

РАЗДЕЛ 5. ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 551.43

КАРТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПОЗИЦИИ (НА ПРИМЕРЕ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

Токарев С. В., Рощина К. Н.

*Таврическая академия ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского», Симферополь, Российская Федерация
E-mail: tokcrimea@list.ru*

В работе изучены возможности использования метода индекса топографической позиции для целей картирования элементов рельефа земной поверхности различных районов Крыма. Изложена методика вычисления индекса топографической позиции с использованием ГИС-технологий. Выбраны и охарактеризованы пять районов с различным типом рельефа: районы Тарханкутской возвышенности, Присивашской низменности, Керченского холмогорья, западной части Крымского предгорья и горного массива Караби. На их примере произведено вычисление индекса топографической позиции с последующей стандартизацией и категоризацией полученных значений. По результатам обозначенных операций были выделены основные морфологические элементы макро и мезорельефа выбранных районов. Сделан общий вывод о высокой применимости метода индекса топографической позиции для автоматизированного мультимасштабного картирования морфоэлементов рельефа.

Ключевые слова: индекс топографической позиции, цифровая модель рельефа, морфоэлемент рельефа, расчетная окрестность, геоморфологическое картирование, Крым, категоризация.

ВВЕДЕНИЕ

Морфографические и морфометрические параметры рельефа являются важнейшей составной частью легенд и содержания общих геоморфологических карт. Они позволяют судить о генезисе и истории рельефа изучаемой территории, неоднородности геологического строения, характере и интенсивности новейших тектонических движений, неоднородности воздействия экзогенных рельефообразующих процессов.

При геоморфологическом картировании существует проблема выделения элементов рельефа, в частности, проблема выделения положительных и отрицательных форм рельефа. Сочетание и конфигурация положительных и отрицательных форм рельефа определяют характер и направленность физико-географических процессов (вещественно-энергетических потоков) в ландшафтах, тем самым являясь основным фактором дифференциации их горизонтальной структуры. Таким образом, выделение положительных и отрицательных форм рельефа разных порядков также является основной задачей ландшафтного картирования территории на основе позиционно-динамического подхода.

В последние десятилетия, в условиях активного развития ГИС-технологий и цифрового моделирования рельефа, решение задачи выделения элементов рельефа и

его морфографического и морфометрического анализа получило гораздо более широкие возможности, но, тем не менее, данная проблема до сих пор остается актуальной. Решения данной задачи возможно с помощью вычисления так называемого индекса топографической позиции (от англ. – Topographic Position Index или TPI, далее в тексте ИТП), концепция которого была предложена Э. Уэйсом [1] и в дальнейшем воплощена в виде соответствующего программного обеспечения [2].

Метод ИТП довольно широко апробирован в зарубежных исследованиях [3, 4, 5, 6]. В отечественных исследованиях, несмотря на большое количество работ по автоматизированному картированию форм рельефа в ГИС на основе цифровых моделей рельефа [7, 8, 9], метод ИТП пока не нашел широкого применения. Информация о его использовании ограничена несколькими работами, среди которых можно выделить статью П.Б. Нетребина [10]. Для Крыма применение метода ИТП проводится впервые.

Целью данного исследования является изучение возможностей применения ИТП в геоморфологическом и ландшафтном картировании различных генетических типов рельефа, встречающихся в Крыму.

Задачами поставлены изучение методики вычисления ИТП, выбор и геоморфологическая характеристика репрезентативных для отработки методики районов, подготовка исходных данных для вычисления ИТП, анализ полученных результатов.

1. МЕТОДИКА

Единственными исходными данными, необходимыми для вычисления ИТП, является растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) исследуемого района в виде регулярной сетки ячеек со значениями высотной отметки. Алгоритм расчета ИТП (TPI) заключается в вычислении разности между значением высоты каждой ячейки ЦМР (Z_0) и значением средней высоты заданной окрестности, окружающей эту ячейку (Z_{cp}) [1]:

$$TPI = Z_0 - Z_{cp} \quad (1)$$

Пользователем задается тип окрестности (круг, кольцо, прямоугольник, клин) и её размер (радиус). В результате получается растр, где каждой ячейке соответствует конкретное значение ИТП. Ячейки с положительными значениями ИТП (их высота больше средней высоты окрестности) соответствуют положительным элементам рельефа (возвышенности, гряды, холмы). Ячейки с отрицательными значениями ИТП (их высота меньше средней высоты окрестности) соответствуют отрицательным формам рельефа (низменности, долины, балки, котловины). Ячейки со значениями ИТП близкими к нулю соответствуют плоским участкам или средним частям склонов (Рис. 1). Для разделения ячеек плоских поверхностей и ячеек середины склона необходимо дополнительно использовать параметр уклона поверхности. Значения уклона близкие к нулю будут соответствовать первому

случаю (равнинные поверхности), более высокие значения уклона – второму случаю (середина склона).

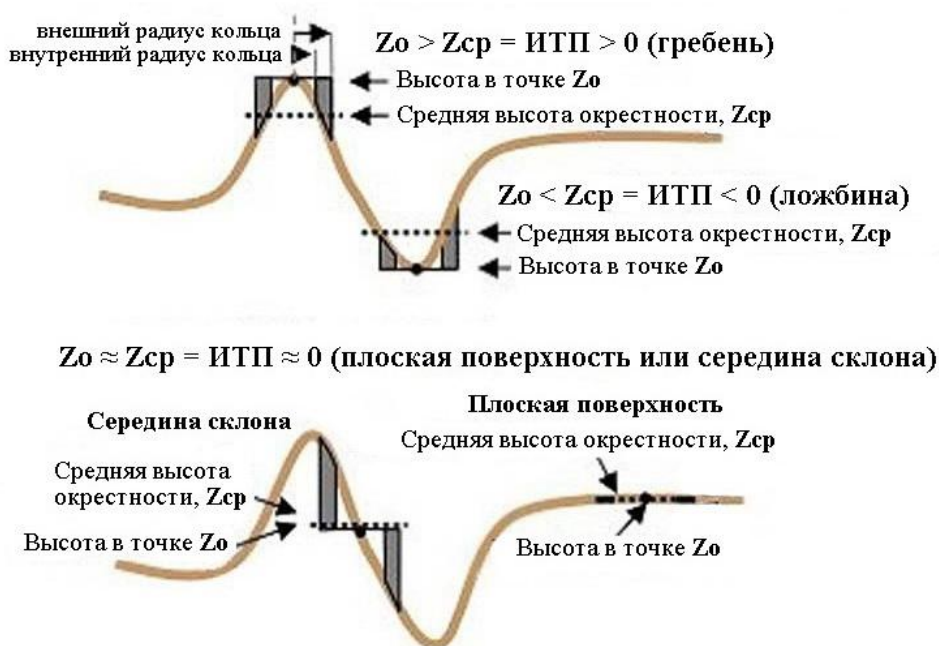


Рис. 1. Принцип вычисления ИТП (с использованием окрестности типа «кольцо») для точек с различным положением на профиле рельефа (по [1]).

Очевидно, что значение ИТП, рассчитываемое для отдельных точек, существенно зависит от размера окрестности, задаваемой для его расчета. Так, например, при вычислении ИТП для точки, находящейся на вершине останцового холма в речной долине, при использовании разного радиуса окрестности результирующие значения ИТП могут иметь противоположные знаки (Рис. 2). В случае “А” радиус окрестности попадает в пределы вершинной поверхности холма и ИТП, следовательно, будет близок к нулю. В случае “Б” окрестность захватывает весь холм, включая его склоны; ИТП будет иметь положительное значение. В случае “В” окрестность имеет настолько большой размер, что захватывает борта крупной долины, в которой расположен холм; ИТП будет иметь значение меньше нуля.

Таким образом, исследователи должны внимательно относиться к параметру размера окрестности, выбирая такой, который наиболее соответствует поставленной цели анализа. Как правило, при необходимости выделения только крупных элементов рельефа (долин рек, горных хребтов), во избежание лишних “шумов” от мелких форм, следует устанавливать больший радиус анализа. При выделении мелких форм рельефа (балок, воронок, холмов, межбалочных гряд) следует использовать меньший размер окрестности, соизмеримый с выделяемыми элементами рельефа. Авторы метода также предлагают комбинирование ИТП, полученных с различным размером окрестностей, для расширения набора выделяемых элементов рельефа.

