

Гидрологический анализ цифровой модели рельефа как инструмент карстологического прогноза

Е. В. Дробинина

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Пермь, 614990, Россия

E-mail: alenadrobinina@yandex.ru

Статья посвящена вопросу применимости гидрологического анализа цифровой модели рельефа в карстологическом прогнозе. На закарстованной территории в пределах Добрянского р-на Пермского края для участка, расположенного в районе развития карбонатно-сульфатного карста с широким распространением поверхностных карстовых форм, осуществлено сравнительное дешифрирование карстовых форм посредством гидрологической коррекции цифровой модели рельефа (ЦМР) и выполнено построение и анализ морфометрических карт. С использованием трёх ЦМР: данных усовершенствованного спутника наблюдения за сушей (*англ.* Advanced Land Observation Satellite — ALOS-DEM), данных радиолокационной топографической миссии шаттла (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission — SRTM) и цифровой модели местности на основе LiDAR (*англ.* LiDAR-based digital terrain model) — проведено инструментальное выделение бессточных впадин. Затем осуществлён анализ пространственного соотношения их местоположения с карстовыми воронками, выделенными в процессе маршрутного наблюдения. С учётом геоботанических условий изучаемой территории и максимального диаметра поверхностных карстовых форм отмечено, что оценку поверхностной закарстованности методом гидрологической коррекции ЦМР на детальном уровне рекомендуется осуществлять с применением высокоточной ЦМР на основе LiDAR, исключающей влияние растительности на результат анализа и позволяющей дешифрировать карстовые воронки диаметром до 30 м. В результате построения и анализа морфометрических карт с использованием ЦМР на участке были выделены локальные положительные (поднятия) и отрицательные (опускания) неотектонические структуры. Отмечено, что карстовые воронки на изучаемой территории тяготеют к первым, что подтверждает исследования карстоведов: в карстовых областях прослеживается территориальная приуроченность карстопроявлений к сводам или апикальным зонам древних структур, зонам и участкам повышенной, локализованной трещиноватости и водообильности пород неотектонических поднятий. По результатам анализа, представленным графически, можно выделить диапазоны приращений абсолютных отметок базисных поверхностей, потенциально опасные в карстовом отношении, и, таким образом, зонировать участки неотектонических поднятий по карстовой опасности.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, поверхностная закарстованность, карстовый массив, карстовая опасность, гидрологическая коррекция, морфометрический анализ

Одобрена к печати: 14.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-96-103

Введение

Неотъемлемой частью оценки карстовой опасности выступает выделение поверхностных карстовых форм, провести которое исключительно в полевых условиях зачастую сложно и экономически нецелесообразно, особенно если речь идёт о буферной зоне вокруг проектируемого объекта, которая в некоторых случаях может достигать 2,5 км. В случае проектирования протяжённых линейных сооружений вопрос полевого рекогносцировочного обследования буферной зоны объекта становится довольно трудозатратным. В таких условиях весьма полезным оказывается дешифрирование карстовых форм с использованием космических изображений.

Полуавтоматизированное обнаружение карстовых воронок с применением геоинформационных систем (ГИС) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) имеет ряд преимуществ перед ручным дешифрированием, таких как быстрое выделение карстовых форм на большой площади, уменьшение числа ошибок, связанных с человеческим фактором, и практический сбор

данных в труднодоступных местах (леса, глубокие ущелья и т. д.). Однако такой подход нуждается в проверке в полевых условиях в сочетании с геоморфологическим и морфометрическим анализом карстовых воронок, среди которых посредством полуавтоматизированного метода могут быть выделены техногенные образования. Для устранения подобных ошибок и тем самым сокращения ложных выделений карстовых форм необходима тщательная интерпретация с использованием, например, морфометрических пороговых критериев и подтверждённых полевых измерений (Garas et al., 2020).

Цель данной работы — показать возможность применения гидрологического анализа цифровой модели рельефа в карстологическом прогнозе. Достижение цели осуществлялось решением двух задач: первая — поиск бессточных впадин (карстовых форм) с использованием ЦМР различного пространственного разрешения, вторая — построение и анализ морфометрических карт и поиск закономерностей в распределении поверхностных карстовых форм.

