

Геоинформатика. 2023. № 4. С. 4–14.  
*Geoinformatika*. 2023;(4):4–14.

### Применение ГИС-технологий

Научная статья  
 УДК 551.435.83  
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-4-14>

## Автоматизация обработки цифровой модели рельефа при решении задач хозяйственного освоения закарстованных территорий

© 2023 г. — Марина Алексеевна Китаева <sup>а)</sup>, Елена Викторовна Дробинина <sup>б)</sup>

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ); Пермь, Россия  
<sup>а)</sup>kitaeva0822@yandex.ru, <sup>б)</sup>alenadrobinina@yandex.ru

**Аннотация:** Комплексирование применения геоинформационных систем (ГИС) и инструментов анализа данных дистанционного зонирования Земли (ДЗЗ) позволит в короткие сроки и с высокой точностью оценить пригодность той или иной территории для возведения площадных или линейных сооружений на участках развития опасных геологических процессов (ОГП). В данной статье на примере закарстованного участка в Кишерстском районе Пермского края проведено зонирование территории по степени карстовой опасности по геоморфологическим показателям посредством обработки цифровой модели рельефа (ЦМР) ALOS-DEM. С использованием ЦМР оценивались закономерности в распределении карстовых форм на изучаемой территории в зависимости от расчлененности рельефа, его уклона и удаленности от водотоков. На основании выявленных закономерностей строилась интегральная картографическая модель. Предлагаемый авторами подход позволяет по заданному входному набору данных зонировать территорию в отношении изучаемого ОГП в короткие сроки и с высокой точностью, которая обусловлена использованием в анализе закономерностей проявлений процесса.

**Ключевые слова:** карст, цифровая модель рельефа, геоинформационные системы, геообработка

*Для цитирования:* М.А. Китаева, Е.В. Дробинина. Автоматизация обработки цифровой модели рельефа при решении задач хозяйственного освоения закарстованных территорий // Геоинформатика. — 2023. — № 4. — С. 4–14. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-4-14>.

### Application of GIS-technologies

Original article

## Automation of digital elevation model analyzing when solving problems of economic development of karst territories

© 2023 — Marina A. Kitaeva <sup>а)</sup>, Elena V. Drobinina <sup>б)</sup>

Perm State National Research University; Perm, Russia  
<sup>а)</sup>kitaeva0822@yandex.ru, <sup>б)</sup>alenadrobinina@yandex.ru

**Abstract:** The combination of geographic information systems (GIS) and remote sensing data analysis tools will make it possible to assess in a short time and with high accuracy the suitability of an area for the construction of land or linear structures in the areas where dangerous geological processes are developed. In this article we use the example of karst area in Kisherstky district of Perm region as an example to carry out the karst hazard zoning of the territory according to geomorphological indicators by analyzing ALOS-DEM digital elevation model (DEM). Patterns in the distribution of karst forms in the study area were evaluated depending on the dissection of the relief, its slope and distance from the watercourses. Based on the patterns, an integral map was constructed. The approach allows to do zoning the territory with respect to the studied danger geological process in a short time and with high accuracy, which is due to the use of patterns of forms distribution in the analysis.

**Key words:** karst, digital elevation model, geographic information systems, geoprocessing

*For citation:* Kitaeva M.A., Drobinina E.V. Automation of digital elevation model analyzing when solving problems of economic development of karst territories. *Geoinformatika*. 2023;(4):4–14. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-4-14>. In Russ.

## Введение

Бурный рост строительства, необходимость освоения новых территорий или увеличение плотности и этажности застройки на существующих зачастую сопряжены с различными рисками, особенно в районах развития опасных геологических процессов (ОГП). На урбанизированных территориях вследствие высокой техногенной нагрузки высока вероятность активизации этих процессов, проявления которых влекут за собой большой экономический, экологический, а зачастую, и социальный ущерб [2]. Эффективность принимаемых управленческих решений на стадии планирования и в процессе эксплуатации сооружений зависит от результатов инженерно-геологических изысканий, поэтому осуществление последних требует комплексного подхода, который часто ограничен сроками их проведения.