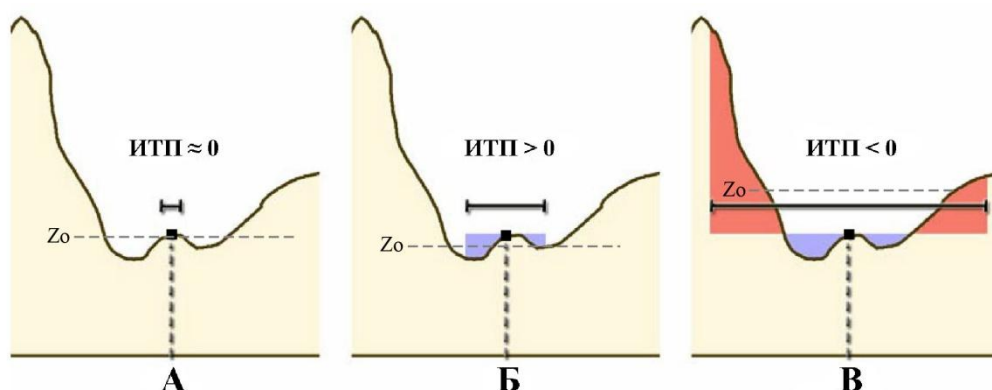


Рис. 2. Вариация значения ИТП для заданной точки в зависимости от размера окрестности (по [2], с дополнениями авторов).

Выбор формы окрестности (круг, кольцо, прямоугольник или клин) также в разной мере влияют на результаты вычисления ИТП. В большинстве случаев используются круговые или кольцевые окрестности, которые дают довольно схожие между собой результаты. Они считаются наиболее универсальными, подходящими для большинства задач использования ИТП. Специфической является клинообразная окрестность, которая позволяет проводить анализ в определенном ограниченном направлении. Э. Уэйс [1] высказывает идеи об использовании этого типа окрестности, например, для разделения седловин от плоских поверхностей, гребней гряд от вершин холмов, котловин от долин, а также для идентификации общих черт форм рельефа. Возможно также задание более сложной формы окрестности для анализа – так называемые “нерегулярные” окрестности, где пользователь задает, какие конкретные соседние ячейки будут использоваться для анализа [2].

Путем разбиения полученных значений ИТП на интервалы можно добиться уточнения положения отдельных ячеек (участков поверхности) относительно каркасных линий рельефа (Рис. 3). Интервалы задаются в единицах стандартного отклонения высоты в пределах заданной окрестности DEV [4, 11].

$$DEV = \frac{TPI}{SD}, \quad (2)$$

где SD – стандартное отклонение высоты в пределах окрестности анализа, вычисляемое по формуле:

$$DEV = \sqrt{\frac{1}{n_R - 1} \sum_{i=1} (z_i - z_{cp})^2} \quad (3)$$



Рис. 3. Концептуальная схема разбиения значений ИТП по положению в рельефе (по [1, 2]).

Пересчет ИТП в единицах DEV называется стандартизацией ИТП. Уэйс Э. предлагает следующую схему разделения (категоризации) стандартизованных значений ИТП (Таблица 1).

Таблица 1.
Граничные значения DEV для выделения элементов рельефа (по [1])

№ класса	Элемент рельефа	Граничные значения интервала
1	гребень, вершина холма	$> +1 \text{ DEV}$
2	верхняя часть склона	$> 0,5 \text{ DEV}, < 1 \text{ DEV}$
3	средняя часть склона	$> -0,5 \text{ DEV}, < 0,5 \text{ DEV}$, уклон $> 5^\circ$
4	пологие участки	$\geq -0,5 \text{ DEV}, \leq 0,5 \text{ DEV}$, уклон $< 5^\circ$
5	нижняя часть склона	$\geq -1 \text{ DEV}, < -0,5 \text{ DEV}$
6	днище долин и котловин	$< -1 \text{ DEV}$

Еще одним параметром, определяющим возможности использования ИТП для выделения элементов рельефа, является разрешающая способность исходной ЦМР. Чем она выше, тем более мелкие элементы рельефа могут быть выделены. В данной работе использовалась глобальная ЦМР – SRTM (от Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 90 м, произведенная посредством георадарной съемки поверхности Земли [12]. Логично предположить, что такой разрешающей способности будет недостаточно для выделения форм рельефа с шириной или диаметром менее 90 м (мелких балок, воронок, гряд, холмов). Для выделения таких морфоэлементов рельефа необходима более детализированная ЦМР.

Для вычисления ИТП в данной работе был использован программный пакет ArcGIS 10 в комплексе с программным расширением Land Facet Corridor, разработанным Дж. Дженнессом [13].

Метод ИТП был апробирован в таких районах мира, как Каскадные горы (Орегон, США) [1], бассейн Коздере с полем Язорен (Турция) [3], Большой Кавказ [10], приморская низменность в северо-западной части Бельгии [4], Великая долина Аппалачей [5], горы Загрос (Иран) [6]. Результаты перечисленных работ показывают высокую эффективность применения метода ИТП при картировании морфоэлементов высокогорного рельефа [1, 6, 10], карстовых форм рельефа (воронки) [5]. Метод действенен так же в случае более комплексного низкогорного рельефа, сочетающего эрозионные и карстовые формы [3]. Однако в этом случае с помощью ИТП удалось выявить и правильно классифицировать лишь крупные карстовые формы (поля диаметром 500–1500 м и длиной 150–500 м), в то время как мелкие карстовые замкнутые формы (воронки) были не выявлены либо неверно классифицированы.

Как отмечают бельгийские исследователи [4], метод ИТП, успешно применяющийся в районах с относительно однородным по происхождению (гомогенным) рельефом, имеет некоторые ограничения в случае комплексного неоднородного (гетерогенного) рельефа с высокой “шероховатостью”. Ограничения, в частности, касаются проблемы выделения узких форм рельефа с перепадами высот порядка нескольких метров. Для компенсации этих ограничений рекомендуется использовать расчет показателя DEV [11].

Вследствие обозначенных замечаний, основным критерием для выбора районов апробации ИТП в Крыму нами была выбрана относительная однотипность (гомогенность) рельефа. В то же время каждый из выбранных районов характеризуются типичностью и даже, в некотором смысле, эталонностью геоморфологических условий, которые охарактеризованы ниже.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробирования методики вычисления ИТП были выбраны следующие районы Крыма: возвышенная равнина Тарханкутского полуострова, аккумулятивная низменная равнина Присивашья, холмистые и слабоволнистые равнины Керченского полуострова (Керченское холмогорье), моноклинально-глыбовые низкогорья западной части Крымского предгорья, блок-моноклиальный среднегорный массив Караби главной гряды Крымских гор (Рис. 4, А). Определение морфоструктур районов сделано согласно карты Б.А. Вахрушева [14].

Тарханкутская возвышенность. Согласно морфоструктурному районированию район относится к структурно-денудационным возвышенным равнинам, сформировавшимся в условиях слабых поднятий. В геоструктурном отношении район представляет собой валообразное поднятие. В его пределах сформировался эрозионно-денудационный рельеф с сложными неогеновыми известняками увалистыми формами, соответствующими антиклиналям (Рис. 4, Б). Увалы – вытянутые в длину возвышенности с пологими склонами без ясно выраженного подножия и разделяющие их корытообразные котловины. С юго-запада на северо-

восток параллельно друг другу четыре увалоподобные гряды. Между ними расположены котловины. Водораздельная поверхность увалов ровная, лишь местами над ней поднимаются образованные известняками останцовые холмы и гряды. Южные склоны увалов большей частью крутые, а северные – пологие. Склоны увалов, обращенные к морю, крутые повсеместно. Поверхность равнины сильно расчленена глубокими сухоречьями, балками, лощинами и оврагами. Одни долины и балки, приуроченные к осям корытообразных котловин, тянутся с востока на запад, другие направлены поперек увалов, а третьи расположены веерообразно и сходятся к какому-либо явно прогибающемуся месту (группы долин и балок, впадающие в Акмечетскую, Ярылгачскую и Караджинскую бухты, а также в северную часть озера Донузлав). Побережье полуострова (особенно западное) имеет крутые береговые обрывы высотой до 50 м. В современную эпоху продолжается поднятие увалов и прогибание разделяющих их котловин, в том числе и упомянутых бухт [15].

