

**РАЗДЕЛ 3.
ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ**

УДК 551.435.83 (528.94)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ
СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ
ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА**

Вахрушев Б. А.¹, Кунов А. А.², Кунов В. А.³

^{1,2,3}Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация

E-mail: ¹vakhb@inbox.ru, ²kunovaleksej@gmail.com

В работе приведена методика дешифрирования поверхностных карстовых форм (ПКФ) рельефа (карстовых воронок и котловин). Применены различные способы картирования результатов дешифрирования, с последующим анализом морфометрических параметров карстовых форм. На основании морфометрических показателей ПКФ и их размещения на поверхности карстового массива Караби (Горный Крым), дана морфологическая характеристика условий и особенностей пространственного развития поверхностного карста изучаемой территории. В последующем, применение данной методики послужит основой проведения региональной комплексной морфологической характеристики карстовых форм Горного Крыма.

Ключевые слова: дешифрирование, поверхностная карстовая форма рельефа (ПКФ), морфологический анализ, морфометрические показатели, плотность поверхностных карстовых форм, поверхностная площадная закарстованность, коэффициент поверхностной закарстованности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие геоинформационного программного обеспечения и методов дистанционного зондирования Земли дает возможность наносить на цифровые модели рельефа огромный массив карстологических данных, в частности, карстовых форм, придавать им площадные и объемные характеристики, работать с этими параметрами и информативно переносить результат обработки на картографические материалы [1].

В настоящей статье показана методика работы с данными открытых спутниковых съемок Земной поверхности для целей дешифрирования и последующего картирования поверхностных карстовых форм рельефа с учетом разрешающей способности используемых методов дистанционного позиционирования. При этом основными методами исследования выступил комплекс дешифрирования космических снимков, картографический метод и пространственный анализа морфометрических параметров поверхностного карста.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ЦЕЛЬЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ

Для проведения анализа условий развития поверхностных карстовых форм за основные формы рельефа, распространенные на территории объекта исследования, принимаются карстовые воронки и котловины [1, 2].

Самому анализу морфометрических показателей карстовых воронок, предшествует дешифрирование космических снимков Yandex на предмет карстовых воронок по ряду прямых и косвенных признаков, фиксация границ воронок и нанесение их на спутниковый снимок в качестве отдельного слоя полигональных поверхностей [3].

Следующим этапом является картирование воронок на поверхность гипсометрической картосхемы карстового массива Караби, построенной в ходе обработки растрового файла спутниковой съемки SRTM.

Используя полученные данные, с помощью ГИС программ QGIS и SAGA GIS, имеющих открытый код, строится серия картосхем, наглядно демонстрирующих распределение воронок по поверхности карстового массива, а также степени его поверхностной закарстованности.

Картосхемы площадной поверхностной закарстованности строятся с помощью применения метода «скользящего окна»: первым этапом является разбивка поверхности изучаемого массива на систему равновеликих квадратов с длиной стороны 1 км, именуемых в дальнейшем операционно-территориальными единицами (ОТЕ). На втором этапе для каждой ОТЕ подсчитывается сумма значений, после чего полученные значения суммируются в «скользящем окне», состоящих из четырех смежных операционных единиц. Далее для построения картосхемы площадной поверхностной закарстованности определяется среднее арифметическое значение оценочного показателя «скользящего окна» с последующим нанесением полигонов и изолиний показателей закарстованности массива [1].

Картосхемы плотности воронок выполнялись путем построения изолиний, замыкающих площади с одинаковой плотностью ПКФ для каждой ОТЕ.

ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КАРТОСХЕМ

В результате растворения карстующихся пород поверхностными и подземными водами, формируется особый генетический тип рельефа, представленный парагенетически развивающимися поверхностными и подземными карстовыми формами [2].

На космических и аэрофотоснимках, в том числе, доступных для открытого пользования, спутниковых снимков от Google и Яндекс, формы поверхностного карста, в частности карстовые воронки и котловины, опознаются без особого труда, так как выражаются в рельефе прямыми признаками (рис 1) [3].

Отсутствие лесного покрова на вершинах Крымских гор (которые, в силу литолого-геоморфологических особенностей, в первую очередь подвержены процессу карстообразования) способствует дешифрированию открытых форм карста

и установлению основных характеристик карстовых воронок и котловин (размеры в плане, площадь, крутизну склонов). По резкости и яркости изображения карстовых форм, наличию или отсутствию растительного покрова на кромке и на дне карстовых воронок, наложению одних форм на другие, существует возможность примерной оценки возраста — определение древних, более молодых и современных, активно развивающихся в данный момент поверхностных карстовых форм [3].

Что касается микроформ карстового рельефа (карры и карровые поля), то по спутниковым и аэрофотоснимкам мелкого масштаба возможно дать только примерную оценку площади распространения и активности развития данных форм. Следовательно, их дешифровка и отображение на картосхемах, в рамках данного исследования, нецелесообразна [1].