Под комплексным подходом авторами понимается всестороннее изучение природных условий площадки изысканий, в том числе с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и данных, хранящихся в открытом доступе (например, векторные данные гидросети, застройки и дорожной сети и т.п.). Сейчас в руках инженера-геолога имеется инструментарий для точного и оперативного анализа данных, в том числе автоматизированного, с применением которого возможно в короткие сроки давать экспертные заключения в отношении развития ОГП на изучаемом участке.

На сегодняшний день данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в инженерно-геологических изысканиях на закарстованных территориях используются преимущественно только с целью визуального анализа и дешифрирования карстовых форм по снимкам в видимом диапазоне (RGB-изображения) [5]. Такая же практика отмечается и за рубежом: традиционно выделение карстовых форм выполняется в полевых маршрутных наблюдениях с использованием топографических карт или при визуальном дешифрировании аэрофотоснимков [14, 20, 21], данных радиолокационной съемки, или мультиспектральных космоснимков [18, 23].

Данная статья посвящена вопросу обработки цифровой модели рельефа в решении задач хозяйственного освоения закарстованных территорий с применением геоинформационных систем (ГИС) и специальных приложений, позволяющих автоматизировать процесс обработки посредством составления цепочки последовательных операций с возможностью ее сохранения в виде пользовательского инструмента, входные параметры которого можно редактировать в зависимости от поставленной задачи и участка изысканий (в пределах, допустимых моделью).

В качестве ГИС использовано программное обеспечение ArcGIS и его приложение для создания

моделей — Module Builder for ArcGIS, с помощью которого существенно упрощается процедура геобработки большого массива данных с использованием нескольких инструментов. Одним из преимуществ такой модели является возможность задания входных данных в качестве переменных, что делает модель гибкой и применимой к различным наборам однотипных данных.

## Краткая характеристика изучаемого карстового массива

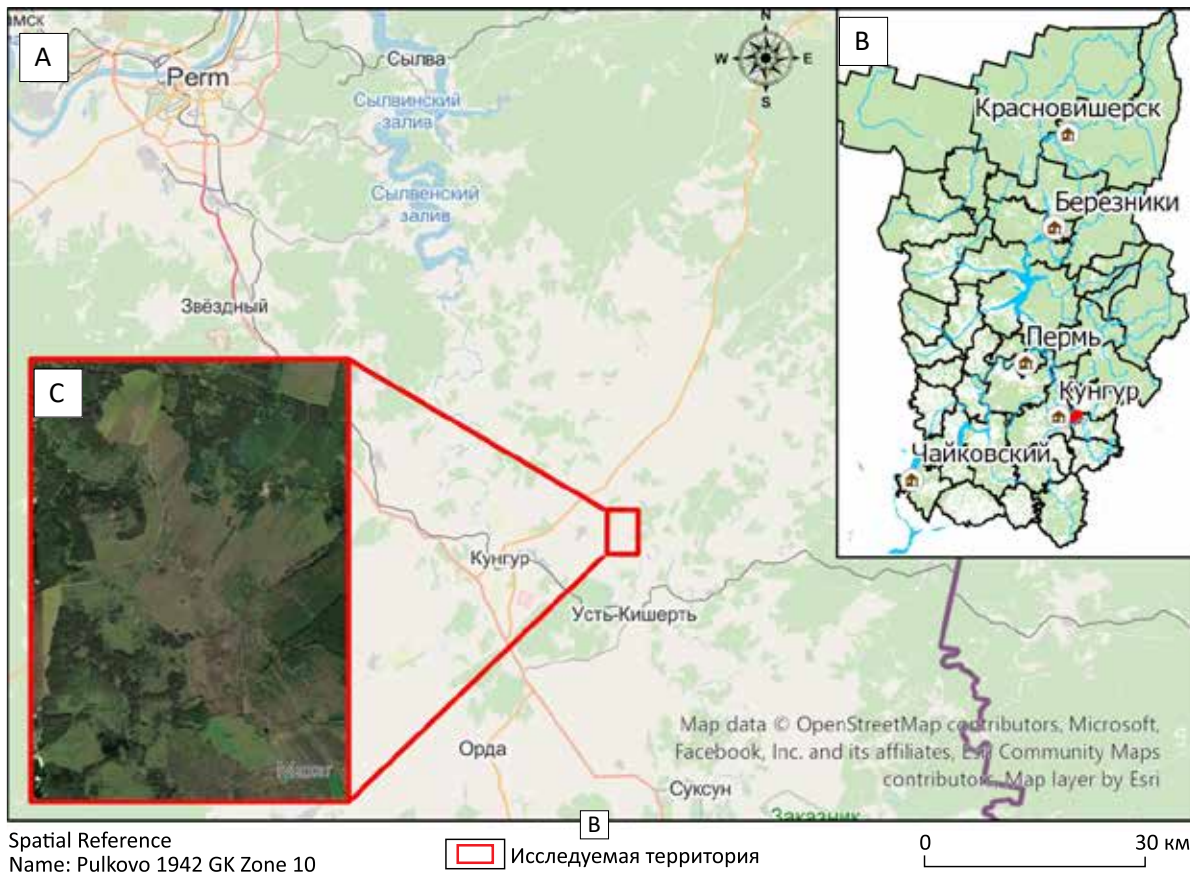
В качестве изучаемого выбран карстовый массив на территории северо-западного участка Кишертского муниципального округа Пермского края России, в окрестностях деревни Подпавлиново (рис. 1).

