания топографических карт возникли сравнительная морфология и сравнительная морфометрия, появились первые морфометрические коэффициенты и карты. Однако морфометрические работы не стали приоритетными в связи с тем, что основное значение придавалось двум другим элементам триады – происхождению и возрасту. Это было обусловлено ориентацией отечественной геоморфологии на нужды геологической съемки и поиска полезных ископаемых. Соответственно, существовал повышенный спрос на развитие



историко-генетического направления в исследованиях рельефа.

С появлением географических информационных систем (ГИС) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) были сняты технические сложности и понижена трудоемкость морфометрических исследований. Это привело к бурному развитию методов морфометрического анализа земной поверхности на основе использования новейших технологий. В результате появились новые идеи, нередко вступающие в конфликт с положениями классической геоморфологии. Проблемам современной теоретической геоморфологии был посвящен Иркутский геоморфологический семинар, по результатам которого опубликованы два сборника [11, 12]. Их анализ показывает, что в настоящее время сформировались альтернативные подходы к изучению морфологии рельефа.

Наиболее классическое направление ставит во главу угла генезис и возраст. Так, например, по мнению Ю. П. Селиверстова, рельеф – это «комплекс форм, отражающих специфические черты субстрата конкретного происхождения и в определенное время» [11, с. 12], а с точки зрения Д. А. Тимофеева, чисто морфологические классификации играют «вспомогательную роль в общих типизациях рельефа земной поверхности» [11, с. 7]. Таким образом, в рамках классической геоморфологии роль морфологического анализа традиционно ограничивается выделением индикаторов, которые эффективны для историко-генетической диагностики форм и типов рельефа.

Оппоненты данного подхода вполне справедливо указывают: далеко не всегда однотипная морфология свидетельствует о схожести происхождения, что связано с процессами дивергенции и конвергенции. Еще более сложна проблема возрастной диагностики, так как геологические методы применимы лишь для аккумулятивных форм рельефа и не могут быть использованы непосредственно для определения возраста выработанного (денудационного) рельефа. Кроме того, рельефообразующие процессы нередко протекают одновременно, и не всегда легко разрешим вопрос, какой из них в наибольшей степени определяет генезис рельефа.

Альтернативный подход предложен А. Н. Ласточкиным. По его мнению, морфология может быть описана и исследована на количественной основе вне наших субъективных представлений о генезисе и возрасте рельефа; структурный анализ должен основываться на учении о симметрии и учитывать такие характеристики, как анизотропия, сложность рельефа и др. Достижения математических методов и компьютерных технологий при морфологическом описании и анализе земной поверхности позволили ему утверждать, что уже можно говорить о смене историко-генетической парадигмы на морфодинамическую: «Морфология изучаемых объектов отражает

создавшие ее и преобразовавшие их процессы, имевшие место в прошлом, и определяет происходящие ныне и ожидаемые в обозримом будущем потоки и переносимые вещество и энергию» [8, с. 102]/

Однако морфодинамическая концепция пока сложна для восприятия и находится в стадии концептуально-методической разработки. Так, например, Ю. И. Лоскутов считает: для того чтобы этот методический подход в будущем позволил геоморфологии стать точной наукой, необходимо «...готовить новые кадры геоморфологов, у которых не будет психологического барьера в восприятии идей „формализованной“ геоморфологии» [12, с. 91]. Поэтому, несмотря на успешное использование морфодинамической концепции А. Н. Ласточкина в ряде прикладных задач, до сих пор среди геоморфологов она не завоевала статуса общепринятой концептуальной основы.

Синтез классической геоморфологии и новейших технологий реализуется в современной объяснительной морфометрии рельефа, ориентированной на раскрытие связей количественных характеристик рельефа с его происхождением [13]. В рамках этого подхода оказывается возможной математизация описания и анализа форм земной поверхности, элементов, из которых они состоят, и комплексов, которые они образуют. Оставляя в стороне новейшие методики выделения форм земной поверхности и их элементов (граней, ребер и точек по [3]), остановимся на проблеме изучения структуры рельефа. В данном случае объектами выделения и картографирования на ЦМР мелкого пространственного разрешения выступают морфокомплексы, которые представляют собой закономерные сочетания форм земной поверхности, обладающие сходством происхождения.