Дешифрирование карстовых форм посредством гидрологической коррекции ЦМР

В карстовых районах подземные воды находятся в тесной взаимосвязи с поверхностными и контролируются гидрологическими и геоморфологическими особенностями территории. ЦМР здесь весьма информативна для гидрологического моделирования с целью оценки поверхностного стока и подпитки подземных вод (Fiorillo et al., 2015), выделения защитных зон для колодцев и родников (Goldscheider, 2010), моделирования точечных источников загрязнения (Goldscheider et al., 2008; Leone et al., 2022). Кроме того, рядом авторов для дешифрирования карстовых форм использована гидрологическая коррекция ЦМР, суть которой заключается в поиске отрицательных замкнутых элементов рельефа округлой формы — бессточных впадин, генетически связанных с карстовым процессом (Полякова и др., 2018, 2021; de Carvalho et al., 2014; Leone et al., 2022). Прикладной характер картирования поверхностных карстовых форм обуславливает высокую его эффективность как для оценки непосредственно карстовой опасности, так и для зонирования территории с целью анализа экологического состояния территории, так как карстовые формы зачастую служат источниками проникновения загрязнений в подземные водоносные горизонты (Leone et al., 2022).

Характерной особенностью поверхностных карстовых форм в Пермском крае представляется развитие кустарниковой растительности на бортах, склонах и днищах карстовых воронок, что вызывает существенные трудности при проведении карстологического прогноза, в частности при оценке поверхностной закарстованности в результате выделения бессточных впадин при гидрологической коррекции бесплатных глобальных цифровых моделей рельефа (ALOS-DEM — *англ.* Advanced Land Observation Satellite, SRTM — *англ.* Shuttle Radar Topography Mission).