Исследуемая территория расположена на границе Восточно-Европейской равнины и Предуральского прогиба, в бассейне среднего течения р. Сылвы. Район приурочен к Юрезано-Сылвинской впадине Предуральского прогиба Уральско-Новоземельского складчатого пояса. Широкое развитие тектонических нарушений, отчетливо прослеживающихся на аэрофото-и космических снимках, свидетельствует о положении изучаемой территории в тектонически активной зоне.

В геологическом отношении территория сложена отложениями пермской и четвертичной систем. В пределах исследуемого участка распространены образования иренской и филиповской свит Кунгурского яруса Пермской системы. Среди образований иренской свиты встречаются чередующиеся карбонатные и сульфатные пачки: доломиты серые пелитоморфные, реже оолитовые и органогенно-детритовые с прослоями аргиллитов, мергелей, известняков с пластами ангидрита и гипса, мощностью 20–500 м. Филипповская свита сложена белыми и желтовато-серыми, слоистыми пелитоморфными и тонкозернистыми, органогенно-детритовыми, местами битуминозными доломитовыми известняками, доломитами. Мощность карбонатных пород в Кишертском районе достигает 70–80 м. Покрывается карстующиеся толща неоген-четвертичным карстово-обвальным комплексом отложений: известковистыми глинами, суглинками и супесями, гравийно-галечниковыми грунтами, с глыбами, щебнем и дресвой коренных пород, с редким гравием и галькой кремнистого состава. Отложения четвертичной системы на территории с. Усть-Кишерт имеют мощность до 65,0 м. Аллювиальные отложения представлены суглинками, глинами, супесями, песками и гравийно-галечниковыми грунтами, делювиально-элювиальные отложения — щебенистым грунтом с дресвой и глинистым заполнителем 30%: щебень и дресва песчаника, реже известняка, иногда с редкими глыбами тех же пород, заполнитель — суглинок, местами глина, реже супесь.

Рис. 1. Схема района работ

Fig. 1. Location plan of the study area



A — на локальном уровне; B — на региональном уровне; C — космоснимок изучаемой территории в видимом диапазоне.  
 A — at local level; B — at regional level; C — satellite image in visible range.

Закарстованность района выражена в своеобразном рельефе территории: повышенная плотность воронок, наблюдаются провалы, встречаются озерные котловины карстового генезиса, карстовые депрессии. Наиболее часто встречаемые формы — воронки, число которых в пределах изучаемой территории достигает 165 штук. Карстовые воронки имеют в среднем диаметр 25–30 м, задернованы, в бортах часто произрастает кустарниковая растительность.

#### Принципиальный подход к обработке цифровой модели рельефа и опыт ее анализа в карстологических целях

Интерес к анализу цифровой модели рельефа вызван тем, что последний оказывает непосредственное влияние на инфильтрацию агрессивных пород поверхностных вод в карстовый массив. Направление поверхностного стока и его интенсивность часто контролируются расчлененностью рельефа, его уклоном, густотой речной и овражно-балочной сети, что в свою очередь определяется приуроченностью к конкретному ге-

оморфологическому элементу: пойме, склону, водораздельному пространству, каждому из которых присущи свои особенности строения.