В связи с изложенным мы считаем перспективной разработку методик, которые позволяли бы распознавать генетические типы рельефа по морфометрическим показателям. Такие методики реализованы и неоднократно апробированы в системах обработки цифровых изображений. К ним, в частности, относятся управляемые классификации, применяемые для многомерного анализа яркостных характеристик каналов мультиспектральных космических снимков при картографировании и мониторинге ландшафтов, природно-территориальных комплексов (ПТК), геологических и других объектов. Имея достаточно большой опыт работы с указанными методиками [5], авторы статьи пришли к идее выделения морфокомплексов на основе использования классификаций с обучением по наборам ключевых морфометрических характеристик. Апробации выдвинутой идеи и посвящена данная публикация.

Объект и методика исследования

Методика апробирована на примере рельефа днища Чуйской межгорной котловины, длина

которой с юго-востока на северо-запад достигает 80 км, а ширина в субмеридиональном направлении 36 км (рис. 1). С северной стороны котловину ограничивает Курайский хребет, с юга – Южно-Чуйский хребет и плато Сайлюгем. Западный борт представлен отрогом Северо-Чуйского хребта и Чаган-Узунским горным массивом, восточный – Тапдуайрским горным массивом и северо-восточным окончанием Сайлюгемского плато. Днище имеет слабо вогнутую форму. Самые низменные участки находятся в северо-западной части котловины. К востоку и югу происходит пологое воздымание. В юго-восточной части котловины ширина выровненного днища сокращается за счет выступа Сайлюгемского плато.

Чуйская степь в геоморфологическом отношении изучена детально. Общий обзор геолого-геоморфологических исследований этого района дан в [4, 6]. Центральная ее часть занята лимногляциальной равниной, которая местами расчленена аллювиальными и флювиогляциальными образованиями. Днище котловины обрамляется слившимися делювиально-пролювиальными шлейфами горных подножий. На юго-восточной окраине распространены гляциокомплексы. Такой разнообразный и вместе с тем ограниченный набор генетических типов рельефа дает возможность адекватной проверки предложенной методики на достаточно представительных выборках для морфометрического анализа.

В настоящее время насчитывается множество морфометрических показателей. Это связано с возникновением новых задач, привлечением новых картографических и аэрокосмических материалов, исследованием ранее не изучавшихся объектов. Но все они, как отмечает А. М. Берлянт, базируются на фундаментальных морфометрических показателях, таких как абсолютные и относительные высоты, глубина и густота расчленения, уклоны и градиенты, конфигурация элементов орогидрографии [1]. Соответственно, большинство из них может быть получено из ЦМР. В нашем случае основой послужила цифровая модель рельефа по данным SRTM с разрешением 90×60 м, приведенная к размеру пикселя 90×90 м.

Бесспорно, что при указанной величине пикселя ЦМР какие-то формы земной поверхности могут попадать в него полностью, а какие-то лишь частично. Подбирая размер скользящего окна так, чтобы в него попадали основные формы земной поверхности, характерные для изучаемой территории, можно получить сетки усредненных морфометрических показателей, отражающие наиболее распространенные здесь типы рельефа. В результате серии экспериментов был выбран размер окна 1260 м (диаметр окна – 14 пикселей ЦМР по SRTM).

Очевидно, что в горной области морфометрические показатели даже в районе выровненного днища котловины будут отражать два фактора.