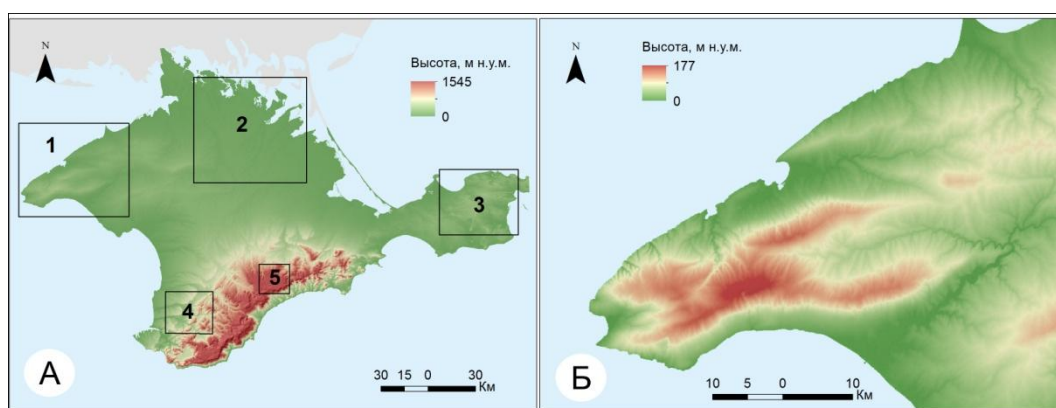


Рис. 4. А – ЦМР Крыма с выбранными тестовыми районами: 1 – Тарханкутский полуостров, 2 – Присивашье, 3 – Керченский полуостров, 4 – участок западной части Крымского предгорья, 5 – горный массив Караби. Б – ЦМР Тарханкутской возвышенности (по данным SRTM).

Присиваишская низменность. Согласно морфоструктурному районированию район относится к аккумулятивным низменным равнинам, сформировавшимся в условиях очень слабых поднятий и опусканий и сложенными плиоцен-плейстоценовыми породами. В тектоническом отношении район соответствует Северо-Сивашскому прогибу Скифской плиты [16]. В рельефе преобладают плоские слабоволнистые равнины, в устьевой части рек и балок – древнедельтовые и лиманно-морские плоские равнины. Для района характерна довольно густая эрозионная расчлененность. Глубина расчленения при этом имеет небольшие значения – от нескольких метров до первых десятков метров. Балки шириной от первых сотен метров до 1–2 км разделены обширными плоскими водораздельными поверхностями. В северо-западной части района развиты крупные бессточные понижения (Рис. 5, А).

Керченское холмогорье. В морфоструктурном плане выбранный район относится к структурно-денудационным возвышенным равнинам, сформированным в условиях слабых поднятий. В рельефе доминируют слабоволнистые равнины синклинальных впадин на неогеновых глинах и известняках и холмистые равнины с обращенным рельефом на палеогеновых глинах и известняках. Рельеф юго-западной часть района представляет собой пологоволнистые равнины на майкопских глинах. Под действием внешних рельефообразующих агентов брахиантиклинальные структуры, имеющие здесь широкое распространение, превращены в инверсионные формы рельефа – антиклинальные котловины, окруженные моноклиальными гребнями. Существует группа структурно-скульптурных форм, среди которых выделяются платообразные синклинальные останцовые возвышенности, занимающие обширные площади на Керченском полуострове. В рельефе они выражены в виде плато, лежащих на высоте до 130 м над уровнем моря и резко отделенных от окружающих равнинных пространств более или менее крутыми склонами, часто со следами древних оползней. Также на Керченском полуострове имеются останцовые холмы конической формы и скалистые гребни. Поверхность равнин расчленена оврагами и неглубокими балками с плавно очерченными склонами и плоскими или увалистыми водоразделами. В целом рельеф имеет характерный холмисто-волнистый вид (Рис. 5, Б). Характерными формами рельефа юго-западной части Керченского полуострова являются блюдцеобразные понижения – коли, представляющие собой неглубокие плоскодонные бессточные впадины [17].

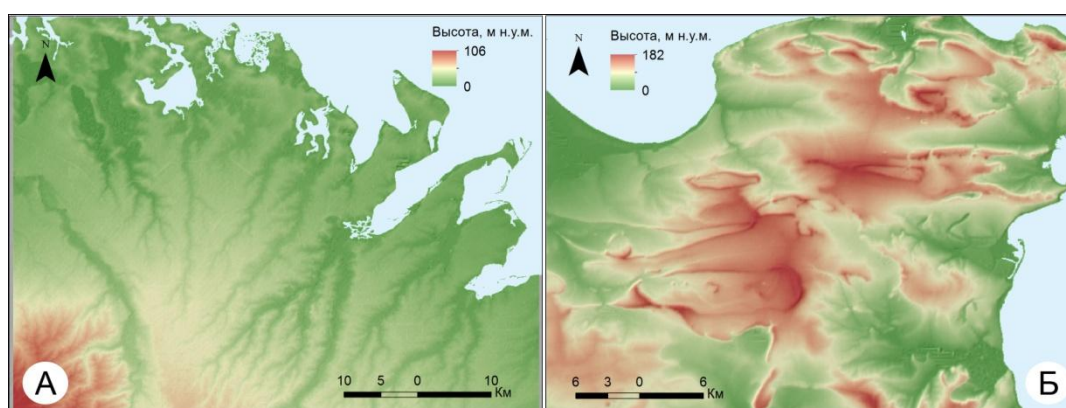


Рис. 5. ЦМР Присивашской низменности (А) и слабоволнистых и холмистых равнин Керченского полуострова (Б) (по данным SRTM).

Крымское предгорье (западная часть). Согласно морфоструктурному районированию выбранный район относится к моноклиально-блоковым низкогорьям, сформированным в условиях умеренных тектонических поднятий, сложенным породами нижнего мела, палеогена и неогена. Особенностью рельефа района является наличие куэстовых гряд и холмистых продольных долин между ними (Рис. 6, А). Главными орографическими элементами предгорья являются [18]:

а) Внутренняя куэста, сложенная породами верхнего мела и палеогена; б) Внешняя куэста, сложенная неогеновыми отложениями; в) Первая межгрядовая продольная эрозионная долина, разделяющая Главную горную и Внешнюю предгорную гряды; г) Вторая межгрядовая продольная эрозионная долина, разделяющая Внутреннюю и Внешнюю предгорные гряды. Характерными морфологическими особенностями внутренней и внешней предгорных гряд являются асимметрия их поперечного профиля и наличие известняковых карнизов на их гребнях. Межгрядовые продольные эрозионные долины представляют совокупность эрозионных понижений – долин, балок и возвышенностей разной высоты и формы. Особенно большой расчлененностью отличается Первая межгрядовая долина. Останцовые холмы и возвышенности в пределах Первой межгрядовой долины состоят из более твердых и плотных мергелей и известняков. Вторая межгрядовая долина, сложенная однообразными мягкими мергелями верхнего эоцена, имеет меньшую расчлененность рельефа и состоит из ряда понижений небольшой глубины, разделенных почти плоскими водоразделами. Наиболее существенную роль в образовании современного рельефа предгорья сыграла эрозия, интенсивность и направленность которой менялась со временем. Густая речная сеть предгорья начала формироваться в конце миоцена, в связи с этим образовалась еще одна особенность рельефа предгорья – расчлененность куэстовых гряд поперечными речными долинами на отдельные участки. Поперечные долины главных рек северного склона геоморфологически неоднородны. Они характеризуются чередованием широких (1–1,5 км) террасовых участков, выработанных в мягких породах межгрядовых продольных долин, и узких (300–400 м) крутосклонных участков в пределах куэстовых гряд. Повсеместно в предгорье распространены такие формы как эрозионные останцы. По результатам новейших исследований [19] установлено, что значительная роль в формировании геоморфологического облика предгорья принадлежит карстовым процессам, происходившим здесь в плейстоценовое время.

Горный массив Караби. В морфоструктурном плане массив относится к моноклинально-глыбовым среднегорьям, сформировавшимся в условиях активных и умеренных тектонических поднятий. Сложен массив известняками верхней юры. Характерной особенностью его макрорельефа является наличие платообразной вершинной поверхности (яйлы). Большая часть плато имеет высотные отметки 800–1000 м н.у.м. Лишь юго-западная часть плато, в пределах гряды Каратау, образует более высокую высотную ступень: 1100–1260 м н.у.м. Южный склон массива обрывистый, северный – пологий, расчлененный балками северной ориентировки. С запада Караби отделен от соседних массивов глубокими балками рек Восточный Суат и Бурулча. Восточный склон массива характеризуется густой эрозионной расчлененностью. С северо-востока массив ограничивается крупной депрессией в рельефе – Молбайской котловиной, представляющей собой в морфоструктурном плане эрозионно-тектоническую межгорную впадину. Первичный рельеф Карабийского плато интенсивно переработан карстом. Типичной формой мезорельефа плато является карстовая воронка, которых здесь насчитывается порядка нескольких тысяч. Размещение карстовых форм на поверхности строго

придерживается структурного плана верхнеюрской толщи, что хорошо видно на участках этих массивов, сложенных слоистыми известняками. Здесь выявляется закономерная приуроченность наибольшего количества форм карстового мезорельефа к трещиноватости, развитой по напластованию [20]. Разнотипные воронки обладают хорошо заметной ориентированностью длинных осей вдоль простирания пластов. Для них характерна также резкая асимметрия в разрезе по короткой оси, с крутым склоном, располагающимся против падения подстилающего пласта, на обнаженной верхней плоскости которого развивается пологий склон. Параллельно цепям воронок располагаются разделяющие их гребни. В восточной части массива на поверхность выходят терригенные породы нижнего мела. Карстовых форм здесь заметно меньше, ведущая рельефообразующая роль принадлежит эрозионным процессам (Рис. 6, А).