Так, в отношении проявлений карстового процесса отмечается, что морфология и плотность поверхностных карстовых форм определяются наряду с геологическими факторами: степенью трещиноватости пород, составом и мощностью покровных образований — также рельефом. В.Н. Катаевым и И.Г. Ермолович сделаны выводы, что наибольшая плотность карстовых форм отмечается на склонах долин Чусовой и Камы, на присклоновых участках водоразделов, в логах, где уменьшается мощность покровных отложений. Примечательным является факт пространственного сочетания практических всех встреченных поверхностных карстовых форм с трещинами бортового отпора, причем подобное сочетание характерно для многих карстовых районов [8].

Изучая закарстованность бассейна р. Ирени (юго-восток Пермского края), Е.А. Ерофеевым и В.Н. Катаевым сделаны выводы, что участки мак-

симальной концентрации поверхностных карстовых форм расположены, главным образом, в области дренирующего влияния речной сети, а участки с минимальной закарстованностью приурочены к наиболее приподнятым частям водораздельных пространств и к пойме долины р. Ирени [6, 7].

Изучая карстовые явления в Пермском крае, еще К.Г. Бутырина в 1968 г. отмечала, что наибольшая плотность карстовых форм характерная для склонов и присклоновых участков водоразделов, логов, где уменьшается мощность покровных отложений, к склонам приурочена большая часть крупных конусообразных и чашеобразных воронок. У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону размеры и количество воронок уменьшается. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом, за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отмечается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, плотность карстовых форм понижается и изменяется их форма. В условиях равнинного рельефа вынос глинистого материала происходит в замкнутые карстовые понижения, поэтому в подножиях склонов 85,6% карстовых форм приходится на карстовые блюдца, озера и болота [1].

Использование открытых цифровых моделей рельефа и их анализа для оценки карстовой опасности освещается в работах Е.В. Поляковой и др. Авторами предложено использовать методы гидрологической коррекции ЦМР для обнаружения карстовых понижений и воронок. Проведена гидрологическая коррекция цифровой модели рельефа Архангельской области (на основе данных ASTER GDEM v.2), получен векторный слой бессточных впадин, рассчитана их плотность на единицу площади [12, 13].

Е.В. Поляковой и соавторами отмечается также, что в зарубежных исследованиях более двух десятилетий проводятся работы по выявлению впадин в цифровых моделях рельефа, по разработке методик их автоматического устранения, а также по разделению впадин на ошибочные и те, которые представляют собой естественные элементы в рельефе. Однако исследования по дешифрированию карстовых форм посредством выделения бессточных впадин при гидрологической коррекции ASTER-GDEM (30 m), ALOS/PRISM-DEM (5 m) и SRTM-DEM (90 m) практически отсутствуют либо проводятся для открытых поверхностей, где карстовые воронки, выраженные в рельефе, задернованы, кустарниковой растительности на бортах и склонах нет [16]. В отечественных работах бессточные впадины, полу-

ченные в результате гидрологической коррекции, относятся к ошибкам в ЦМР [13].

Полуавтоматизированное обнаружение карстовых воронок с применением ГИС и ЦМР имеет ряд преимуществ, таких как быстрое дешифрирование карстовых форм на большой площади, уменьшение ошибок, связанных с человеческим фактором и неизбежно возникающих при ручном дешифрировании, и практический сбор данных в труднодоступных местах, таких как леса, глубокие ущелья и т.д. Однако этот подход нуждается в проверке в полевых условиях, в сочетании с геоморфологическим и морфометрическим анализом карстовых воронок. Некоторые из выделенных полуавтоматизированным способом воронок на самом деле могут являться техногенными образованиями. Для устранения подобных ошибок необходима тщательная интерпретация с использованием, например, морфометрических пороговых критериев и подтвержденных полевых измерений, что позволит уменьшить количество ложных выделений и других ошибок в обнаружении карстовых форм [17].