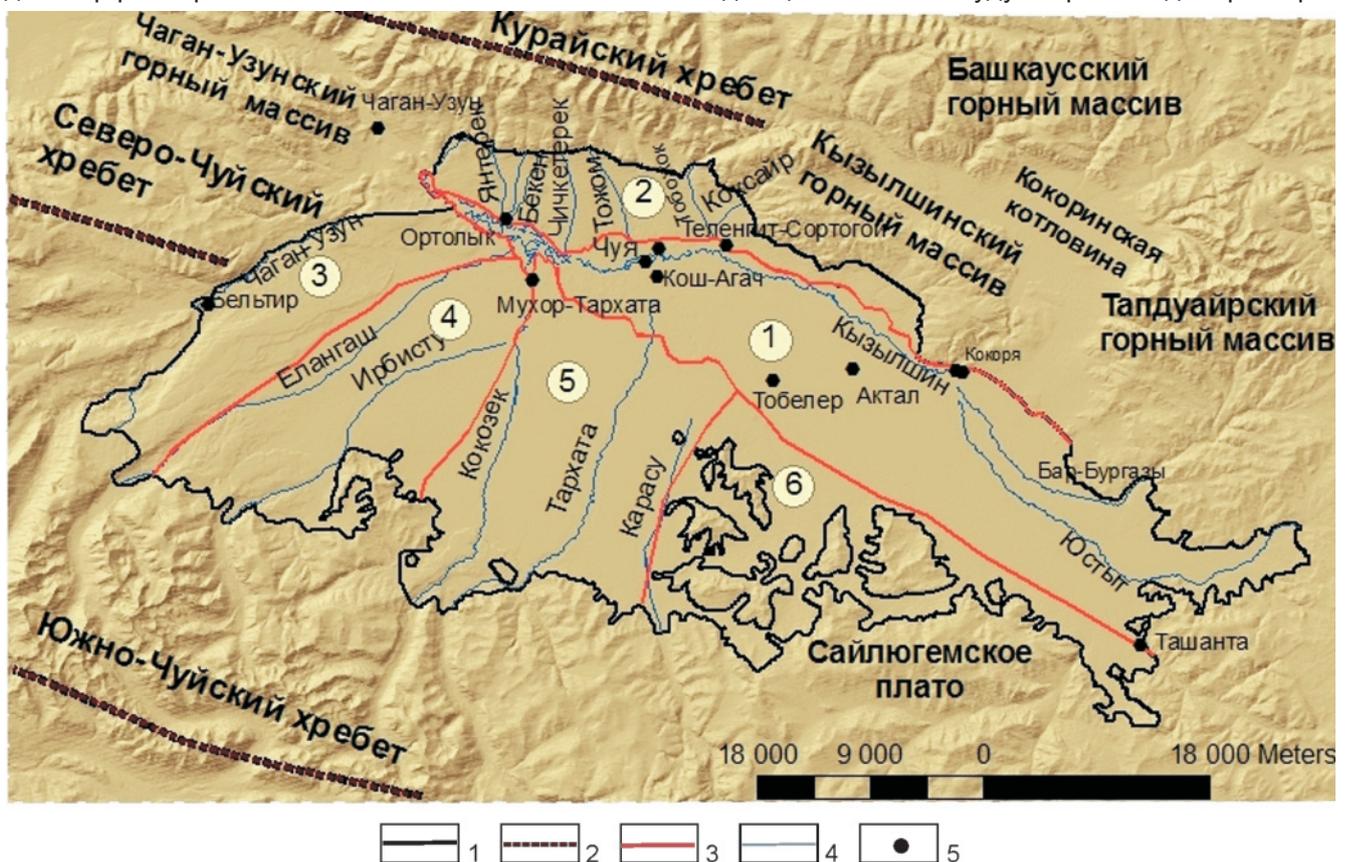


Рис. 1. Схема неотектонического районирования Чуйской котловины

1 – граница днища Чуйской котловины; 2 – направления хребтов; 3 – границы геоморфологических сегментов; 4 – реки; 5 – поселки



На структуру рельефа влияет неотектоническая история, т. е. характер новейших движений тектонических блоков, а кроме того, специфика экзогенных процессов разного генезиса. Для картографирования морфокомплексов необходимо выявить вклад каждого из факторов в морфометрические характеристики рельефа изучаемой территории.

Анализ наиболее часто используемых морфометрических характеристик показал, что неотектоническая ситуация прежде всего выражается в значениях абсолютных высот, углов наклона и азимутальной экспозиции склонов («абсолютные» морфометрические показатели). Это обусловлено тем, что рельеф однотипного происхождения, расположенный на разновысотных поверхностях с разными уклонами и экспозициями, различается по этим абсолютным морфометрическим характеристикам. Например, для неотектонического блока, являющегося фрагментом озерной равнины, севернее долины р. Чуя угол наклона составляет 5° , и по значению этого морфометрического параметра данный озерный морфокомплекс будет схож с делювиально-пролювиальными шлейфами. Таким образом, было выяснено, что, прежде чем выделять генетические комплексы четвертичного рельефа, необходимо провести неотектоническое районирование по абсолютным морфометрическим показателям. В свою очередь, морфокомплексы, образованные экзогенными процессами разного генезиса, выделялись преимущественно на основе относительных морфометрических показателей, представляющих собой разницу максимальных и минимальных значений признака (диапазон значений), вычисляемых внутри скользящего окна.

Для выделения морфокомплексов использовались 8 наиболее простых показателей, непосредственно вычисляемых из ЦМР. Это средние значения 1) углов, 2) высот, 3) субмеридиональных и 4) субширотных аспектов, а также диапазон 5) углов, 6) высот (вертикальная расчлененность), 7) субмеридиональных и 8) субширотных аспектов.

Кроме того, используются новые азимутальные показатели, введенные в связи с тем, что напрямую экспозиция склонов не может быть использована в сопряженном анализе вместе с другими морфометрическими признаками. Это связано с тем, что азимут падения склона имеет шкалу значения от 0 до 360° . Следовательно, для склонов северной ориентировки характерны значения от 0 до $22,5^\circ$ и от $337,5$ до 360° .