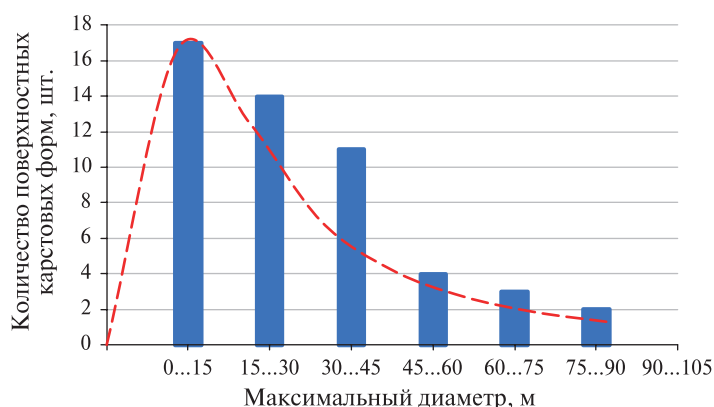


Рис. 1. Распределение поверхностных карстовых форм по диаметрам

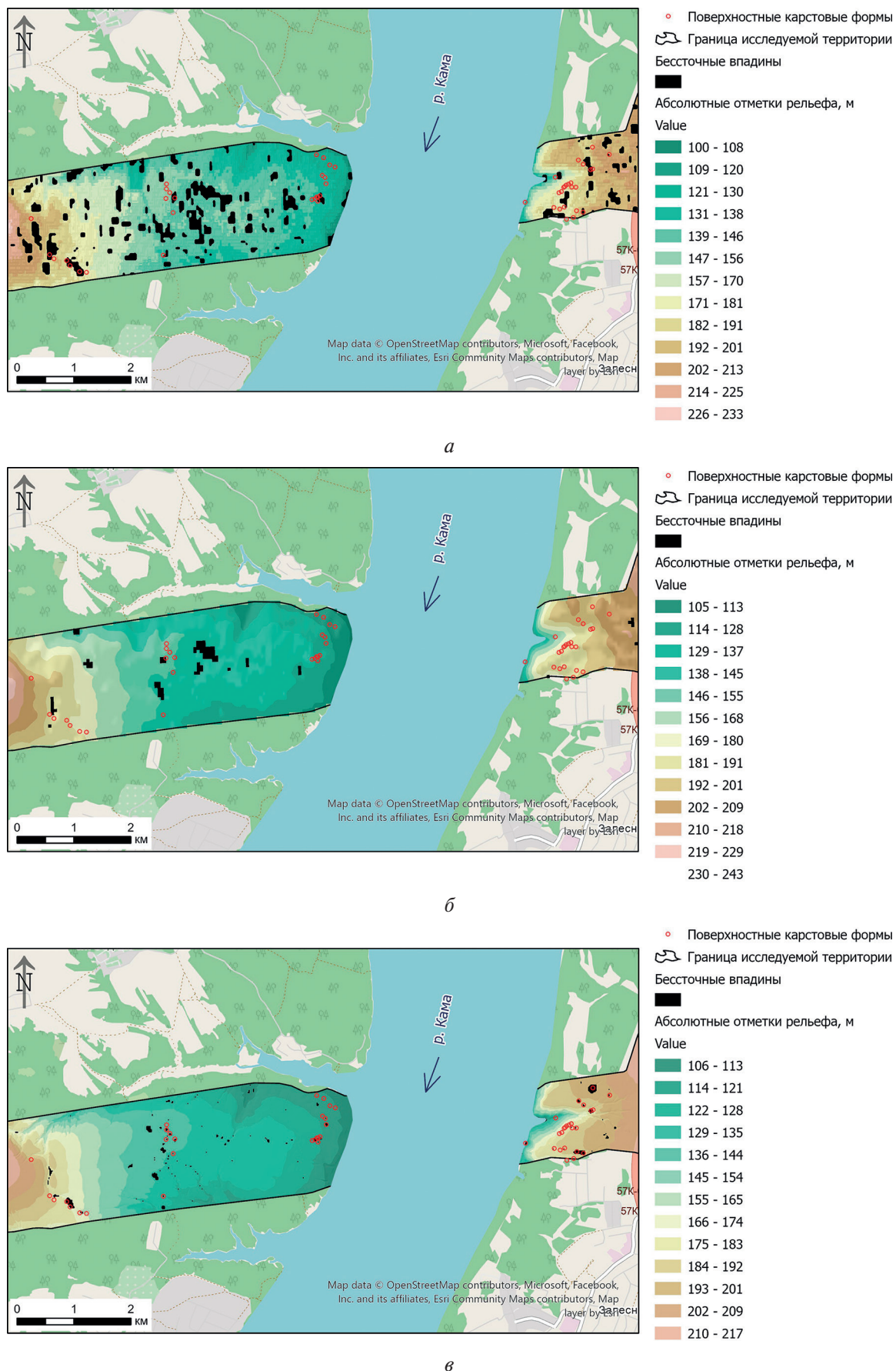


Рис. 2. Результат выделения бессточных впадин с применением:
 а — ALOS-DEM; б — SRTM; в — LiDAR-based digital terrain model (DTM)

Для того чтобы показать возможность применения полуавтоматизированного обнаружения карстовых воронок посредством выделения бессточных впадин, данный подход был реализован в программе ArcGIS с использованием инструментов гидрологического анализа. В качестве изучаемой территории выбрана полоса отвода проектируемой автомобильной дороги с мостом через р. Каму, в 5 км севернее Мыса Стрелка — слияния рек Чусовая и Кама — в Добрянском р-не Пермского края. Подробная характеристика изучаемой территории приведена автором ранее при оценке инженерно-геологических условий данного карстового массива (Дробинина, Золотарев, 2022). Распределение карстовых воронок по диаметрам представлено на *рис. 1* (см. с. 97). Большинство карстовых форм характеризуются максимальными диаметрами до 30 м (31 шт.), остальные — 30–90 м (20 шт.)

В качестве исходных цифровых моделей рельефа были использованы: ALOS-DEM, SRTM, данные лазерного сканирования (*англ.* LiDAR-based digital terrain model — DTM) (*рис. 2*, см. с. 98). После инструментального выделения бессточных впадин проведён анализ пространственного соотношения их местоположения с карстовыми воронками, выделенными в процессе маршрутного наблюдения. Доля пространственного совпадения бессточных впадин с зарегистрированными в полевых маршрутах воронками на изучаемом участке для SRTM составляет 0 %, для ALOS-DEM — 18 %, для DTM — более 60 %. Если принять во внимание распределение поверхностных карстовых форм по диаметрам (см. *рис. 1*), то легко объяснить результаты пространственным разрешением ЦМР, которое для моделей ALOS-DEM и SRTM составляет 30 м. При выборе ЦМР для такого анализа следует руководствоваться характеристикой поверхностной закарстованности территории, в частности максимальным диаметром карстовых форм.