Дополнительным примером использования ЦМР в карстологическом прогнозе служит реализованный ранее автором анализ неотектонической активности различных карстовых массивов посредством построения базисных морфометрических поверхностей [3, 4] с последующим получением наиболее опасных в карстовом отношении интервалов значений приращений абсолютных отметок базисных поверхностей разного порядка.

#### **Методический аспект проблемы и результаты**

Применение геоинформационных систем (ГИС) с целью автоматизации и оптимизации пространственного анализа данных, в том числе полученных в результате ДЗЗ, значительно упрощает и сокращает сроки проведения аналитических процедур и повышает их качество и, соответственно, результат. Так, методика построения базисных поверхностей уже была автоматизирована с применением Model Builder for ArcGIS в 2011 г. Д.М. Курловичем и успешно апробирована на территории физико-географической провинции Белорусское Поозерье. Результаты исследований использованы с целью выбора оптимальных по инженерно-геоморфологическим характеристикам площадок для проектирования и строительства ответственных инженерных сооружений [10].

Подход к анализу природных условий закарстованных массивов детально освещен в работе Т.Г. Ковалевой, где при исследовании геолого-гидрологических показателей, контролирующих протекание и интенсивность развития карста, намечены наиболее карстоопасные интервалы. Комплексный учет подобной оценки с применением ГИС позволил автору выделить на изучаемой тер-

ритории участки, характеризующиеся определенной категорией карстоопасности [9].

В данной работе освещаются вопросы зонирования территории по степени карстовой опасности на основании установленной связи между поверхностной закарстованностью и набором геоморфологических показателей посредством автоматизированного анализа цифровой модели рельефа. К преимуществам использования цифровой модели рельефа (ЦМР) относится ее легкая доступность: низкая стоимость или бесплатный доступ, высокая однородность и плотность данных, широкий охват территории [13].

Изначально полагалось использование цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной по результатам радиолокационной топографической миссии шаттла (набор SRTMGL1Nv003). Разрешение набора равно примерно 30 метрам. Это разрешение выше, чем у других наборов в открытом доступе таких, как SRTM v4.1, MERIT, и TanDEM-X [20]. Согласно Прити и др. [22] SRTM с коррекцией — наиболее качественный вариант ЦМР.

Набор данных SRTMGL1Nv003 был выпущен в январе 2015 года Центром распределенного активного архива наземных процессов НАСА (NASA's LPDAAC). Пустоты в данных SRTMGL1Nv003 были заполнены данными глобальных цифровых моделей рельефа ASTER (GDEM) версии 2.0 и GMTED2010 [19, 22].

Однако в процессе работ набор входных данных был скорректирован и в качестве ЦМР для анализа использовались данные усовершенствованного спутника наблюдения за сушей (Advanced Land Observation Satellite — ALOS-DEM), версии 3.2, выпущенные в январе 2021 года, с горизонтальным разрешением приблизительно 30 метров. Если рассматривать ЦМР как набор входных данных в автоматизированный алгоритм анализа, то ее выбор значения не имеет, однако если говорить о точности зонирования по карстовой опасности, то чем детальнее ЦМР и чем выше ее разрешение, тем точнее будут результаты зонирования.

С использованием ЦМР оценивались расчлененность рельефа: вертикальная и горизонтальная, уклон рельефа, удаленность от водотоков. Пространственный анализ поверхности рельефа проводился с применением ГИС (ArcGIS). На начальном этапе анализа модель рельефа, содержащая небольшие ошибки и неточности, выраженные в виде локальных понижений, корректировалась посредством заполнения последних с указанием порогового значения — до 1 м. Небольшая величина порогового значения принята с учетом распределения карстовых воронок Кишертского района по глубине: около 40% развитых в районе воронок характеризуются глубиной около 1 м, 45% — 1–5 м, остальные до 15 м, единичные формы характеризуются глубиной больше 20 м.

Для получения уклона рельефа местности использовался инструмент Slope набора Spatial Analyst/Surface. Данный инструмент вычисляет максимальную степень изменения значения альтитуды между конкретной ячейкой ЦМР и соседними с ней ячейками. Инструмент подбирает плоскость 3×3 ячейки вокруг центральной — обрабатываемой ячейки — и считает уклон с использованием методики усредненного максимума [15].