Для того чтобы преобразовать шкалу значений от 0 до 360° ($0 = 360^\circ$) в шкалу порядка, построены два показателя – отклонения от восточного (субширотная проекция) и северного (субмеридиональная проекция) направлений. В субмеридиональной проекции восточные и западные значения приравниваются друг к другу, а южные и северные принимают значения от 0 до 180 соот-

ветственно. Далее эти значения нормируются на максимум, в результате чего 0 соответствует северному направлению, 1 – южному. В субширотной проекции северные и южные значения приравниваются друг к другу, а восточные и западные приобретают значения от 90 до 270. При нормировке они также приобретают значения от 0 до 1 соответственно. Таким образом, эти параметры в комплексе заменяют традиционную экспозицию склонов, но в отличие от нее позволяют выделять максимальное и минимальное значения, а также их разность.

Технологическая схема данной методики может быть представлена в следующем виде. Сначала строится (например, по топооснове с изолиниями и абсолютными отметками) или выбирается ЦМР, а по ней, в свою очередь, – абсолютные морфометрические показатели (углы и экспозиции). На основе их анализа проводится неотектоническое районирование. Затем в скользящем окне рассчитываются относительные морфометрические показатели.

Каждый морфометрический показатель оценивается с точки зрения эффективности для распознавания морфогенетических комплексов земной поверхности. Рассматриваются особенности распределения самого параметра, его разделение на отдельные интервалы значений и то, каким образом эти интервалы соотносятся с морфогенетическими комплексами. Очевидно, что по одному показателю невозможно выделить все генетические типы рельефа. Поэтому на основе анализа каждого из морфометрических показателей выявляется, по каким из них генетические типы рельефа схожи между собой, объединяются в группировки, а по каким с большей или меньшей степенью надежности разделяются.

На основе покомпонентного анализа строится ветвящаяся схема дихотомического разбиения рельефа на отдельные типы и их группировки. Для каждой точки ветвления подбираются наиболее эффективные морфометрические показатели или их сочетания, которые нормируются на максимумы и конвертируются в формат TIF. Затем изображения подгружаются в виде каналов в программный пакет ENVI для дальнейшей классификации с обучением на эталонных участках методами *максимального правдоподобия* и *расстояния Махалонобиса*. В качестве эталонных участков выбирались районы с рельефом, наиболее однозначно интерпретируемым в генетическом аспекте по данным государственного геологического картирования и материалам полевых исследований авторов [4]. На основе разработанной дихотомической схемы, о которой уже говорилось, применяется не общая классификация для всех морфокомплексов сразу, а ветвящаяся серия классификаций.

Распознавание типов рельефа проводится по каждому неотектоническому сегменту отдель-



Морфометрические характеристики морфокомплексов

Морфокомплекс	Средние значения				Диапазон			
	углов	высот	аспектов		углов	высот	аспектов	
			субширотных	субмеридиональных			субширотных	субмеридиональных
Гляциальный ложбинно-грядовый	0,2–1,0	0,1–0,35	0,2–0,6	0,15–0,7	0,2–0,4	0,2–0,5	0,5–1,0	0,6–0,9
Эрозионный ложбинно-овражный	0,07–0,2	0,13–0,2	0,6–0,8	0,2–0,7	0,15–0,25	0,07–0,25	0,4–0,8	0,3–0,9
Делювиально-пролювиальный	0,2–0,5	0,06–0,16	0,2–1,0	0,0–1,0	0,07–0,2	0,05–0,15	0,2–1,0	0,3–1,0
Озерный на морене	0,04–0,4	0,03–0,06	0,05–0,25	0,2–0,5	0,04–0,07	0,02–0,03	0,25–0,4	0,25–0,55
Озерный на алевропесках	0,03–0,23	0,02–0,04	0,25–0,6	0,05–0,15	0,02–0,04	0,02–0,03	0,4–0,75	0,25–0,55
Озерный с барами	0,1–0,3	0,02–0,04	0,5–0,9	0,1–0,3	0,3–0,4	0,03–0,05	0,7–0,9	0,5–0,9
Аллювиальный долины р. Чуя	0,0–0,15	0,0–0,1	0,5–0,8	0,25–0,5	0,0–0,2	0,0–0,03	0,99–1,0	0,99–1,0
Аллювиальный притоков	0,0–0,3	0,3–0,4	0,0–1,0	0,2–0,4	0,05–0,08	0,04–0,1	0,7–0,9	0,5–0,7
Аллювиальный врезанных долин	0,6–1,0	0,3–1,0	0,3–0,85	0,1–0,8	0,4–1	0,4–1,0	0,3–0,7	0,2–0,3
Термокарстовый	0,0–0,03	0,03–0,05	0,4–0,6	0,3–0,7	0,03–0,05	0,05–0,12	0,96–1,0	0,7–1,0