В подобных геоботанических условиях оценку поверхностной закарстованности методом гидрологической коррекции ЦМР на детальном уровне рекомендуется осуществлять с применением высокоточной ЦМР — LiDAR-based digital terrain model (DTM), исключающей влияние растительности на результат анализа.

Построение и анализ морфометрических карт

Кроме поиска бессточных впадин с использованием инструментов гидрологического анализа в рамках комплексной оценки карстоопасности был проведён морфометрический анализ посредством построения базисных поверхностей (морфометрических карт), представляющих собой цифровую модель рельефа местности в определённый этап неотектонического развития территории (Нугманов и др., 2016). Карта базисной поверхности, построенная с учётом всех долин, в том числе и долин первого порядка, т. е. ложбин стока, незначительно отличается от формы современной топографической поверхности. По мере увеличения порядка долин, тальвеги которых участвуют в построении базисной поверхности, рельеф последней будет всё больше отличаться от современного (Философов, 1967).

Принципиально основы анализа топографических данных в целях выделения тектонических элементов заложены были В. П. Философовым, разработавшим морфометрический метод (Философов, 1960, 1967). Предложенный Философовым метод даёт возможность выявить особенности тектонического строения территории и оконтурить площади с локальными и региональными положительными тектоническими структурами (Философов, 1967).

Для изучаемого участка с использованием ЦМР сначала сформирован слой водотоков различных порядков. Порядок водотоков определялся по методу Стралера: всем сегментам водотоков, не имеющим притоков, присваивалась единица (водотоки первого порядка — *ложбины стока* (Философов, 1967)). При пересечении водотоков с одинаковым порядком последний увеличивался на единицу (Tarboton et al., 1991). В результате была смоделирована овражно-балочная и речная сеть водотоков от первого до четвёртого порядков. Методика автоматического построения речной сети с использованием открытых данных ЦМР весьма детально описана в работе Р. Коломбо (*англ.* R. Colombo) с коллегами (Colombo et al., 2007). В целом, по данным исследователей, результаты подобного выделения водотоков харак-

теризуются высокой точностью, что было подтверждено сравнением полученных данных с цифровыми данными о реках и водосборах на различных масштабных уровнях (Colombo et al., 2007).

Далее вершины сегментов — водотоков различных порядков — переводились в точки, в которые затем вставлялись значения абсолютных отметок, извлечённые с ЦМР. Базисные поверхности для 1–3-го порядков строились интерполяцией значений между соответствующими точками. Водотоки четвёртого порядка в силу ограниченного распространения в построении базисных поверхностей не участвовали.

Для качественного оконтуривания неотектонических структур с применением базисных поверхностей необходимо выделение водотоков более высоких порядков. Однако целевым назначением данного исследования является поиск закономерностей в характере поверхностной закарстованности относительно локальных повышений в пределах полосы отвода проектируемого сооружения, поэтому масштаб исследования ограничен водотоками относительно низких порядков.

При сравнении базисных поверхностей разных порядков с ЦМР посредством построения алгебраических выражений растровых моделей (вычитания) были выделены локальные положительные (поднятия) и отрицательные (опускания) неотектонические структуры. Было отмечено, что карстовые воронки на изучаемой территории тяготеют к положительным элементам неотектонического строения (рис. 3). В карстовых областях прослеживается территориальная приуроченность карстопроявлений к сводам или апикальным зонам древних структур, зонам и участкам повышенной, локализованной трещиноватости и водообильности пород неотектонических поднятий (Катаев, 2004; Хабибуллина, Вишневецкий, 1987).