Принципиально уклон как фактор карстового процесса оказывает влияние на последний следующим образом: наиболее благоприятными для активизации процесса являются территории с незначительным и малым уклоном местности, где происходит относительно интенсивная инфильтрация и возможен дренаж подземных вод в горизонтальном направлении вниз по уклону рельефа. В таких условия наиболее вероятно попадание пресных атмосферных осадков в трещинно-карстовый горизонт подземных вод и увеличение, тем самым, их агрессивности по отношению к растворимым породам. По мере дальнейшего роста уклона поверхностный сток будет превалировать над инфильтрацией, интенсифицируя эрозионный процесс.

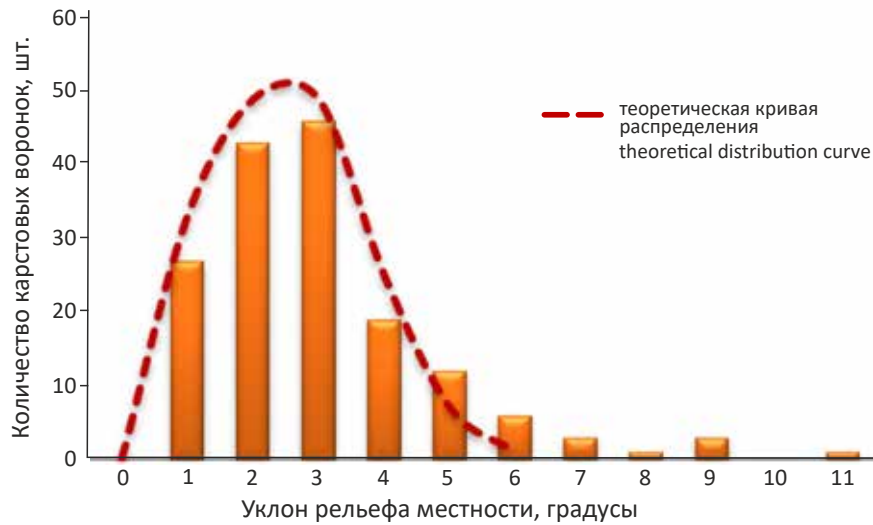
На изучаемой территории большая часть поверхностных карстовых форм тяготеет к участкам, где значения уклона составляют 1–3 градуса (рис. 2). Гистограммы распределения поверхностных карстовых форм в зависимости от изучаемых факторов строятся по набору данных, полученных путем извлечения значений в точки — местоположения карстовых воронок — с растровых моделей частных геоморфологических показателей.

Вертикальная расчлененность рельефа — разница абсолютных отметок рельефа. Для оценки данного параметра изучаемая территория была разбита на ОТЕ — операционные территориальные единицы по сетке 250×250 м. В пределах ОТЕ посчитаны разности альтитуд. Горизонтальная расчлененность рельефа определена как суммарная длина русел водотоков и тальвегов овражно-балочной сети на единицу площади ОТЕ.