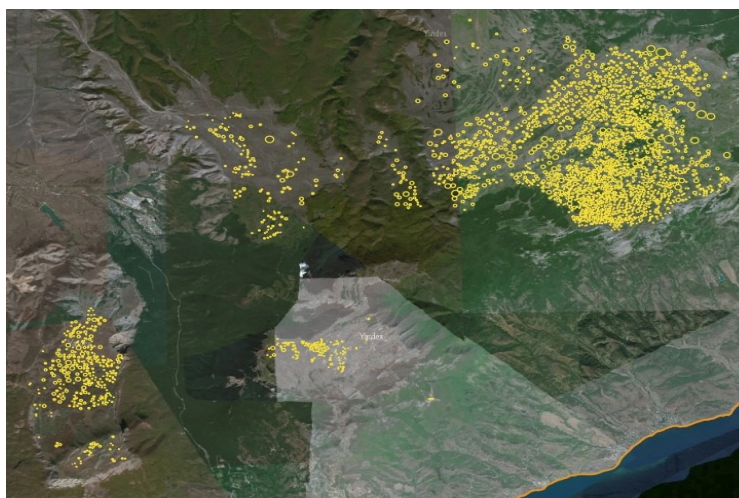


Рис 1. Пример дешифрирования спутникового снимка Yandex с использованием программы QGIS, включающего карстовые массивы Чатыр-Даг, Демерджи, Долгоруковский и Караби.

Построению требуемых картосхем, предшествует процесс подготовки растрового файла спутниковой съемки SRTM, который служит в качестве математической основы, так как имеет привязку к системе географических координат и может быть использован для построения картосхем масштабом до 1:50 000 [4].

Подготовительный этап включает в себя перепроецирование растрового изображения SRTM из исходной системы координат WGS84 в WGS84/UTM zone 36N, на плоскость карты. Полученный растровый слой переводится в псевдоцветное отображение гипсометрических уровней карстового массива Караби, на его поверхность наносятся площади карстовых воронок, с целью большей наглядности результата дешифровки (рис. 2) [4].

Далее, в программе QGIS строится сетка с шагом $1 \times 1 \text{ км}^2$ для подсчета параметров плотности карстовых воронок (шт/км²) и поверхностной закарстованности, рассчитываемой по формуле:

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ
СНИМКОВ С ЦЕЛЬЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ
ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

$$K_s = S_k/S \quad (1)$$

где K_s — коэффициент площадной закарстованности, S — площадь карстового массива, m^2 . S_k — площадь карстовых воронок или котловин, m^2 .

Данная формула введена Л. В. Голубевой. Для более информативного представления о степени закарстованности, а также оценки степени карстоопасности, данный коэффициент может переводиться в процентное выражение [5, 6].

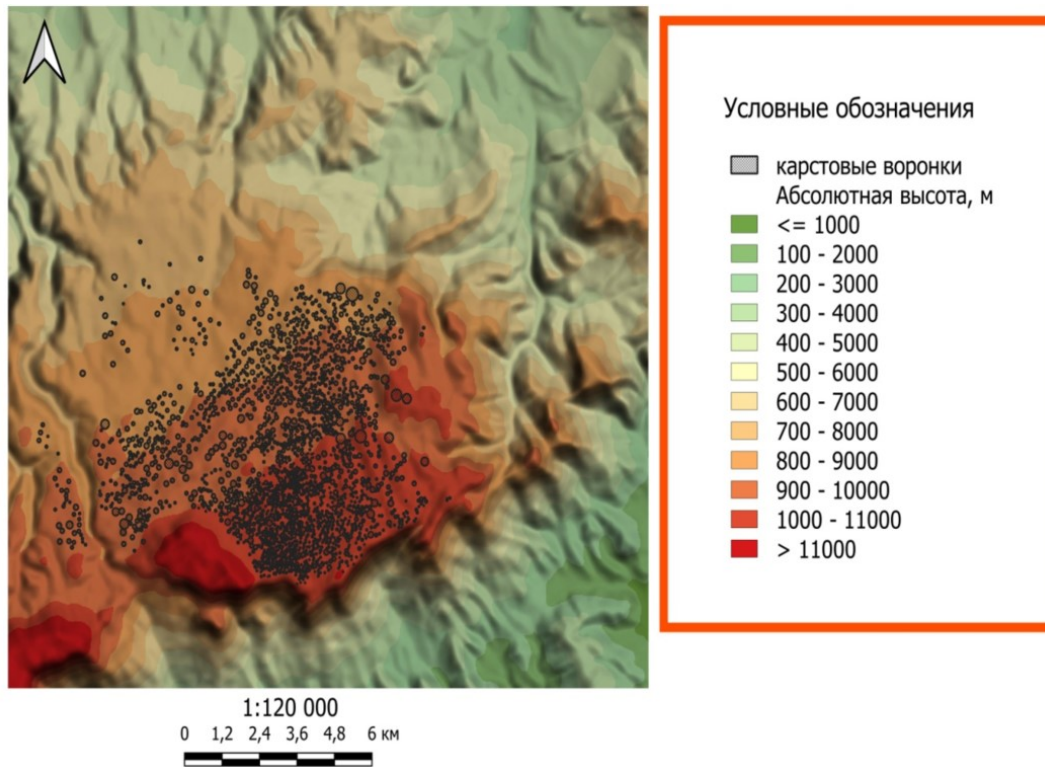


Рис. 2. Размещение карстовых воронок по результатам дешифрирования на поверхности горного массива Караби.

Затем полигональная сетка преобразуется в центроид — из каждой ячейки извлекается информация о плотности, закарстованности и переводится в сеть точек, содержащих в таблице атрибутов сведения искомым величин. После чего, файл с центроидами загружается в программу SAGA GIS. Так как в процессе практической деятельности авторов, инструменты интерполяции данной программы зарекомендовали себя лучше, первичный растровый слой интерполяции по каждому из показателей был построен именно в данной программе. Выходные картосхемы

выполнялись в QGIS на основе интерполированных данных центроидов, сгенерированных в SAGA GIS. Полученные изображения оформлялись с помощью инструмента по созданию макета карт в QGIS (рис. 3. А–Б).