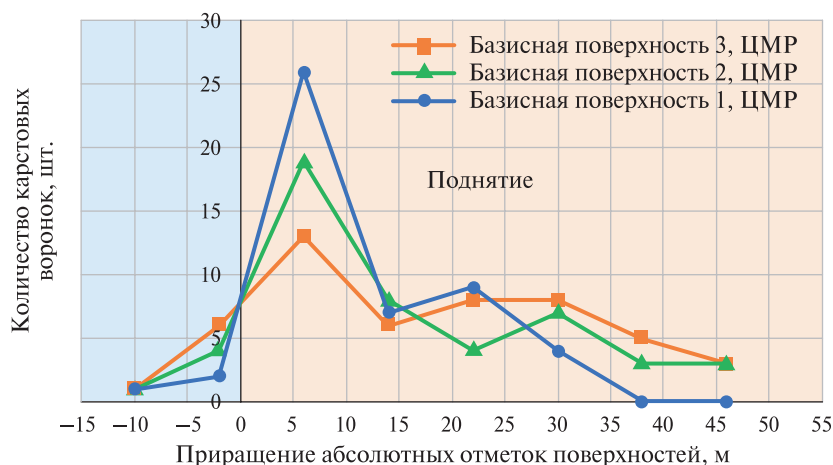


Рис. 3. Кривые распределения карстовых воронок в зависимости от величины приращения абсолютных отметок базисных поверхностей различного порядка и ЦМР

Интересно, что это явно проявляется при сравнении относительно древней базисной поверхности, наиболее полно отражающей контуры крупных неотектонических структур (Нугманов и др., 2016), с современной, когда наблюдается отрицательный эксцесс, большая разбросанность частот ряда с ярко выраженной асимметрией в сторону положительных значений и слабо выраженная бимодальность кривой распределения.

Подобный характер кривых распределения также отмечается на других карстовых территориях. Например, на участке в пределах Республики Марий Эл, в окрестностях оз. Яльчик, расположенного в центральной части Волжского р-на на юге национального парка «Марий Чодра», ранее был проведён анализ неотектонической активности территории посредством построения базисных морфометрических поверхностей, где отмечены приуроченность карстовых форм к неотектоническим поднятиям и схожий характер при сравнении относительно древней базисной поверхности с современной (Дробинина, 2021).

С использованием данных закономерностей и карт разностей базисных поверхностей (Дробинина, 2021) (см. рис. 3) в целях карстологического прогноза можно оконтурить потенциально опасные в карстовом отношении участки локальных неотектонических поднятий, отвечающие пиковым и близким к ним значениям на графиках распределения.

Выводы

Гидрологический анализ ЦМР в карстологических целях становится весьма эффективным дополнением к полевому рекогносцировочному обследованию и к ручному дешифрированию карстовых воронок на участках проектирования сооружений в закарстованных районах. Особенно это касается проектирования протяжённых линейных сооружений, где с учётом буферного расстояния от оси трассы проводить полевые маршрутные наблюдения трудозатратно, если принять во внимание ограниченные сроки, а зачастую и неблагоприятные сезоны проведения инженерных изысканий.

На изучаемой территории в силу геоботанических особенностей и с учётом максимального диаметра поверхностных карстовых форм применение полуавтоматизированного выделения последних рекомендуется проводить с использованием высокоточных ЦМР, чтобы исключить влияние кустарниковой растительности и дешифрировать карстовые воронки диаметром до 30 м.

Кроме выделения бессточных впадин в карстовых районах весьма информативным представляется построение и анализ морфометрических карт. С использованием полученных в результате его проведения закономерностей и карт разностей базисных поверхностей можно выделить потенциально опасные в карстовом отношении участки локальных неотектонических поднятий.

Литература

1. Дробинина Е. В. Оптимизация камеральной обработки материалов инженерно-геологических изысканий с использованием ГИС // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы 16-й Общероссийской научно-практ. конф. изыскат. организаций. М.: ООО «Геомаркетинг», 2021. С. 93–99.
2. Дробинина Е. В., Золотарев Д. Р. Анализ инженерно-геологических условий и изменчивости состояния дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 2. С. 48–62. DOI: 10.31857/S0869780922020023.
3. Катаев В. Н. Основы структурного карстоведения. Пермь, 2004. 143 с.
4. Нугманов И. И., Нугманова Е. В., Чернова И. Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский ун-т, 2016. 53 с.
5. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Геоэкологическая оценка вероятности активизации карстовых процессов на основе цифрового моделирования рельефа // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата «Геориск-2018»: материалы 10-й Международ. научно-практ. конф. В 2-х т. Т. 2 / отв. ред. Н. Г. Мавлянова. М., 2018. С. 221–225.
6. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Беленович Т. Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского ун-та. Сер.: Естественные науки. 2021. Т. 163. № 2. С. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
7. Философов В. П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960. 94 с.
8. Философов В. П. Методика вычисления и геолого-геоморфологическая интерпретация коэффициента расчлененности рельефа // Вопросы морфометрии. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1967. Т. 1. Вып. 2. С. 112–146.
9. Хабибуллина Ф. С., Вишневский П. В. Методические рекомендации по изучению карста при поисках и разведке месторождений карбонатных пород / ВНИИ геологии неруд. полез. ископаемых. Казань, 1987. 97 с.