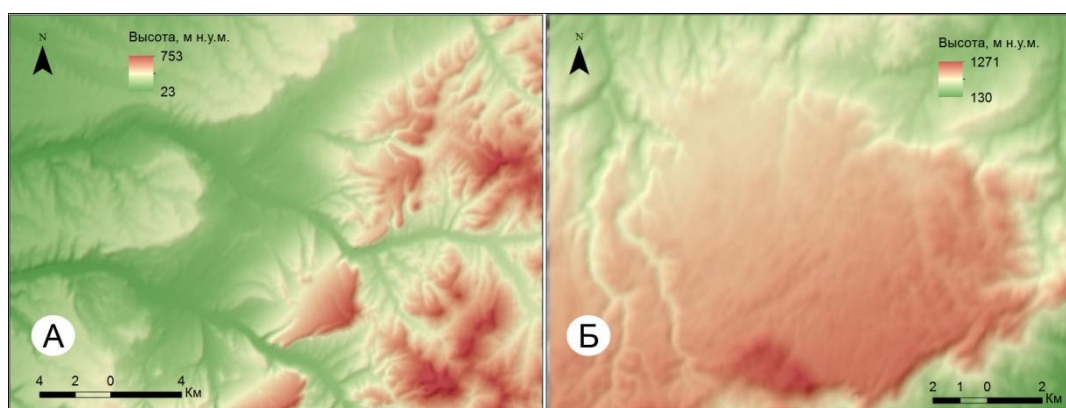


Рис. 6. ЦМР выбранного участка западной части Крымского предгорья (А) и горного массива Караби (Б) (по данным SRTM).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе ЦМР избранных районов использовалась окрестность типа “круг” с радиусом 5000 и 1000 м (в случае Карабийского массива вместо 1000 м использовался радиус 500 м). Рассчитывалось как простое значение ИТП (в метрах), так и стандартизированное (в единицах стандартного отклонения высоты в пределах радиуса окрестности – DEV). Вычисленные значения стандартизированного ИТП разбивались на 4 категории:

- < $-0,5 \text{ DEV}$ – должны соответствовать участкам вершинных поверхностей и их бровкам;
- $-0,5 - 0 \text{ DEV}$ – должны соответствовать верхним частям основных склонов и боковым гребням;
- $0 - 0,5 \text{ DEV}$ – должны соответствовать нижним частям основных склонов и боковым балкам и оврагам;
- $> 0,5 \text{ DEV}$ – должны соответствовать днищам долин, котловин и главных балок.

Тарханкутская возвышенность. Амплитуда ИТП для района при радиусах окрестности 5000 и 1000 м составила соответственно 128 м и 63 м, что говорит об умеренной амплитудности (вертикальной расчлененности) рельефа (Рис. 7, А, Б). Посредством стандартизации ИТП в первом случае удалось выделить наиболее крупные элементы рельефа возвышенности (Рис. 7, В): увалы ($> 0,5 \text{ DEV}$, выделены красным), верхние и нижние части их склонов, а также межгрядовые долины и крупные балки ($< -0,5 \text{ DEV}$, выделены зеленым). Приморское положение района требует некоторых корректив категоризации элементов рельефа. Так, в категории днищ долин оказались прибрежные низменности, а в категории вершинных поверхностей – участки побережья с высоким клифом (урочище Атлеш, например). В случае меньшего (километрового) радиуса окрестности (Рис. 7, Г) оказались выраженными килевые линии рельефа: водораздельные гребни увалов (выделены красным) и тальвеги долин и балок (выделены зеленым). На участках с низкой амплитудой рельефа (районы озера Донузлав и Бакальской косы) распределение категорий морфоэлементов оказалось весьма мозаичным. Это можно объяснить имманентными погрешностями используемой ЦМР, результатом чего является ее высокая “шероховатость” на участках, в реальности соответствующих плоским поверхностям.

Присивашская низменность. В связи с низменным положением и, как следствие, низкой расчлененностью рельефа, рассчитанные значения ИТП в пределах данного района имеют самую низкую амплитуду из всех выбранных районов: 64 м и 41 м для окрестностей с радиусом 5000 м и 1000 м соответственно (Рис. 8, А, Б). Тем не менее, даже в условиях низкой амплитудности рельефа, стандартизированный ИТП, вычисленный для окрестности 5000 м, позволил достаточно четко выделить крупные балки (в том числе бессточные балки на северо-западе района) и водораздельные поверхности (Рис. 8, В). При укрупнении радиуса расчетной окрестности до 1000 м, наряду с прорисовкой килевых линий мезорельефа района, отмечается повышенная мозаичность распределения элементов рельефа, особенно на прибрежных участках, отличающихся наибольшей выположенностью рельефа (Рис. 8, Г). Как и в случае с Тарханкутской возвышенностью (где эта проблема проявляется в гораздо меньшей степени), это объясняется внутренними ошибками используемой ЦМР (SRTM). Заявленная для нее относительная погрешность по высоте составляет около 9 м [12], что превышает фактическую вертикальную амплитуду рельефа на значительной площади района. Это приводит к искусственной “шероховатости” ЦМР, искажающей реальный рельеф. На ЦМР района также обнаружено искажение естественного искусственными каналами (система Северо-Крымского канала – индицируется тонкой светлой линией на севере и северо-востоке района), что также вносит коррективы в итоговые показатели ИТП (Рис. 8, А, Б).

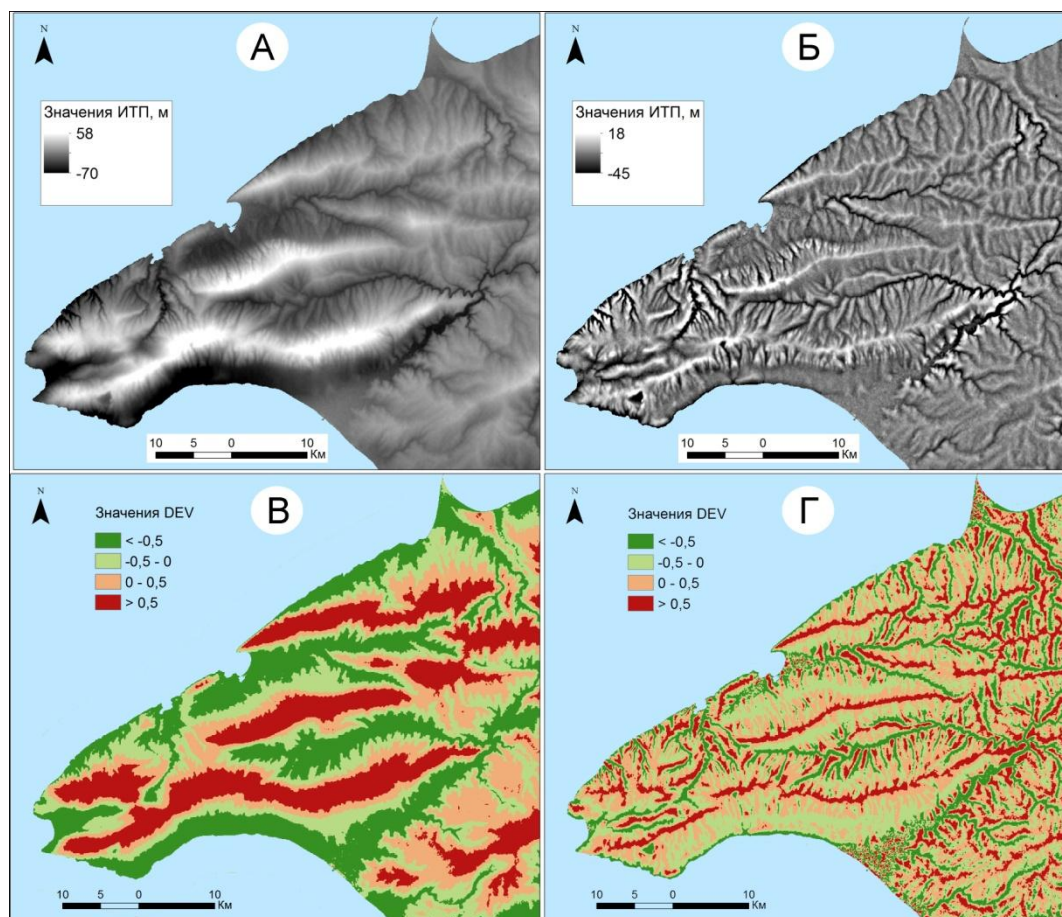


Рис. 7. Результаты вычисления ИТП для района Тарханкутской возвышенности. А – ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Б – ИТП с радиусом окрестности 1000 м; В – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Г – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 1000 м.