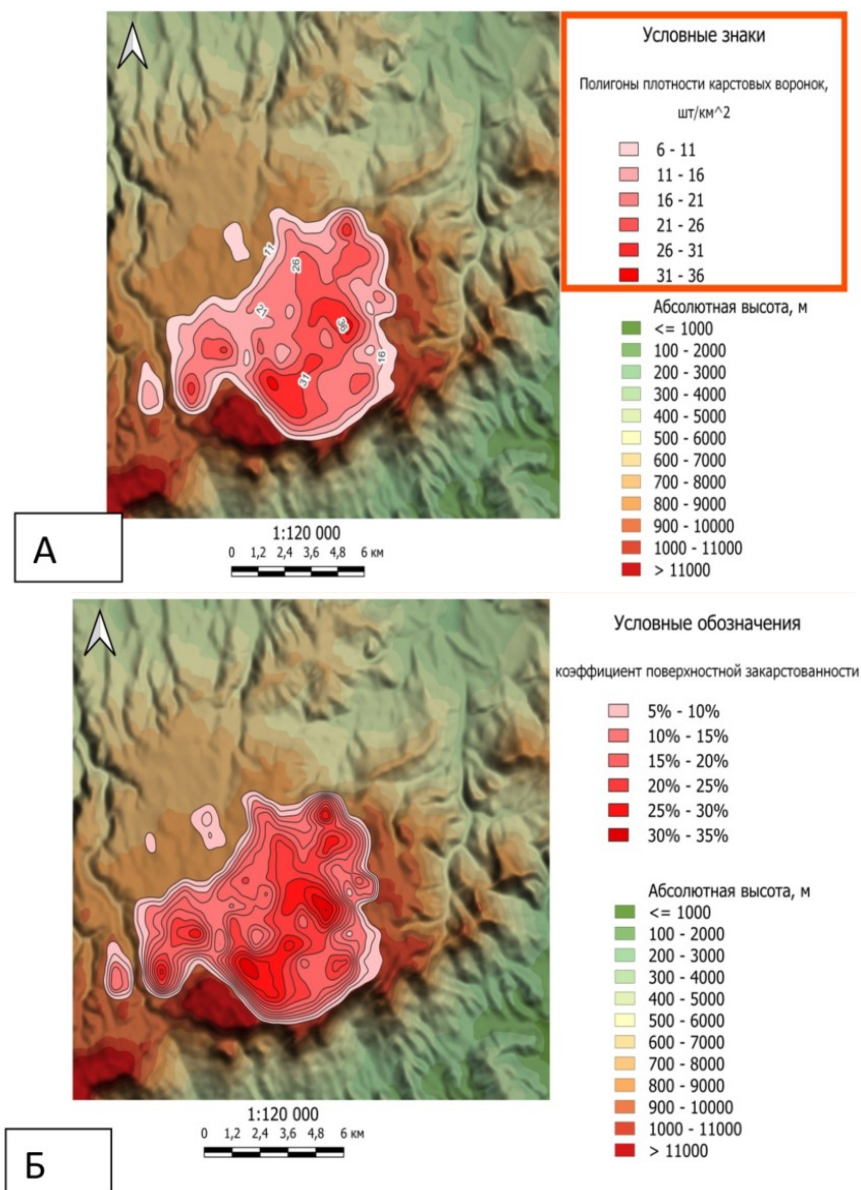


Рис. 3. Площадная поверхностная закарстованность горного массива Караби.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ
СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ
ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

**АНАЛИЗ КАРТОСХЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

Построенные картосхемы, отражая пространственное распределения ПКФ, открывают возможность получения морфометрических данных, позволяющих провести морфологический анализ поверхностных карстовых форм, изучить и систематизировать факторы, задающие пространственные рамки их развития на поверхности горного массива Караби.

При построении данных картосхем использовался растровый файл спутниковой съемки SRTM, что позволило получить информацию о распределении карстовых воронок и котловин, в зависимости от показателей гипсометрии, крутизны склона и его экспозиции [4].

Используя инструменты QGIS, связывающие пространственное расположение атрибутов гипсометрических уровней массива Караби с ареалами площадей карстовых воронок, установленных в процессе дешифрирования, получаем таблицу зависимости распространения поверхностных карстовых форм от гипсометрического уровня горного массива (табл. 1):

Таблица 1.

Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от
гипсометрии горного массива Караби

Гипсометрический уровень, м	Кол-во воронок (единиц)	Площадь воронок, м ²
0	0	0
100	0	0
200	0	0
300	0	0
400	0	0
500	0	0
600	0	0
700	19	164077
800	364	2736781
900	857	5745981
1000	1175	4085458
1100	3	6295
1200	1	4823
Итого	2419	12743415

Методом дешифрирования спутниковых снимков было закартировано 2 419 карстовых воронок и котловин, общей площадью порядка 12,7 км². Поверхностные карстовые формы рельефа распространены по территории горного массива

неравномерно и получают свое развитие с абсолютных отметок в 700 метров. Карстовые воронки достигают наибольшей численности в пределах гипсометрических уровней 900-1000 метров, с последующим резким спадом на уровнях более 1100 метров (рис. 4).