но. Сначала сегмент разделяется на расчлененные и равнинные участки. Далее для повышения точности классификаций по выделенным участкам строятся маски – векторы, ограничивающие пространство, внутри которого будет проводиться классификация. При каждом последующем шаге уменьшается пространство распознавания и количество выделяемых классов рельефа.

Следует отметить, что предлагаемый авторами статьи подход не всегда позволяет распознать те типы рельефа, которые, например, выделяются на картах генетических типов четвертичных отложений. Проблему представляет также разделение морфокомплексов по возрасту. Так, например, по морфометрическим показателям оказались неразличимы гляциокомплексы максимального и первого постмаксимального оледенений, которые выделялись предшественниками [2]. Не удалось выделить в качестве отдельного морфокомплекса волноприбойные озерные уступы на периферии котловины, а также расчленить аллювиальный рельеф Чуйской долины на разновозрастные террасы. Кроме того, аллювиальные отложения притоков не на всем своем протяжении проявляются по морфометрическим показателям ЦМР данного пространственного разрешения. С другой стороны, удалось, например, вычленить термокарстовый рельеф, примыкающий к Чуйской долине, и разделить озерный рельеф на подтипы. Сказанное обусловлено тем, что предлагаемый авторами статьи подход к автоматическому картографированию морфокомплексов базируется на анализе морфометрических характеристик, а генетические типы рельефа выделялись предшественниками в том числе и на основе изучения четвертичных отложений, слагающих эти формы и типы рельефа. Эти ограничения следует учитывать при использовании предлагаемого под-

хода, поскольку не всегда генетические модели, которые используются исследователями, проявляются в морфометрических характеристиках. Но нередко начинают выделяться статистически обусловленные новые типы рельефа, на которые до морфометрического анализа исследователь не обращал внимания.

Морфометрический анализ и выделение морфометрических комплексов

В таблице приведены значения морфометрических показателей для разных морфокомплексов Чуйской котловины (нормированы на максимум). Видно, что диапазоны рассматриваемых признаков часто перекрываются у разных морфологических комплексов, что, собственно, и обуславливает трудность непосредственного распознавания изучаемых типов рельефа.

Объекты, не различимые по одному из показателей, как правило, разделяются при сопряженном анализе пары или более показателей посредством кластерного анализа. Кроме того, повысить точность разделения позволяет предварительное районирование территории на неотектонические сегменты. Разграничение пространства распознавания и количества выделяемых классов рельефа достигается путем построения масок.

Как уже говорилось, фундамент Чуйской котловины имеет блочное строение. При морфометрическом анализе выделяются несколько основных крупных геоморфологических сегментов (см. рис. 1), которые предопределяли направление перераспределения обломочного материала от бортов к внутренней части впадины. Первым сегментом можно считать Чуйско-Кызылшинско-Юстыд-Барбургазинское понижение, расширяющееся и постепенно воздымающееся с северо-запада на юго-восток. К северу расположен второй