Керченское холмогорье. Сложность и специфичность геоморфологического строения района (обращенный рельеф, широкое распространение вдавленных синклиналей, слабая развитость эрозионной сети) обусловила некоторую неоднозначность в выделении морфоэлементов на основе ИТП. Амплитуда значений ИТП для района составила 179 м и 124 м для расчетных окрестностей 5000 м и 1000 м соответственно (Рис. 9, А, Б). Используемая схема категоризации значений стандартизированного ИТП очевидно малоприспособлена для решения поставленной задачи в данном районе. Особенно это относится к случаю крупных радиусов расчетной окрестности, где из известных морфоэлементов района индицируются только малочисленные эрозионные формы, представленные долинами или крупными балками субширотного простирания (Рис. 9, В). Остальные категории плохо соотносятся с известными реальными морфоэлементами.

Возможная интерпретация полученных выделов, которые должны соответствовать возвышенным участкам (выделены красным на Рис. 9, В) – цепи складчатых структур. Несколько лучшие результаты дал ИТП с меньшим радиусом расчетной окрестности – 1000 м. Он позволил довольно четко индцировать моноклиальные гребни в крыльях антиклиналей и вдавленных синклиналей, которые являются здесь основными килевыми линиями рельефа (выделены красным на Рис. 9, Г).

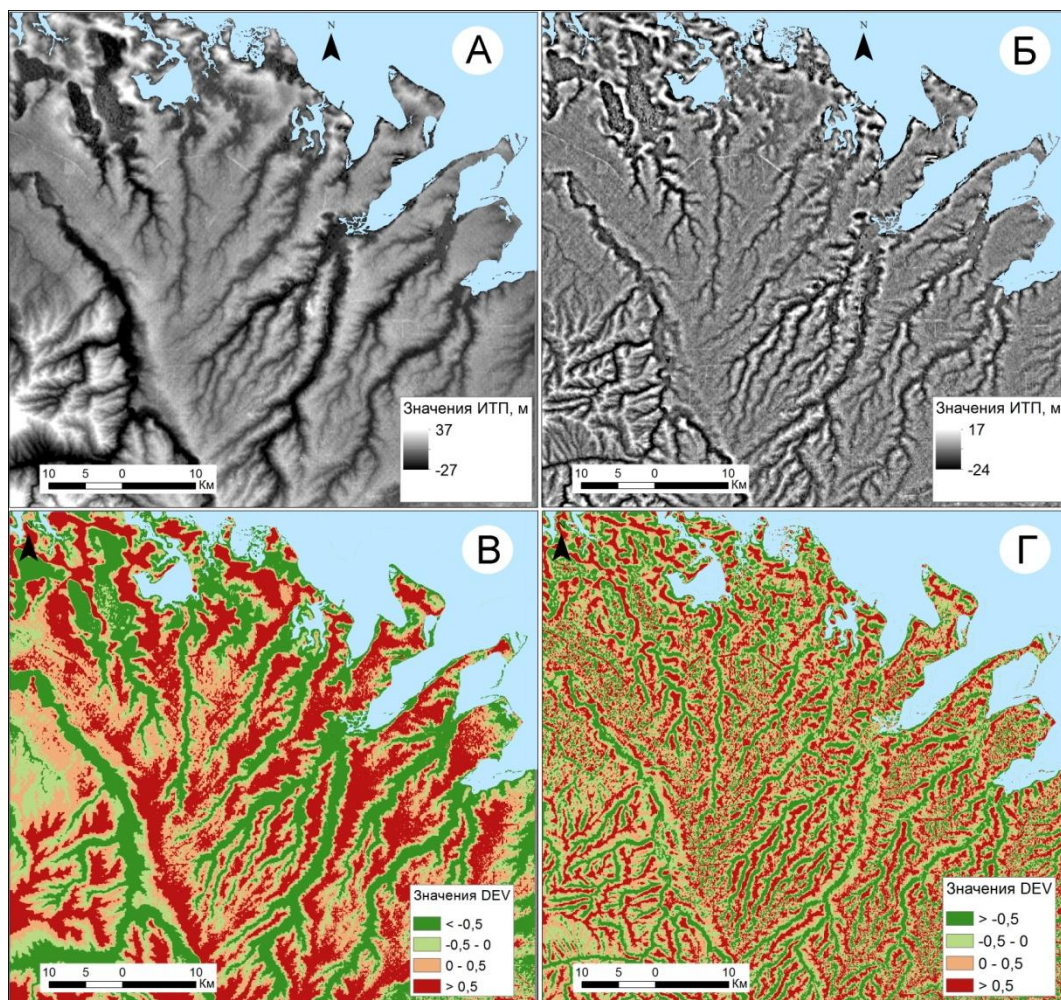


Рис. 8. Результаты вычисления ИТП для района Присивашской низменности. А – ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Б – ИТП с радиусом окрестности 1000 м; В – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Г – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 1000 м.

КАРТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПОЗИЦИИ (НА ПРИМЕРЕ
КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

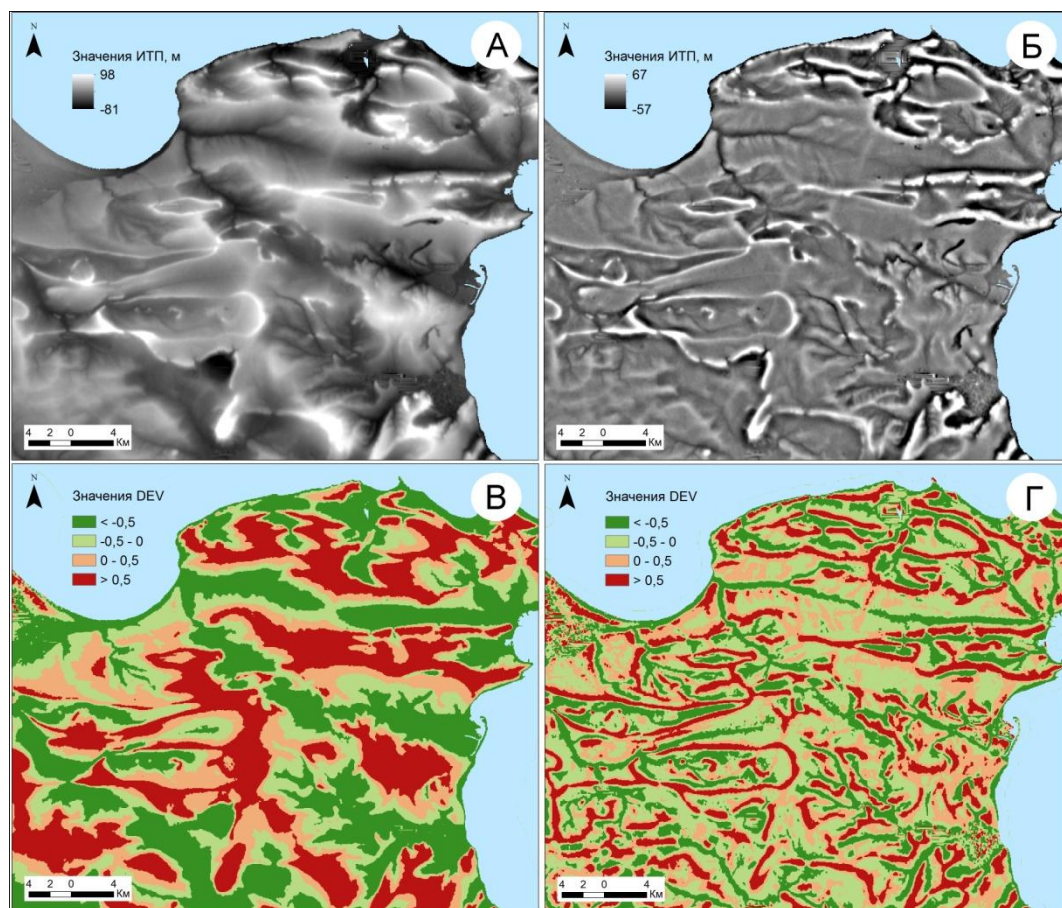


Рис. 9. Результаты вычисления ИТП для северо-восточной части Керченского полуострова. А – ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Б - ИТП с радиусом окрестности 1000 м; В – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Г – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 1000 м.