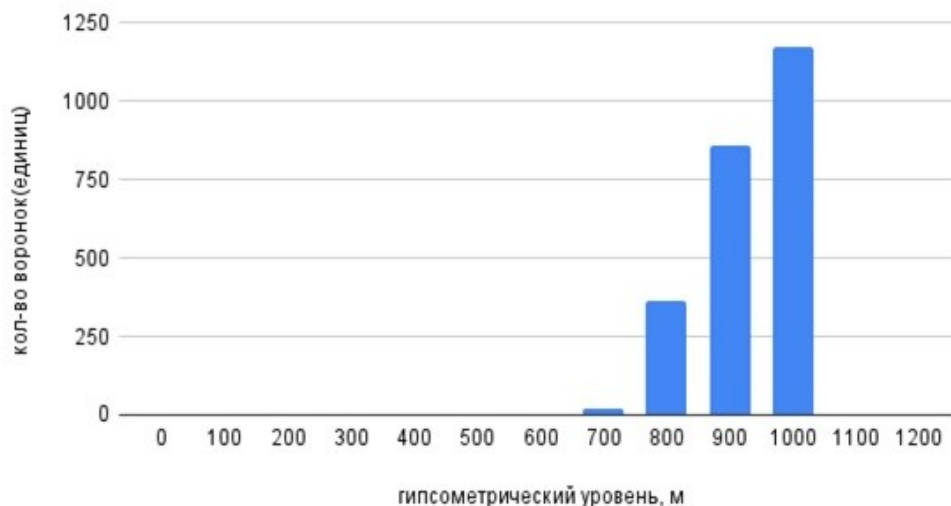


Рис. 4. Распределение карстовых воронок относительно гипсометрических ступеней массива Караби.

На основании показателей распределения количества и площадей карстовых воронок и котловин по гипсометрическим уровням Караби, был рассчитан коэффициент корреляции(r_{xy}). Значения коэффициента корреляции интерпретируются исходя из его абсолютных значений. Возможные значения коэффициента корреляции варьируют от 0 до ± 1 . Чем больше абсолютное значение коэффициента — тем выше теснота связи между двумя сравниваемыми величинами. Для оценки тесноты, или силы, корреляционной связи обычно используют общепринятые критерии, согласно которым абсолютные значения $r_{xy} < 0.3$ свидетельствуют о слабой связи, значения r_{xy} от 0.3 до 0.7 — о связи средней тесноты, значения $r_{xy} > 0.7$ — о сильной связи [7].

Расчет коэффициента корреляции с целью анализа зависимости распределения плотности и площадей карстовых воронок и котловин от гипсометрических уровней массива показал связь средней тесноты, а именно 0,43 и 0,41 соответственно.

Такая особенность распределения поверхностных карстовых форм предположительно связана с геоморфологическим строением массива Караби, состоящего из Нижнего плато, занимающего порядка 80% поверхности яйлы и охватывающего диапазон высот от 700–1100 метров над уровнем моря, где проходят самые интенсивные процессы поверхностного карстования, и Верхнего плато (хребет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

Кара-Тау), разделенного седловиной на две примерно равные части с высшей точкой всего карстового массива — г. Тай-Коба (1259 м). Верхнее плато занимает высотные ступени 1100–1259 метров и слабо подвержены карстованию.

Следующим важным морфометрическим параметром, полученным с гипсометрической картосхемы и влияющим на образование поверхностных карстовых форм, является крутизна склонов.

Считается, что карстовые воронки на склонах крутизной более 15 градусов не образуются. Б. Н. Иванов отмечает факт отсутствия поверхностных карстовых форм на склонах карстовых массивов Крымских Гор с уклоном склона более 12 градусов [8].

Авторами, была составлена картосхема крутизны склонов карстового массива Караби, согласно классификации С. С. Воскресенского (рис. 5).



Рис. 5. Распространение поверхностных карстовых форм в зависимости от крутизны склона по поверхности горного массива Караби.

Полученные данные визуально отразили связь поверхностных карстовых форм рельефа с крутизной склонов: карстовые воронки развиваются в большей степени на Нижнем плато Караби на склонах до 15 градусов. На очень крутых склонах ($\alpha \geq 35^\circ$), воронки полностью отсутствуют, что связано со значительной степенью расчлененности рельефа и высокой скоростью протекания склоновых процессов обуславливающих активную денудацию склонов.

На крутых склонах ($\alpha=15-35^\circ$) было зафиксировано всего 3 карстовые воронки (табл. 2). Данный факт указывает на разницу в скоростях протекания склоновых и карстовых процессов. Следовательно, по крутизне склона, на котором заложена карстовая воронка, можно судить о ее относительном возрасте.

Таблица 2.

Распределение карстовых воронок массива Караби
в зависимости от крутизны склона

Крутизна склона	Количество воронок, шт.
близкие к горизонтальным	858
очень пологие	1020
пологие	493
средней крутизны	45
крутые	3
очень крутые	0
Итого воронок	2419

В то же время, низкая плотность поверхностных карстовых форм, начиная с отметки 1100–1200 метров, обусловлена высокой степенью расчлененности и уклона поверхности (более 15°) склонов хребта Тай-Коба, что является исключаяющим фактором формирования поверхностных карстовых форм и обуславливает ведущую роль склоновых процессов для данного участка горного массива.

С целью отражения зависимости распространения карстовых воронок района исследования от параметров крутизны, на основании таблицы атрибутов полученной картосхемы был рассчитан коэффициент корреляции и составлена диаграмма (рис. 6).