10. Colombo R., Vogt J. V., Soille P., Paracchini M. L., de Jager A. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data // CATENA. 2007. V. 70. Iss. 3. P. 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.001>.
11. de Carvalho Jr. O. A., Guimarães R. F., Montgomery D. R., Gillespie A. R., Gomes R. A. T., Martins É. d. S., Silva N. C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil // Remote Sensing. 2014. V. 6. Iss. 1. P. 330–351. DOI: 10.3390/rs6010330.
12. Fiorillo F., Pagnozzi M., Ventafridda G. A model to simulate recharge processes of karst massifs // Hydrological Processes. 2015. V. 29. Iss. 10. P. 2301–2314. <https://doi.org/10.1002/hyp.10353>.
13. Garas K. L., Madrigal M. F. B., Agot R. D. D., Canlas M. C. M., Manzano L. S. J. Karst depression detection using IFSAR-DEM: A tool for subsidence hazard assessment in Panglao, Bohol // Carsologica Sinica. 2020. V. 39. No. 6. P. 928–936. DOI: 10.11932/karst20200612.
14. Goldscheider N. Delineation of spring protection zones. Ch. 8 // Groundwater Hydrology of Springs / eds. Kresic N., Stevanovic Z. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2010. P. 305–338.
15. Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology // Intern. J. Speleology. 2008. V. 37(1). P. 27–40. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>.
16. Leone G., Catani V., Pagnozzi M., Ginolfi M., Testa G., Esposito L., Fiorillo F. Hydrological features of Matese Karst Massif, focused on endorheic areas, dolines and hydroelectric exploitation // J. Maps. 2022. P. 1–13. DOI: 10.1080/17445647.2022.2144497.
17. Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data // Hydrological Processes. 1991. V. 5. Iss. 1. P. 81–100. DOI: 10.1002/hyp.3360050107.

Hydrological analysis of a digital elevation model as a tool of karst hazard assessment

E. V. Drobina

*Perm State University, Perm 614990, Russia
E-mail: alenadrobina@yandex.ru*

The article is devoted to the applicability of hydrological analysis of a digital elevation model (DEM) in karst hazard assessment. DEM hydrological correction with the aim of karst forms interpretation and analysis of neotectonic activity of the territory was carried out in the karst territory within Dobryanskiy district of Perm Krai where carbonate-sulfate karst is developed and surface karst forms are widespread. Using three DEMs: data of Advanced Land Observation Satellite (ALOS-DEM), data of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and LiDAR-based digital terrain model, an instrumental extraction of drainless depressions was made. The spatial correlation of their location with sinkholes identified during the route survey was then analyzed. Given the geobotanical conditions of the study area, it was noted that the assessment of surface karst by the method of hydrological correction of the DEM at a detailed level is recommended to be carried out with the use of a highly accurate DEM — LiDAR-based digital terrain model, which excludes the influence of vegetation on the analysis result. As a result of the neotectonic activity analysis using DEM, positive (uplifts) and negative (depressions) neotectonic structures were identified. It was marked that karst sinkholes in the study territory prevail in the uplift areas, which confirms the research of karstologists: in karst areas karst forms associate with vaults or apical zones of ancient structures, zones and areas of increased, localized fracturing and water availability of rocks of neotectonic uplifts. According to the results of the analysis, presented graphically, it is possible to identify the ranges of absolute elevation increments of the base surfaces that are potentially karst dangerous and, thus, to zone areas of neotectonic uplifts according to karst danger.