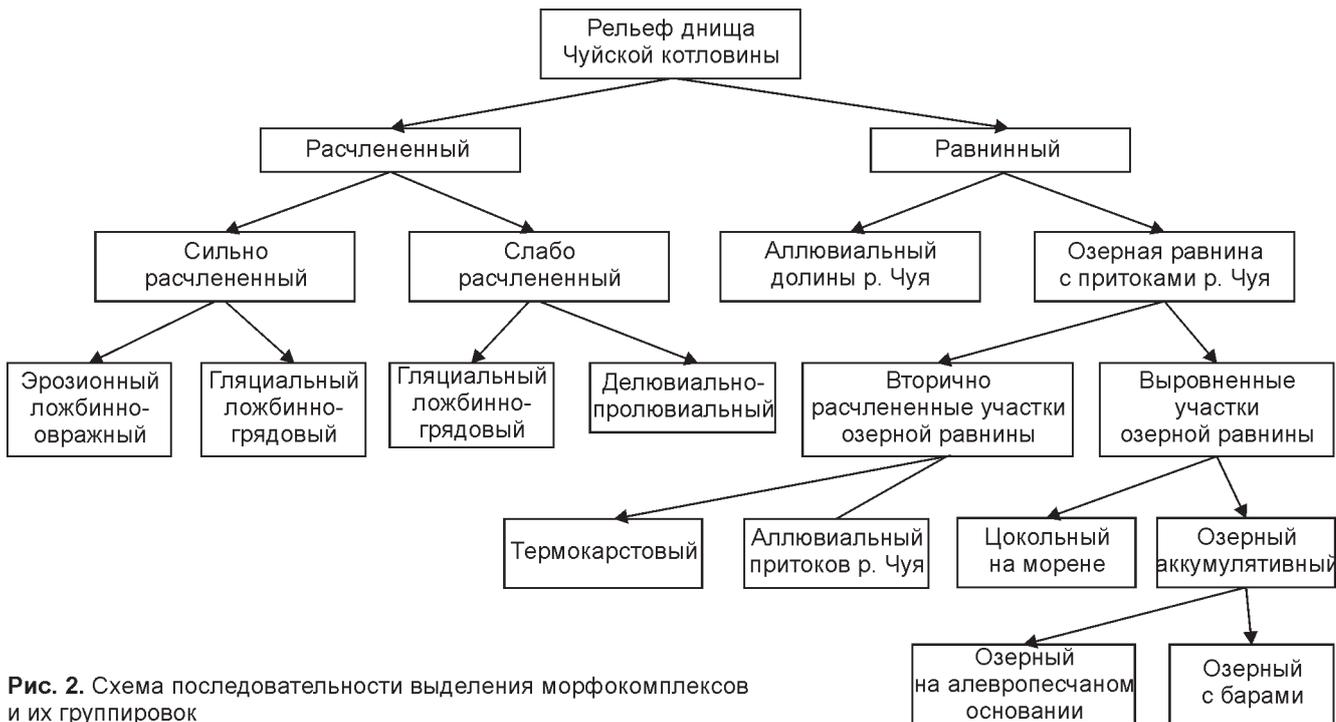


Рис. 2. Схема последовательности выделения морфокомплексов и их группировок

сегмент – предгорная равнина, слабо наклоненная на юг. Эти сегменты сочленяются по достаточно резкому геоморфологическому перегибу. От западной окраины котловины примерно до левобережья р. Елангаш находится третий сегмент, осложненный ледниковыми формами рельефа и геоморфологическими уступами неотектонической природы. Его поверхность наклонена на север с вариациями углов падения 2–5–10°. К юго-востоку от него четвертый сегмент дна Чуйской котловины четко отчленяется по линейной границе за счет выполаживания углов падения склонов (в среднем 0,5–2°) и переходом азимутов падения на северо-восточно-восточное направление. Пятый сегмент, не отличаясь от четвертого по углам падения, тем не менее четко отделяется по резкой смене азимутов падения на северо-северо-восточный. Шестой сегмент представляет собой фрагментированный на разнонаправленные грани останец Сайлюгемского плато, уходящий пологим уступом под четвертичный чехол, закрывающий дна Чуйской котловины.

В соответствии со схемой ветвления классификаций (рис. 2) по большинству показателей дна котловины может быть разделено прежде всего на равнинные и расчлененные участки как внутри каждого неотектонического сегмента, так и в целом. Внутри равнинного рельефа по минимальным значениям средних углов и диапазона высот от озерной равнины отделяется долина р. Чуя, для которой характерны большие значения азимутального разброса обеих проекций. Это обусловлено тем, что в восточной части долина р. Чуя распадается на мозаику элементарных площадок разных азимутальных значений. На следующем шаге озерный рельеф разбивается на две группировки. Вторично расчлененные участ-

ки озерной равнины отличаются от выровненных озерных участков по вертикальной расчлененности и диапазону углов. Вторично расчлененная озерная равнина делится на термокарстовый рельеф и аллювиальный притоков р. Чуя. Для термокарстового рельефа характерны повышенные значения диапазона углов и азимутальных проекций. Аллювиальный рельеф притоков отличается от термокарстового в основном по среднему значению углов. Среди выровненных участков озерной равнины по среднему значению углов и субширотному аспекту от группы озерного аккумулятивного рельефа выделяется озерный на моренном цоколе. Озерный аккумулятивный рельеф по диапазону углов и субширотному аспекту распадается на озерный на алевропесчаном основании и озерный с барами. Таким образом, для каждой точки ветвления ключевыми являются свои показатели.