Коэффициент парной корреляции зависимости распространения карстовых воронок от крутизны склона показал сильную линейную зависимость процессов поверхностного карстования от уклона поверхности и составил 0,87.

Данная зависимость распространения ПКФ от крутизны склонов, а также, слабая связь процессов поверхностного карстования с показателями гипсометрии массива, отсутствие карстовых воронок на отдельных пологих участках нижних ступеней еще раз доказывает позднее включение нижнего высотного уровня плато (до 800 м) в процессы поверхностного карстования [9].

Такая особенность может быть связана с предполагаемым перекрытием глинистыми отложениями в эпоху терригенного осадконакопления раннемелового периода развития Горного Крыма. Таким образом, высотная ступень 700-800 м. Нижнего плато была законсервирована водоупорным горизонтом и выключена из процессов поверхностного карстования в плоть до эрозионно-денудационной эпохи плиоцен-раннеплейстоценового времени развития Крымских Гор [9].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ
СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ
ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

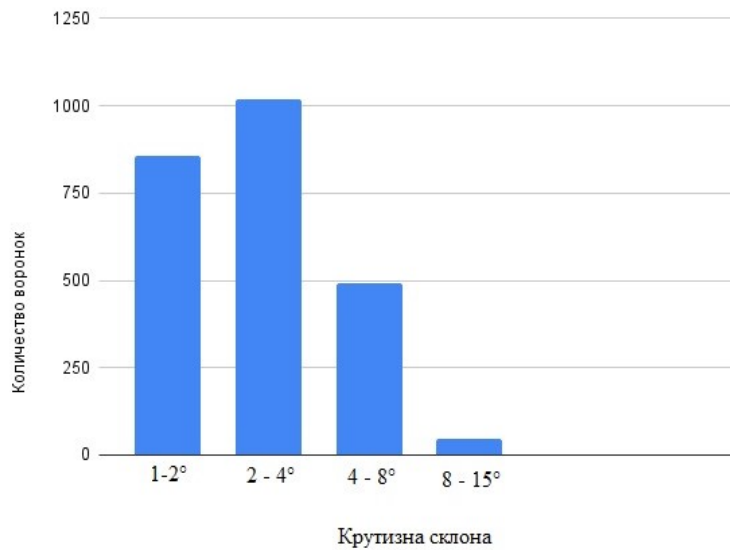


Рис. 6. Диаграмма распределения кол-ва карстовых воронок относительно крутизны склонов массива Караби.

Следующий показатель, определяющий направление пространственного развития ПКФ, является экспозиция склона [2; 10]. На базе SRTM, в QGIS была построена экспозиция склонов карстового массива Караби (рис. 7). Анализ рельефа объекта исследования показал, что для данной территории характерны склоны северо-западной (17,2%), северной (14%) и северо-восточной экспозиции (15,1%).

Таким образом, на их долю выпадает 46,3 % площади всех склонов, относящихся к массиву Караби (рис. 8), что связано с геолого-геоморфологическим строением карстового массива, представляющим собой моноклираль, выраженную в рельефе классической куэстой с пологими склонами северной экспозиции и обрывистыми южными и юго-восточными склонам.

Число размещения карстовых воронок по склонам различной экспозиции фактически прямо пропорционально площади, занимаемой этими склонами по территории массива (рис. 9). На долю склонов северо-западной экспозиции приходится 20% всех дешифрованных поверхностных карстовых форм. На склоны северной и северо-восточной экспозиции приходится по 16 и 13% процентов соответственно.

Коэффициент корреляции зависимости распространения карстовых форм от экспозиции склона равняется 0,84 и указывает на значимую тесную связь данного показателя с процессом поверхностного карстообразования. Это обусловлено влиянием экспозиции на целый ряд факторов, влияющих на развитие поверхностных карстовых форм, таких как распределение атмосферных осадков, господствующих ветров, продолжительности солнечного сияния, поступление и распределение солнечной радиации.