Крымское предгорье (западная часть). Амплитуда значений ИТП для данного района составила довольно высокие значения – 523 м и 301 м для расчетных окрестностей 5000 м и 1000 м соответственно, – что является следствием значительной вертикальной расчлененности рельефа (Рис. 10, А, Б). При радиусе расчетной окрестности 5000 м отчетливо выделяются все обозначенные выше основные орографические элементы: внутренняя и внешняя куэсты (выделены красным цветом на Рис. 10, В), продольные межгрядовые и поперечные речные долины (выделены зеленым цветом на Рис. 10, В). При уменьшении радиуса окрестности до 1000 м выявляются более мелкие элементы рельефа: прибовочные гребни куэст, балки на структурных склонах (“спинах”) куэст и разделяющие их гребни (особенно в пределах внешней куэсты – в северной части района), днища поперечных и продольных долин (Рис. 10, Г). Также довольно хорошо

индицируются каньонообразные участки поперечных речных долин и глубокие балки, соответствующие наиболее темным участкам на Рис. 10, Б.

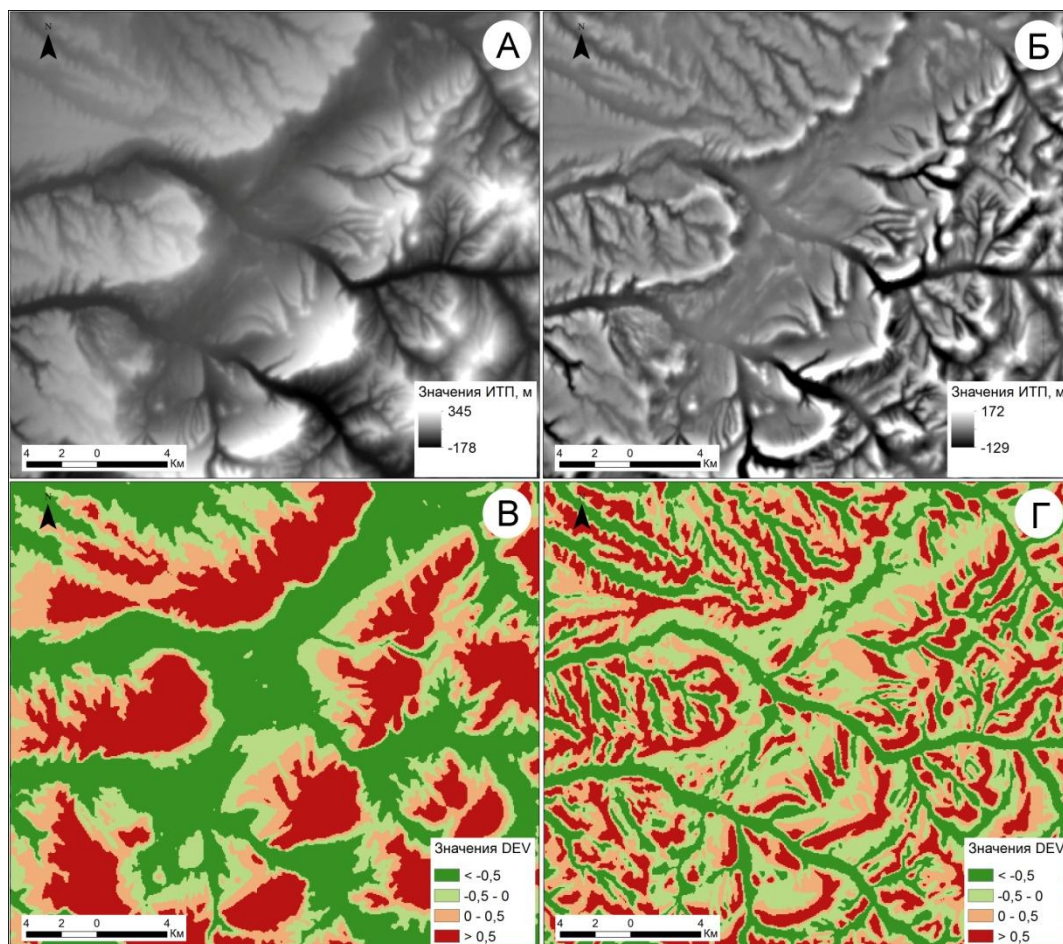


Рис. 10. Результаты вычисления ИТП для участка западной части Крымского предгорья. А – ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Б – ИТП с радиусом окрестности 1000 м; В – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Г – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 1000 м.

Горный массив Караби. Из всех выбранных районов данный отличается наибольшими высотными отметками и наивысшей общей вертикальной расчлененностью рельефа. Амплитуда ИТП при радиусе окрестности 5000 м составила 770 м (Рис. 11, А). При этом радиусе довольно четко выделяются основные элементы макрорельефа района: плато массива, крупные балки с запада и востока от него, понижения на севере и юге, Молбайская котловина на северо-востоке, Чомбайский отрог массива на севере. Однако категоризация стандартизированных значений ИТП по выбранной схеме вводит в некоторое

заблуждение, в частности, при выделении элементов рельефа в пределах плато массива. Кроме относительных возвышенностей в его южной и северной частях наибольшую площадь здесь занимают участки со значениями DEV от $-0,5$ до $0,5$, что характерно для выположенных участков, каковым и является плато. Обозначенная схема категоризации ИТП разработана для выделения нижних и верхних поясов склонов, что не имеет смысла для платообразной поверхности, но имеет смысл для склонов массива. Поэтому, для более точной категоризации элементов рельефа, здесь необходимо ИТП использовать в комбинации с параметром уклона поверхности. Было решено разделить ячейки со значениями DEV, находящимися в интервале от $-0,5$ до $0,5$, на имеющие уклон до 10° (соответствуют платообразной поверхности) и более 10° (соответствуют склонам массива) (Рис. 11, Д).

Вычисление ИТП с окрестностью меньшего радиуса (выбрано значение 500 м) главной своей целью имело выделение элементов мезорельефа плато карстового генезиса, являющихся типичными для данного района. Цель была успешно достигнута в определенной мере – в пределах плато массива были выделены наиболее крупные котловины и слепые долины (радиусом и шириной более 100 м) (Рис. 11, Г). Более точную категоризацию элементов мезорельефа плато позволило выполнить комбинированное использование стандартизированного ИТП и параметра уклона (Рис. 11, Е). Очевидно, что более мелкие формы рельефа (с линейными размерами менее 100 м) с использованием данной ЦМР выделить не представляется возможным в связи с ее низким разрешением, определяющим нижний предел размеров выделяемых элементов (90 м). Для выделения этих элементов необходимо использовать более детальную ЦМР, с большим горизонтальным разрешением.

ВЫВОДЫ

В ходе проделанной работы выяснилось, что метод ИТП имеет большие возможности для картирования элементов рельефа земной поверхности. Основными преимуществами метода являются:

- автоматизация выделения морфоэлементов, что позволяет избежать субъективизма при их выделении разными исследователями; последними задается лишь параметры расчета ИТП, что позволяет универсализировать алгоритмы выделения форм рельефа (использование одних и тех же параметров для разных районов) и обеспечивает воспроизводимость полученных результатов;
- его простота и прозрачность – вычисление ИТП производится по простому и понятному алгоритму, что легко позволяет интерпретировать его результаты;
- минимальность исходных данных необходимых для расчета ИТП – для этого нужна лишь ЦМР;
- мультимасштабность – метод применим для выделения элементов рельефа различного порядка (от макроуровня до микроуровня, с использованием ЦМР различного разрешения и расчетных окрестностей различного размера), что еще раз подтверждает его универсальность;