На рис. 3 представлена итоговая схема морфологических комплексов, полученная в результате последовательной серии классификаций. По бортам котловины выделен делювиально-пролювиальный тип рельефа. Между рр. Елангаш и Чаган расположен холмисто-грядовый гляциальный рельеф с врезанными в него долинами притоков р. Чуя. Отделился эрозионный ложбинно-овражный тип рельефа, распространенный в долине р. Чаган-Узун и в западной части наклонной равнины. В предгорную равнину врезается многоруканная долина р. Чуя, которая простирается с юго-востока на северо-запад. Южнее аллювиального рельефа расположена обширная равнина с озерным типом рельефа, имеющим территориальную специфику в разных участках. На юго-восточной окраине котловины распространены асимметричные гряды с более пологим западным

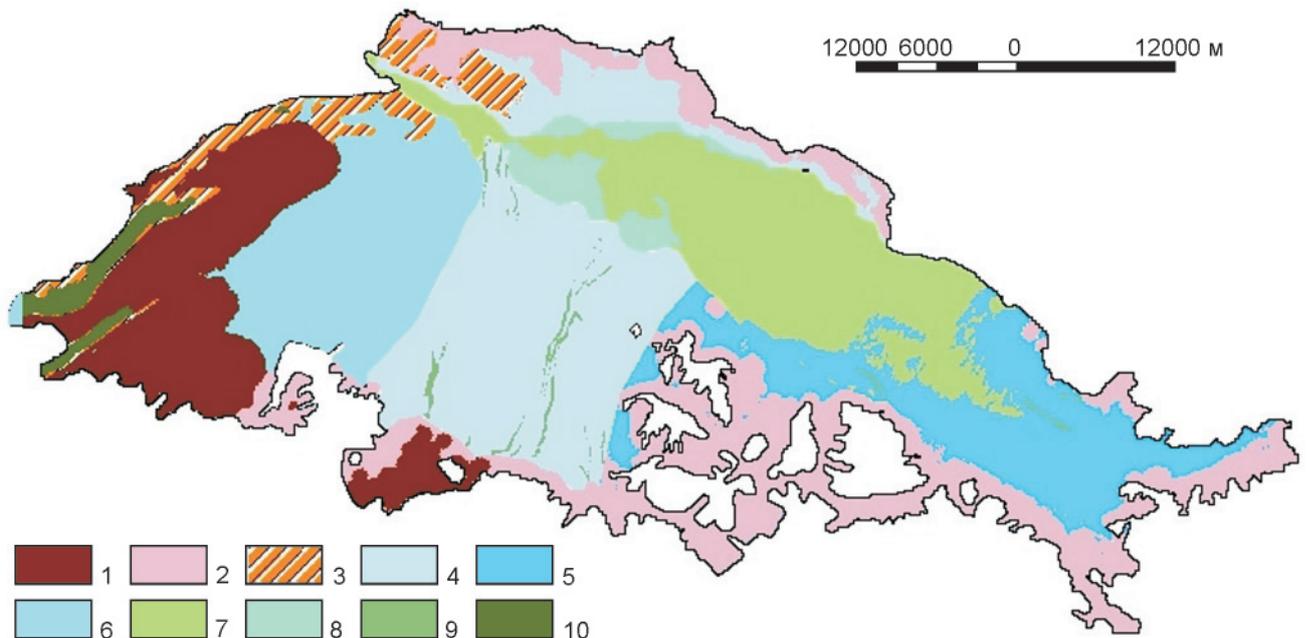


Рис. 3. Карта морфокомплексов, выделенных на основе многомерного морфометрического анализа

1 – гляциальный ложбинно-грядовый, 2 – делювиально-пролювиальный, 3 – эрозионный ложбинно-овражный, 4 – озерный на алевропесчанном основании, 5 – озерный с барами, 6 – озерный на моренном цоколе, 7 – аллювиальный многорукавной долины р. Чуя, 8 – термокарстовый, 9 – аллювиальный притоков р. Чуя, 10 – аллювиальный врезанных долин

склоном, представляющие собой озерные бары. Западнее на обширной территории между долинами рр. Елангаш и Кокозек, а также в восточной части наклонной озерной равнины распространен выровненный озерный рельеф на алевропесчаном основании, пересекаемый руслами левых притоков р. Чуя. К юго-западу, где увеличивается высота и угол наклона равнины, расположены озерные отложения на моренном цоколе. Таким образом, предложенная методика позволила автоматически картографировать морфокомплексы, не противоречащие геоморфологическим исследованиям предшественников [2, 4].