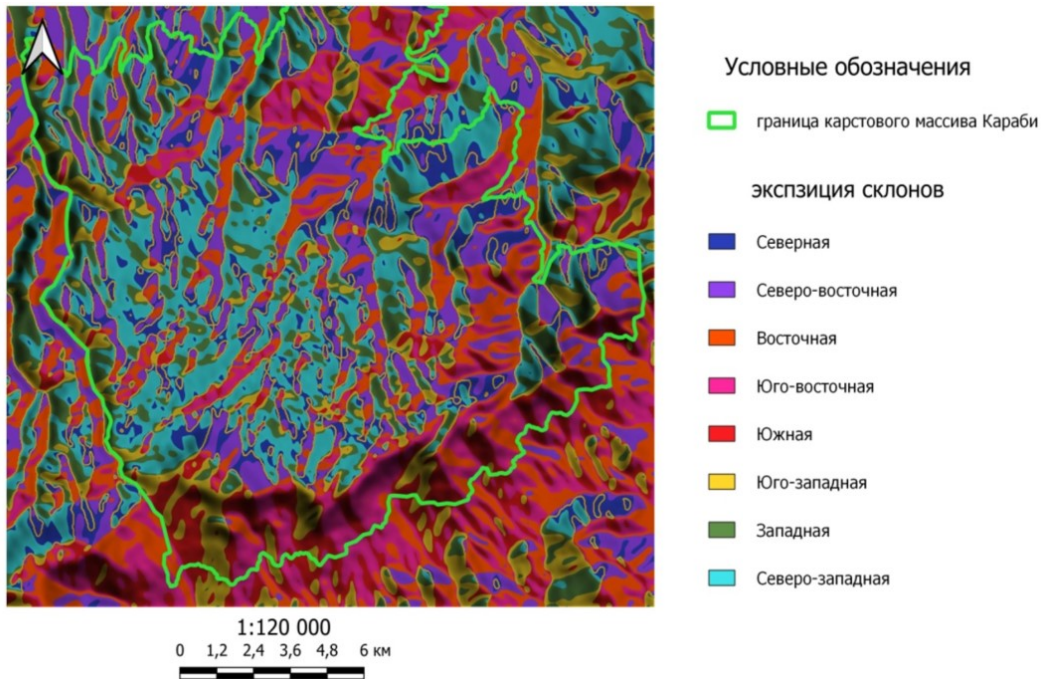


Рис. 7. Экспозиция склонов карстового массива Караби.



Рис. 8. Доля занимаемой склонами массива Караби экспозиции.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

АНАЛИЗ КАРТОСХЕМЫ ПЛОТНОСТИ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК И КОТЛОВИН

Карстовые воронки приурочены к приповерхностной зоны аэрации в сочетании с участками, имеющими максимальную степень трещиноватости карстующихся пород обуславливающих развитие эпикарста. Следовательно, аномалию различной плотности и степени закарстованности участков с одинаковыми показателями крутизны и экспозиции склонов, необходимо рассмотреть с позиции разницы степени трещиноватости верхнеюрских известняков [1, 2, 11, 12, 13]. Для отражения зависимости распространения ПКФ от литолого-геологической обстановки, картосхема плотности карстовых воронок была совмещена с Государственной геологической карты ВСЕГЕИ масштабом 1:200 000 [14] (рис. 10).

Полученная картосхема отражает характер залегания маркирующих горизонтов слоистых и брекчированных верхнеюрских известняков, отличающихся высокой степенью трещиноватости, совпадающим с направлением и характером развития карстовых воронок (с поправкой на условия крутизны и экспозиции склонов).

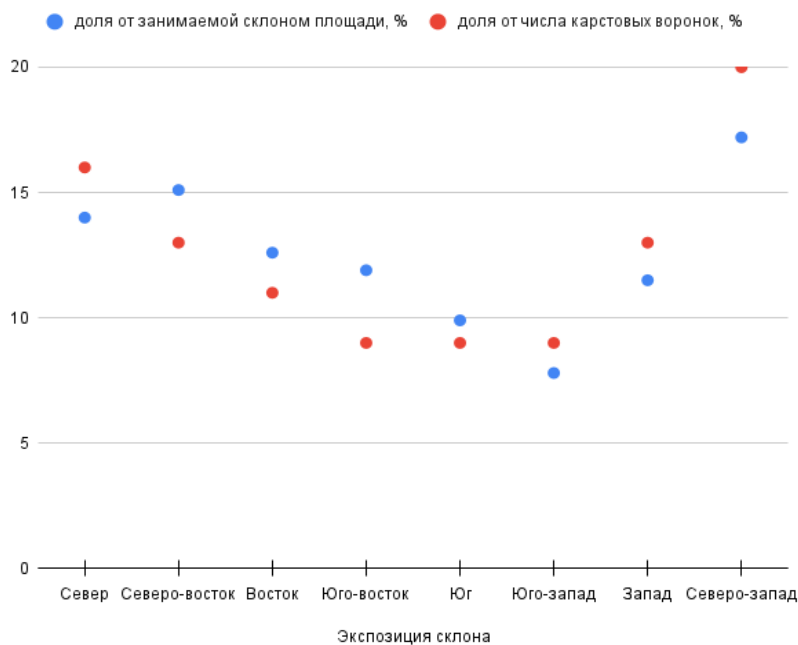


Рис. 9. Разброс числа карстовых воронок от площадей склонов различной экспозиции.

Данные факторы: сочетание приповерхностной зоны аэрации с зонами трещиноватости маркирующих горизонтов, косвенно указывают на близость разломных спелеоиницирующих участков, каналов растворения эмбриональных и крупных полостей [1, 2, 12, 13].

Следовательно, показатели высокой плотности карстовых воронок указывают на места вскрытия и выполнения подземных полостей и могут быть использованы с целью прогнозирования и поиска новых пещер, в частности нивально-коррозионного типа, что обусловлено генетической близостью с процессом образования воронок.

Высотная ступень 700-800 м сложена хорошо карстующимися верхнеюрскими известняками, и отличается благоприятными показателями крутизны и экспозиции склонов. Однако, данный гипсометрический уровень отстает по показателям плотности и площадной поверхностной закарстованности от других высотных ступеней. Это объясняется тем, что на этом уровне известняки длительное геологическое время были перекрыты нижнемеловыми глинами, занимающие в настоящее время, нижнюю часть восточного и северо-восточного склон массива.