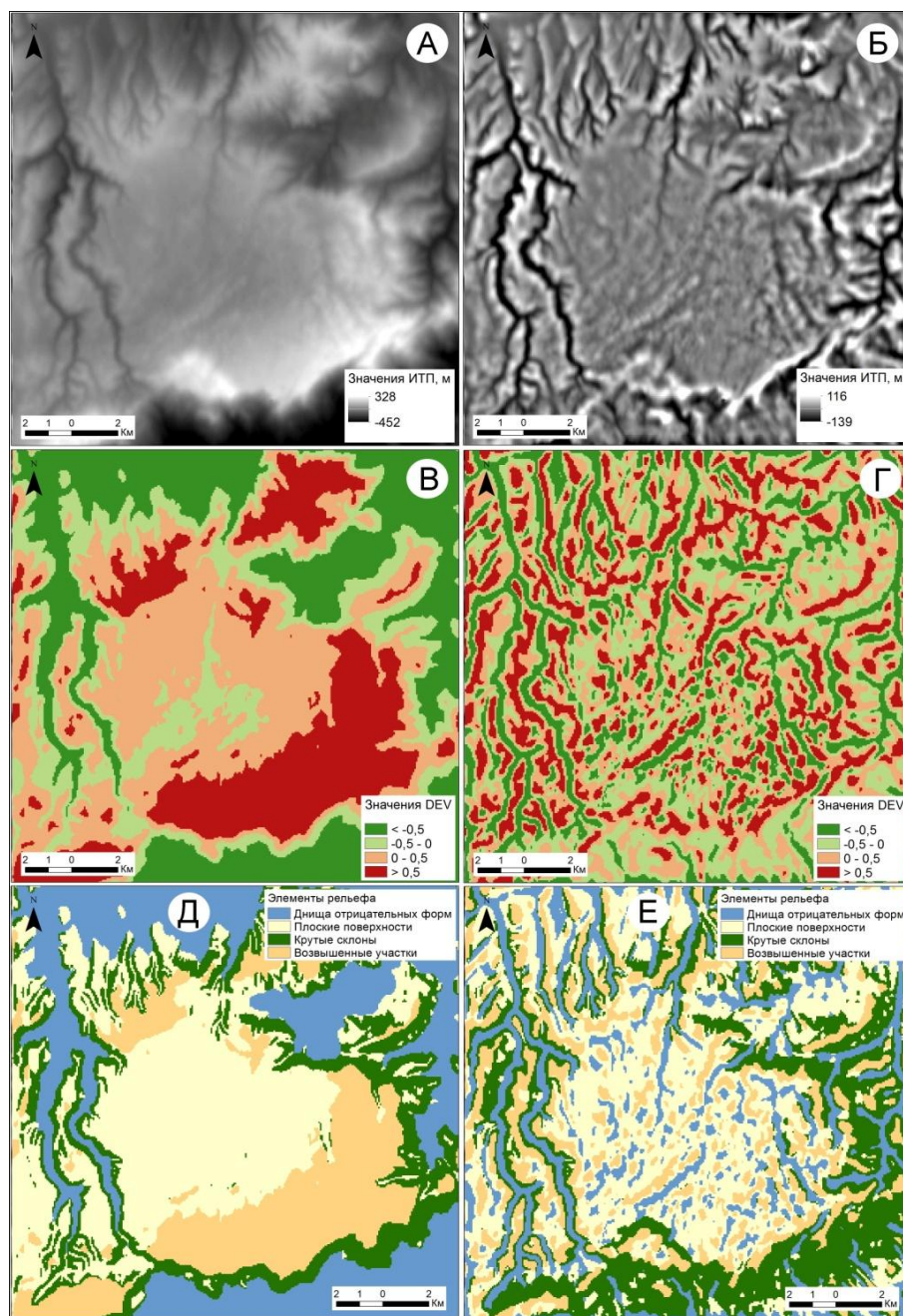


Рис. 11. Результаты вычисления ИТП для района горного массива Караби. А – ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Б – ИТП с радиусом окрестности 500 м; В – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 5000 м; Г – стандартизированный ИТП с радиусом окрестности 500 м; категории морфозлементов, выделенные на основе комбинации ИТП и уклона поверхности с

радиусом окрестности 5000 м (Д) и 500 м (Е). – комбинируемость с другими параметрами рельефа, которые можно вычислить из ЦМР (уклоны, кривизна рельефа, экспозиция, гидрографическая сеть) для достижения более точной категоризации морфоэлементов.

Выделенные с помощью ИТП участки характеризуются замкнутостью и соподчиненностью, являющиеся неотъемлемым свойством орографических элементов земной поверхности. Сохранение в ряде случаев общей конфигурации орографических элементов при варьировании размера окрестности вычисления (до некоторого предела) указывает на фрактальные свойства рельефа земной поверхности [21].

Полученные результаты позволяют наглядно изобразить для каждого из анализируемых районов их индивидуальные ландшафтные рисунки (паттерны), специфические для каждого генетического типа рельефа [22]. В них отражается ландшафтоформирующая роль рельефа. Выделенные элементы рельефа, как правило, соответствуют ландшафтным полосам и ярусам – основным единицам позиционно-динамической структуры ландшафтов [23]. В ходе работы удалось выделить все характерные элементы орографии для каждого из районов. Наибольшую эффективность метод показал при картировании структурно-эрозионного рельефа (Тарханкутская возвышенность, Крымское предгорье); относительно низкая эффективность метода выявилась при картировании обращенного рельефа на складчатых структурах (Керченский полуостров). ИТП также показал эффективность при выделении морфоэлементов в условиях слаборасчлененного и малоамплитудного рельефа (слабоволнистая низменная равнина Присивашья), когда визуальный анализ и другие методы анализа ЦМР могут быть бессильны.

В развитие темы данной работы можно обозначить следующие перспективные задачи:

- отработка метода на более крупном масштабе с использованием ЦМР высокого разрешения;
- комбинированное использование карт ИТП с разным размером расчетной окрестностей для одновременного показа на результирующей карте как основных элементов макрорельефа, так и килевых (каркасных) линий рельефа;
- экспериментирование с формой расчетной окрестности (использование кольцевой, клиновидной окрестности);
- выработка индивидуальных алгоритмов категоризации ИТП для каждой типичной структуры рельефа, определяемой его генезисом, что позволит производить более точную идентификацию характерных форм рельефа.

Список литературы

1. Weiss A.D. Topographic Position and Landforms Analysis, Poster Presentation // ESRI User Conference, San Diego, 2001. Режим доступа: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf

2. Jenness J. Topographic position index (TPI). An ArcView 3.x tool for analyzing the shape of the landscape. Jenness Enterprises, 2006. Режим доступа: http://www.jennessent.com/arcview/TPI_jen_poster.htm
3. Tagil S., Jenness J. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 2008, v. 8 (6), pp. 910–921.
4. De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwervaeagher A., Gelorini V., De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P., Van Meirvenne M., Verniers J., Crombé P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 2013, № 186, pp. 39–49.
5. Doctor D.H., Young J.A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter lidar-derived digital elevation data. Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst (Proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference), Carlsbad, 2013, pp. 449–458.
6. Mokarram M., Seif A. GIS-Based Automated Landform Classification in Zagros mountain (case study: Grain mountain). *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, 2014, v. 3 (3), pp. 20–32.
7. Мкртчян А. С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // *Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. Труды Международной школы-конференции «Ландшафтное планирование»*. М.: географический факультет МГУ, 2006. С. 203–208.
8. Токарев С.В. К методике карстолого-геоморфологического картирования посредством использования спутниковых данных о рельефе Земли // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: География*. 2011. Т. 24 (63). № 3. С. 185–194.
9. Михайлов В.А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 2. Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640>.
10. Нетребин П.Б. Автоматизированное построение орографической схемы Большого Кавказа в среде ГИС // *Геология, география и глобальная энергия*. 2010. №3 (38). С. 111–115.
11. Gallant J.C., Wilson J.P., 2000. Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York, Wiley, pp.51–85.
12. Дубинин М. Описание и получение данных SRTM [Электронный ресурс]. 2004. Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>
13. Jenness J. Land Facet Corridor Analysis. Revision 1.2.884. 2013. Режим доступа: http://www.jennessent.com/arccgis/land_facets.htm
14. Вахрушев Б.А. Морфоструктура и морфоскульптура. М. 1:1 200 000 // *Атлас АРК. Киев – Симферополь*, 2003. С. 22–23.
15. Подгородецкий П.Д. Подобласть Тарханкутской возвышенной равнины // *Физико-географическое районирование Украинской СССР / Под ред. В.П.Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. К.: Изд-во Киевск. ун-та*, 1968. С. 549–556.
16. Пасынков А.А. Тектоника. М. 1:1 200 000 // *Атлас АРК. Киев – Симферополь*, 2003. С. 19.
17. Губанов И.Г. К геоморфологии Керченского полуострова // *Известия Крымского отдела Географического общества СССР*. 1961. Вып. 6. С. 45–60.
18. Терехова В.И. Крымское предгорье (общая характеристика природы) // *Известия Крымск. пед. инст-та*. 1959. Т. 34. С. 49–63.
19. Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. 204 с.
20. Иванов Б.Н. О некоторых закономерностях развития карста в Горном Крыму // *Региональное карстоведение*. М., 1961. С. 108–113.
21. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьют. исслед., 2002. 656 с.
22. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М: Мысль, 1986. 179 с.
23. Власова А.Н. Применение ГИС-технологий при выделении позиционно-динамической структуры бассейновых территорий (на примере Крыма) // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2012. Т.8. Вып. 1–2. С. 56–62.