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана технология картографирования морфокомплексов (генетических комплексов рельефа) на основе покомпонентного и многомерного анализа морфометрических показателей, полученных по цифровой модели рельефа SRTM. Хотя в качестве основы для получения ЦМР можно использовать различные источники, однако использование уже готовых ЦМР общего доступа значительно снижает трудоемкость исследований. В свою очередь, применение классификаций с обучением, реализованных в стандартных системах обработки цифровых изображений, делает предлагаемую технологию легкодоступной и тиражируемой. Выделение и распознавание морфокомплексов в рамках предложенного подхода предлагается осуществлять на основе пошаговой ветвящейся серии классификаций с использованием масок, вычлняющих из анализиру-

емой области уже выделенные морфокомплексы. Морфометрические показатели, получаемые по ЦМР, необходимо подбирать в зависимости от особенностей территории.

Подход апробирован на примере Чуйской степи, рельеф которой формировался под влиянием неотектонических движений. Поэтому для таких территорий необходимы неотектоническое районирование и дальнейшие исследования внутри каждого выделенного геоморфологического сегмента.

Предполагаемый подход имеет ограничения. С одной стороны, не все генетические типы рельефа, комплексно выделяемые в полевых условиях, могут распознаваться по морфометрическим признакам. С другой стороны, по морфометрическим показателям могут статистически обособляться морфокомплексы, которые по каким-либо причинам не считались значимыми в другом признаковом пространстве. Возможность выделения и распознавания морфокомплексов во многом контролируется пространственным разрешением ЦМР. Не всегда можно распознать генетический тип рельефа, состоящий из мелких форм или имеющий ограниченное площадное распространение.

Апробированная технология перспективна для построения геоморфологических карт при среднемасштабном ландшафтном и геологическом картографировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт, А. М. Морфометрические исследования рельефа в СССР: состояние, проблемы, перспективы [Текст] / А. М. Берлянт // Геоморфология. – 1984. – № 2. – С. 15–24.



2. **Девяткин, Е. В.** Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая [Текст] / Е. В. Девяткин // Тр. ГИН. – 1965. – Вып. 126. – 243 с.
3. **Ефремов, Ю. К.** Опыт морфографической классификации элементов и простых форм рельефа [Текст] / Ю. К. Ефремов // Вопросы географии. – 1949. – № 11. – С. 47–64.
4. **Зольников, И. Д.** Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) [Текст] / И. Д. Зольников, Е. В. Деев, В. А. Лямина // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 4. – С. 437–449.
5. **Зольников, И. Д.** Основы использования технологий ГИС и ДЗ при решении типовых задач геологии и геоэкологии : Уч. пособие [Текст] / И. Д. Зольников, В. А. Лямина, Н. В. Глушкова. – Новосибирск : НГУ, 2011. – 94 с.
6. **Использование ГИС и ДДЗЗ** при картографировании геолого-геоморфологических объектов (на примере Чуйской котловины) [Текст] / И. Д. Зольников, Н. В. Глушкова, В. А. Лямина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 4. – С. 257–265.
7. **Кошкарев, А. В.** Проблемы эколого-геоморфологического картографирования и цифрового моделирования рельефа на XXIII международной картографической конференции [Текст] / А. В. Кошкарев // Геоморфология. – 2008. – № 2. – С. 67–71.
8. **Ласточкин, А. Н.** Использование морфологической системы при картографировании подводного рельефа [Текст] / А. Н. Ласточкин, Э. Н. Акопов // Технологии топографического картографирования шельфа – Л., 1988. – С. 114–144.
9. **Ласточкин, А. Н.** Системно-морфологическое основание наук о Земле (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем) [Текст] / А. Н. Ласточкин. – СПб. : НИИХ СПбГУ, 2002. – 762 с.
10. **Марков, К. К.** О геоморфологической карте [Текст] / К. К. Марков // Геологический вестник. – 1929. – Вып. 1–3, т. 7. – С. 34–41.
11. **Морфология рельефа** : Материалы Иркутского геоморфологического семинара (чтения памяти Н. А. Флоренсова) / [Текст]. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 1999. – 95 с.
12. **Морфология рельефа** / [Текст]. – М. : Научный мир, 2004. – 184 с.
13. **Симонов, Ю. Г.** Объяснительная морфометрия рельефа [Текст] / Ю. Г. Симонов. – М. : ГЕОС, 1999. – 263 с.
14. **Философов, В. П.** Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур [Текст] / В. П. Философов ; под общей редакцией А. А. Корженевского. – Саратов : Изд-во ун-та, 1960 – 69 с.

© Д. А. Чупина, И. Д. Зольников,
В. А. Лямина, 2012