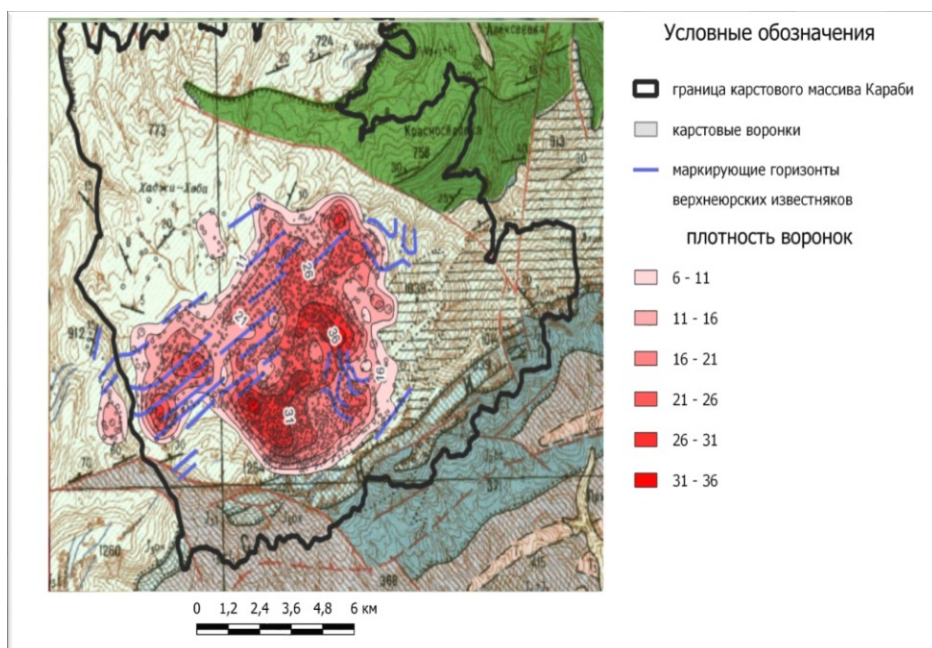


Рис. 10. Картограмма наложения плотности карстовых воронок на фрагмент геологической карты.

Таким образом, именно нижнемеловые глинистые отложения служили водоупорным горизонтом, который препятствовал единому временному включению в процессы поверхностного карстования всей территории нижнего плато массива Караби [9]. И только в середине геоморфологического этапа (плиоцен-раннеплейстоцен) развития Крымских гор, после размыва глинистых отложений и вскрытия карстующихся известняков, нижняя высотная ступень плато Караби (700–800 м) была вовлечена в процесс образования поверхностных карстовых форм.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

ВЫВОДЫ

Рассмотренная методика работы с данными спутниковых съемок земной поверхности для целей картирования и последующего комплексного морфометрического анализа поверхностных карстовых форм с помощью средств геоинформатики, показала достаточно высокую информативность.

На основании серии картосхем, составленных авторами, и расчета коэффициентов парной корреляции различных морфометрических показателей, были установлены морфогенетические особенности развития поверхностного карста массива Караби: результаты проведенного анализа показали тесную и значимую связь распространения поверхностных карстовых форм от показателей крутизны и экспозиции склонов, а также указал на нелинейную, тесную связь распределения ПКФ в зависимости от высотных ступеней, при прочих равных показателях крутизны и экспозиции. Данный факт свидетельствует о разнице во времени включения отдельных гипсометрических уровней в процесс поверхностного карстообразования.

В целом, разработанная методика, достаточно информативно, комплексно и детально передает характер и особенности размещения поверхностных форм карстового рельефа, позволяет включать огромный массив морфометрических данных ПКФ в цифровую модель рельефа и проводить математические операции с совокупностью этих параметров.

Перспективность дальнейших работ по разработке методов картирования карстового рельефа средствами ГИС открывает возможность проведения комплексного регионального морфогенетического анализа карста Горного Крыма.

Список литературы

1. Амеличев Г. Н. Морфометрический анализ карста на нижнем плато массива Чатырдаг (Горный Крым) // Свет. 2007. № 1 (32). С. 16–21.
2. Вахрушев Б. А. Морфологический анализ поверхностного карста Крымских гор // Культура народов Причерноморья. 2002. №35. С. 15–20.
3. Миртова И. А. Учебное пособие по курсу «Дешифрирование снимков». Изучение динамики природных процессов и объектов по аэро- и космическим снимкам // М., МГУГиК, 2006. 77 с.
4. Вахрушев Б. А., Кунов А. А., Кунов В. А., Швалеев В. Н. Особенности подготовки растровых файлов спутниковой съемки SRTM для работы в ГИС – карстовый рельеф на примере гипсометрического районирования карстового массива Караби (Горный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. Том 8(74). №1. С. 219–224.
5. Максимович Г. А. Методы изучения карста // Ученые записки Молотовского государственного университета им. А. М. Горького. Пермь. 1956. Том 10. Вып. 2. С. 19–36.
6. Толмачев В. В. Троицкий Г. М. Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М: Стройиздат, 1986. 176 с.
7. Бочаров М. К. Методы математической статистики в географии. М.: Мысль, 1971. 375 с.
8. Иванов Б. Н., Зенгина С. М. Применение морфометрического анализа к изучению современных физико-географических процессов (на примере Горного Крыма) // Вопросы морфометрии. 1967. Вып. 2. С. 10–16.
9. Вахрушев Б. А. Палеогеография Крыма в свете новейших карстолого-спелеологических исследований // Культура народов Причерноморья. 2001. №17. С. 11–20.
10. Симонов О. Е. Морфометрический анализ рельефа // Изд-во: СГУ, 1998 г., 272 с.