**THE MAPPING OF LAND SURFACE FEATURES BY USE OF THE
TOPOGRAPHY POSITION INDEX (IN THE CRIMEA PENINSULA AS
EXAMPLE)**

Tokarev S.V., Roschina K.N.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: tokcrimea@list.ru*

The concept of the Topography position index (TPI) was developed by Andrew Weiss for delineating of land surface features (i.e. ridges, valleys, steep slopes). The only input data this method required is a digital elevation model (DEM) of investigated area. The TPI represents the difference between a cell elevation value and the average elevation of the neighborhood around that cell, so it can be easily calculated by modern GIS software. Positive values of TPI mean the cell is higher than its surroundings (uplands) while negative values mean it is lower (lowlands). The degree to which it is higher or lower (i.e. using standard deviation units), can be used to classify the cell into slope position. The most significant parameter user should define for TPI calculating is an extent of surrounding neighborhood. It causes the extent level of delineated features. So TPI is a scale-dependent method.

The regions have been selected for TPI calculation are: 1) The Tarkhankut upland, 2) The Presivash lowland, 3) hilly area of the Kerch peninsula, 4) western part of the Crimean piedmont and 5) Karaby mountain massif. These regions represent a great variety of relief genesis types and elevation amplitudes and so have a lot of specific surface features. For Tarkhankut upland such features are uvals and dry meandering valleys, for Presivash lowland – wide and shallow valleys with lagoons at their ends and closed valleys, for the Kerch peninsula – inverted relief features of anticline troughs (molds) and indented synclines, for the Crimean piedmont – cuestas and river valleys (including deep canyons), for Karaby mountain massif – karst plateau with closed features (karst dolines, dry valley).

The calculation of TPI was conducted with two radiuses of circle neighborhood: 5000 m and 1000 m (for Karaby massif 500 m instead 1000 m). The calculation procedures were performed using J. Jenness's extension «Land facet corridor» for ArcGIS 10 software. The input DEM used for calculation was SRTM GRID with 90 m horizontal resolution. The results were transformed in standard deviation units (DEV) and classified on 4 categories. Additionally, in a case of Karaby massif the combination with surface slope parameter was used to distinguish flat area and steep slopes.

The obtained results show the great efficiency of TPI method for identification of landforms in most cases. Almost all specific surface features of analyzed regions have been successfully identified and delineated. In the same time, some disadvantages of TPI method were revealed (i.e. great sensitivity to input DEM accuracy, low feasibility in a case of inverted relief features). It has been concluded that for every type of relief the individual algorithm of TPI calculation should be developed to obtain the adequate results. The TPI has a numerous advantages in comparison with other similar methods. It can be successfully used for multi-scale geomorphologic and landscape mapping.

Keywords: topography position index, digital elevation model, surface feature, calculation neighborhood, geomorphologic mapping, position-dynamic structure of landscape, Crimea, standard deviation, classification.

References

1. Weiss A.D. Topographic Position and Landforms Analysis, Poster Presentation // ESRI User Conference, San Diego, 2001. Режим доступа: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf
2. Jenness J. Topographic position index (TPI). An ArcView 3.x tool for analyzing the shape of the landscape. Jenness Enterprises, 2006. Режим доступа: http://www.jennessent.com/arcview/TPI_jen_poster.htm
3. Tagil S., Jenness J. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 2008, v. 8 (6), pp. 910–921.
4. De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwervaeagher A., Gelorini V., De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P., Van Meirvenne M., Verniers J., Cromb  P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 2013, № 186, pp. 39–49.
5. Doctor D.H., Young J.A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter lidar-derived digital elevation data. Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst (Proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference), Carlsbad, 2013, pp. 449–458.
6. Mokarram M., Seif A. GIS-Based Automated Landform Classification in Zagros mountain (case study: Grain mountain). *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, 2014, v. 3 (3), pp. 20–32.
7. Mkrtchjan A.S. Avtomatizirovanoe vydelenie landshaftnyh edinic putem klassifikacii rel'efa s primeneniem GIS (Automated delineating of landscape units via relief classification using GIS). Landshaftnoe planirovanie: obshhie osnovaniya, metodologiya, tehnologiya. Trudy Mezhdunarodnoj shkoly-konferencii «Landshaftnoe planirovanie». M.: geograficheskij fakul'tet MGU, 2006, pp. 203–208 (in Russian).
8. Tokarev S.V. K metodike karstologo-geomorfologicheskogo kartirovaniya posredstvom ispol'zovaniya sputnikovyh dannyh o rel'efe Zemli (To the methodic of karst geomorphological mapping through the use of Earth relief satellite data). *Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya: Geografija*, 2011, v. 24 (63), № 3, pp. 185–194 (in Russian).
9. Mihajlov V.A. Kompleksnyj morfometricheskij analiz Tarhankut'skogo poluostrova s pomoshh'ju GIS (The complex morphometric analysis of Tarkhankut peninsula by use of GIS). *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*, 2015, № 2. Access mode: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (in Russian).
10. Nettebin P.B. Avtomatizirovanoe postroenie orograficheskoy shemy Bol'shogo Kavkaza v srede GIS (Automated building of the Greater Caucasus orographic scheme in GIS environment). *Geologiya, geografija i global'naja jenergiya*, 2010, №3 (38), pp. 111–115 (in Russian).
11. Gallant J.C., Wilson J.P., 2000. Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York, Wiley, pp.51–85.
12. Dubinin M. Opisanie i poluchenie dannyh SRTM (Description and obtaining of the SRTM data). 2004. Access mode: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html> (in Russian).
13. Jenness J. Land Facet Corridor Analysis. Revision 1.2.884. 2013. Режим доступа: http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm (in Russian).
14. Vakhrushev B.A. Morfostruktura i morfoskul'ptura (Morphostructure and morphosculpture). M. 1:1 200 000. Atlas ARK, Kiev – Simferopol', 2003, pp. 22–23 (in Russian).
15. Podgorodeckij P.D. Podoblast' Tarhankut'skoj vozvyshennoj ravniny (The subarea of Tarkhankut upland plain). *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Ukrainskoj SSSR*. K.: Izd-vo Kievsk. un-ta, 1968, pp. 549–556 (in Russian).
16. Pasynkov A.A. Tektonika (Tectonic). M. 1:1 200 000. Atlas ARK. Kiev – Simferopol', 2003, p. 19 (in Russian).

КАРТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПОЗИЦИИ (НА ПРИМЕРЕ
КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

17. Gubanov I.G. K geomorfologii Kerchenskogo poluostrova (To the geomorphology of Kerch peninsula). Izvestija Krymskogo otdela Geograficheskogo obshhestva SSSR, 1961, iss. 6, pp. 45–60 (in Russian).
18. Terehova V.I. Krymskoe predgor'e (obshhaja harakteristika prirody) (The Crimean piedmont. General characteristic of nature). Izvestija Krymsk. ped. inst-ta, 1959. v. 34, pp. 49–63.
19. Klimchouk A.B., Timokhina E.I., Amelichev G.N., Dubljansky Ju.V., Spötl K. Gipogennyj karst Predgornogo Kryma i ego geomorfologicheskaja rol' (The hypogene karst of the Crimean Piedmont and its geomorphological role). Simferopol': DIAJPI, 2013, 204 p.
20. Ivanov B.N. O nekotoryh zakonomernostjah razvitija karsta v Gornom Krymu (About some regularities of karst developing in Mountainous Crimea. Regional'noe karstovedenie, M., 1961, pp. 108–113.
21. Mandel'brot B. Fraktal'naja geometrija prirody (The fractal geometry of nature). M.: In-t komp'jut. issled., 2002, 656 p.
22. Viktorov A.S. Risunok landshafta (The landscape figure). M: Mysl', 1986, 179 p.
23. Vlasova A.N. Primenenie GIS-tehnologij pri vydelenii pozicionno-dinamicheskoy struktury bassejnovyh territorij (na primere Kryma) (The using of GIS for delineation of position-dynamic structure of basin territory). Geopolitika i ekogeodinamika regionov, 2012, v.8, iss. 1–2, pp. 56–62.

Поступила в редакцию 27.10.2015