Keywords: digital elevation model, surface karst, karst massif, karst hazard, hydrological correction, morphometric analysis

Accepted: 14.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-96-103

References

1. Drobina E. V., Optimisation of camera geotechnical surveying using GIS, *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii* (Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation), Proc. 16th All-Russia Scientific-Practical Conf. Surveying Organizations, Moscow: Geomarketing Ltd., 2021, pp. 93–99 (in Russian).
2. Drobina E. V., Zolotarev D. R., Analysis of engineering geological conditions and variability of fine-grained deposits near sinkholes in the carbonate-sulfate karst areas, *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2022, No. 2, pp. 48–62 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869780922020023.
3. Kataev V. N., *Osnovy strukturnogo karstovedeniya* (Fundamentals of structural karst science), Perm, 2004, 143 p. (in Russian).
4. Nugmanov I. I., Nugmanova E. V., Chernova I. Yu., *Osnovy morfometricheskogo metoda poiska neotektonicheskikh struktur* (Fundamentals of the morphometric method for searching for neotectonic structures), Kazan: Kazan University, 2016, 53 p. (in Russian).
5. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Geocological assessment of the probability of activation of karst processes based on digital relief modeling, *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata "Georisk – 2018"* (Analysis, forecast and management of natural risks taking into account global climate change "Georisk-2018"), Proc. X Intern. Scientific-Practical Conf., Vol. 2, N. G. Mavlyanova (ed.), Moscow, 2018, pp. 221–225 (in Russian).
6. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Belenovich T. Ya., Using the ASTER GDEM v.2 global digital elevation model to identify areas of possible activation of karst processes in the Arkhangelsk region, *Scientific Notes of Kazan University. Ser.: Natural Sciences*, 2021, Vol. 163, No. 2, pp. 302–319 (in Russian), DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
7. Filosofov V. P., *Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur* (A short guide to the morphometric method of searching for tectonic structures), Saratov: Saratov University Press, 1960, 94 p. (in Russian).
8. Filosofov V. P., Calculation methodology and geological and geomorphological interpretation of terrain dissection coefficient, *Problems of morphometry*, Saratov: Saratov University Press, 1967, Issue 1, Vol. 2, pp. 112–146 (in Russian).
9. Khabibullina F. S., Vishnevskii P. V., *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu karsta pri poiskakh i razvedke mestorozhdenii karbonatnykh porod* (Methodological recommendations for the study of karst in prospecting and exploration of carbonate deposits), VNIi geologii nerudnykh poleznykh iskopaemykh, Kazan, 1987, 97 p. (in Russian).
10. Colombo R., Vogt J. V., Soille P., Paracchini M. L., de Jager A., Deriving River networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data, *CATENA*, 2007, Vol. 70, Issue 3, pp. 296–305, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.001>.
11. de Carvalho Jr. O. A., Guimarães R. F., Montgomery D. R., Gillespie A. R., Gomes R. A. T., Martins É. d. S., Silva N. C., Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, Issue 1, pp. 330–351, DOI: 10.3390/rs6010330.
12. Fiorillo F., Pagnozzi M., Ventafridda G., A model to simulate recharge processes of karst massifs, *Hydrological Processes*, 2015, Vol. 29, Issue 10, pp. 2301–2314, <https://doi.org/10.1002/hyp.10353>.
13. Garas K. L., Madrigal M. F. B., Agot R. D. D., Canlas M. C. M., Manzano L. S. J., Karst depression detection using IFSAR-DEM: A tool for subsidence hazard assessment in Panglao, Bohol, *Carsologica Sinica*, 2020, Vol. 39, No. 6, pp. 928–936, DOI: 10.11932/karst20200612.
14. Goldscheider N., Delineation of spring protection zones. Ch. 8, *Groundwater Hydrology of Springs*, Kresic N., Stevanovic Z. (eds.), Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2010, pp. 305–338.
15. Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C., Tracer tests in karst hydrogeology and speleology, *Intern. J. Speleology*, 2008, Vol. 37(1), pp. 27–40, <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>.
16. Leone G., Catani V., Pagnozzi M., Ginolfi M., Testa G., Esposito L., Fiorillo F., Hydrological features of Matese Karst Massif, focused on endorheic areas, dolines and hydroelectric exploitation, *J. Maps*, 2022, pp. 1–13, DOI: 10.1080/17445647.2022.2144497.
17. Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I., On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, *Hydrological Processes*, 1991, Vol. 5, Issue 1, pp. 81–100, DOI: 10.1002/hyp.3360050107.