11. Токарев С. В. Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование / Токарев Сергей Викторович. Дисс. на соискание ученой степени кандидата географических наук. Симферополь, 2021.
12. Климчук А. Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста // К.: ИГН АН УССР, 1989. 37 с.
13. Williams P.W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology // J. of hydrology, 1983, t.61. p. 17–21.
14. Цифровой каталог государственных геологических карт Российской Федерации масштаба 1: 200 000 (второе поколение) // Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского. [Электронный ресурс]: URL: <http://vsegei.ru> (дата обращения: 15.12.2021).

**USING THE METHOD OF DECODING SATELLITE IMAGES IN ORDER TO
MAP SURFACE KARST FORMS AND SUBSEQUENT SPATIAL ANALYSIS OF
THE NATURE OF THEIR PLACEMENT**

Vakhrushev B. A.¹, Kunov A. A.², Kunov V. A.³

*^{1,2,3}V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: ¹vakhb@inbox.ru, ²kunovaleksej@gmail.com*

Currently, the development of geoinformation software and methods of remote sensing of the Earth makes it possible to apply a huge array of karstological data, in particular, karst forms, to give them areal and volumetric characteristics, work with these parameters and informatively transfer the result of processing to cartographic materials.

This article shows the methodology of working with data from open satellite surveys of the Earth's surface for the purposes of decoding and subsequent mapping of surface karst landforms, taking into account the resolution of the remote positioning methods used. At the same time, the main research methods were the complex of decoding satellite images, the cartographic method and spatial analysis of morphometric parameters of the surface karst.

The paper presents a technique for decoding surface karst forms (SKF) of relief (karst craters and basins). Various methods of mapping the results of decoding, with subsequent analysis of morphometric parameters of karst forms, have been applied. Based on the morphometric indicators of the PKF and their placement on the surface of the karst massif of Karabi (Crimea Mountainous), a morphological characteristic of the conditions and features of the spatial development of the surface karst of the studied territory is given. In the future, the application of this technique will serve as the basis for the regional complex morphological characteristics of karst forms of the Crimea Mountainous.

Keywords: decoding, surface karst form (SKF), morphological analysis, morphometric indicators, density of surface karst forms, surface areal karst formation, coefficient of surface karst formation.

References

1. Amelichev G. N. Morfometricheskij analiz karsta na nizhnem plato massiva CHatyrdag (Gornyj Krym) // Svet. 2007. № 1 (32). S. 16–21. (In Russian).
2. Vakhrushev B. A. Morfologicheskij analiz poverhnostnogo karsta Krymskih gor // Kul'tura narodov Prichernomor'ya. 2002. №35. S. 15–20. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ
СНИМКОВ С ЦЕЛЮ КАРТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ
ФОРМ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

3. Mirtova I. A. Uchebnoe posobie po kursu «Deshifrirovaniye snimkov». Izuchenie dinamiki prirodnykh processov i ob'ektov po aero- i kosmicheskim snimkam // M., MGUGiK, 2006. 77 s. (In Russian).
4. Vahrushev B. A., Kunov A. A., Kunov V. A., Shvaleev V. N. Osobennosti podgotovki rastrovyykh fajlov sputnikovoy s"emki SRTM dlya raboty v GIS – karstovyy rel'ef na primere gipsometricheskogo rajonirovaniya karstovogo massiva Karabi (Gornyy Krym) // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2022. Tom 8(74). №1. S. 219–224. (In Russian).
5. Maksimovich G. A. Metody izucheniya karsta // Uchenye zapiski Molotovskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. M. Gor'kogo. Perm'. 1956. Tom 10. Vyp. 2. S. 19–36. (In Russian).
6. Tolmachev V. V. Troickij G. M. Homenko V. P. Inzhenerno-stroitel'noe osvoenie zakarstovannykh territorij. M: Strojizdat, 1986. 176 s. (In Russian).
7. Bocharov M. K. Metody matematicheskoy statistiki v geografii. M.: Mysl', 1971. 375 s. (In Russian).
8. Ivanov B. N., Zengina S. M. Primeneniye morfometricheskogo analiza k izucheniyu sovremennykh fiziko-geograficheskikh processov (na primere Gornogo Kryma) // Voprosy morfometrii. 1967. Vyp. 2. S. 10–16. (In Russian).
9. Vahrushev B. A. Paleogeografiya Kryma v svete novejsih karstologo-speleologicheskikh issledovaniy // Kul'tura narodov Prichernomor'ya. 2001. №17. S. 11–20. (In Russian).
10. Simonov O. E. Morfometricheskij analiz rel'efa // Izd-vo: SGU, 1998 g., 272 s. (In Russian).
11. Tokarev S. V. Uyazvimost' karstovykh podzemnykh vod Gornogo Kryma k zagryazneniyu: vyyavlenie, ozenka i kartirovaniye / Tokarev Segej Viktorovich. Diss. na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata geograficheskikh nauk. Simferopol', 2021. (In Russian).
12. Klimchuk A. B. Rol' pripoverhnostnoy zony karstovykh massivov v gidrogeologii i morfogeneze karsta // K.: IGN AN USSR, 1989. 37 s. (In Russian).
13. Williams P.W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology // J. of hydrology, 1983, t.61. p. 17–21.
14. Cifrovoy katalog gosudarstvennykh geologicheskikh kart Rossijskoj Federacii masshtaba 1: 200 000 (vtoroe pokoleniye) // Vserossijskiy nauchno-issledovatel'skiy geologicheskij institut im. A.P. Karpinskogo. [Elektronnyy resurs]: URL: <http://vsegei.ru> (data obrashcheniya: 15.12.2021). (In Russian).

Поступила в редакцию 18.09.2022 г.