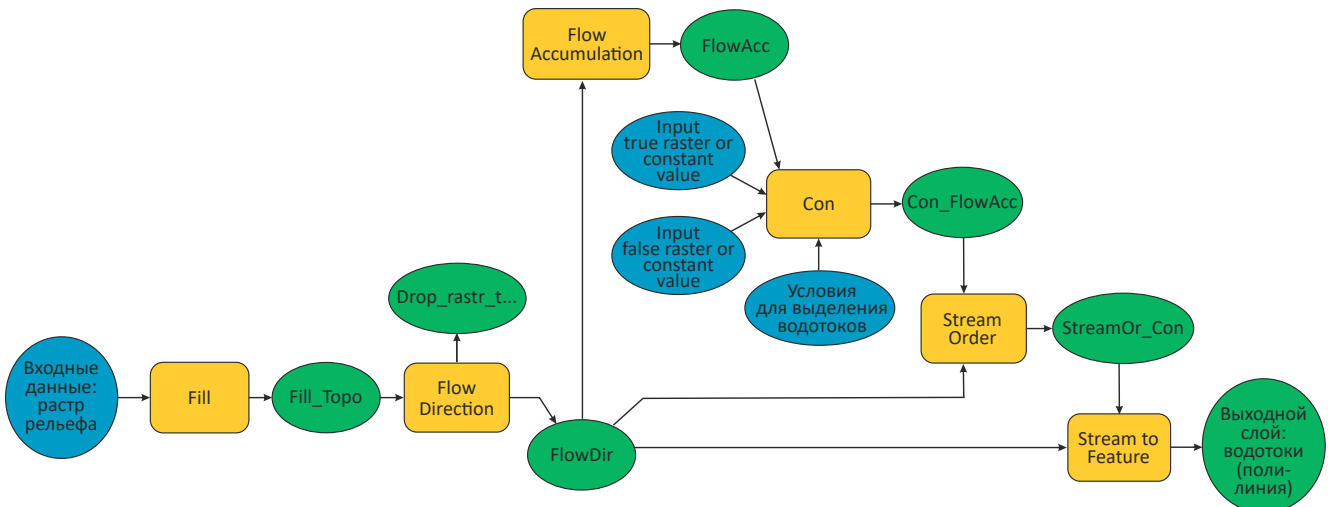
Влияние расчлененности рельефа на интенсивность карстового процесса выражается следующим: чем выше вертикальная расчлененность рельефа и густота дренирующей сети (горизонтальная расчлененность), тем большая толща пород может быть вовлечена в процесс активной циркуляции карстовых вод с последующей интенсификацией процесса растворения [7, 11].

Овражно-балочная сеть, или сеть русел водотоков разных порядков, также построена с использованием ЦМР. С целью оптимизации оценки расчлененности рельефа в Module Builder for ArcGIS собраны пользовательские инструменты, которые выстраивают сеть водотоков различных порядков в пределах заданной площади, а затем считают горизонтальную и вертикальную расчлененность

**Рис. 2.** Гистограмма распределения поверхностных карстовых воронок в зависимости от уклона рельефа местности  
*Fig. 2. Surface karst forms distribution histogram as a function of terrain slope*



**Рис. 3.** Модель построения водотоков разных порядков  
*Fig. 3. Construction of watercourses model*



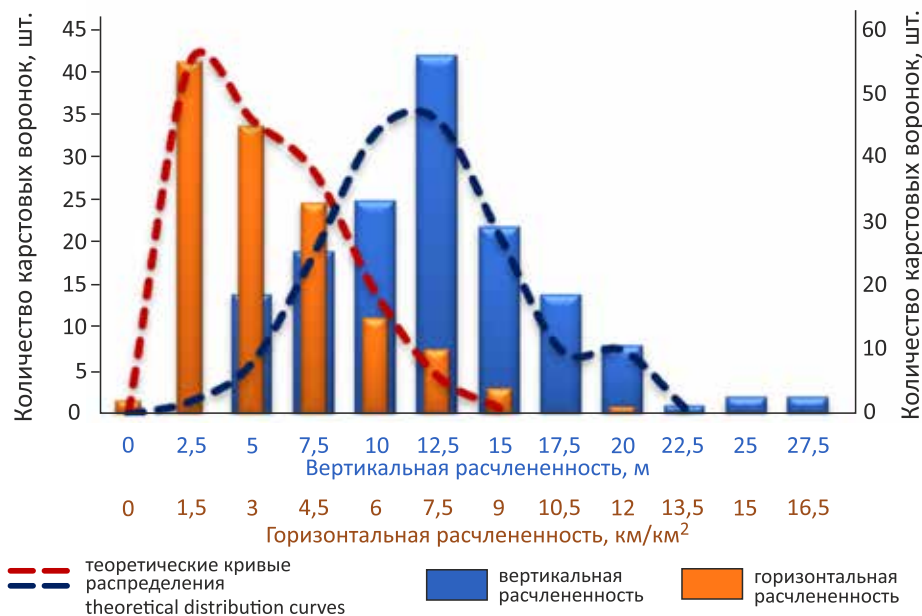
рельефа и извлекают значения в центроиды сетки намеченного пользователем размера (250×250 м — в данном случае, рис. 3). По центроидам ячеек такой сети методом интерполяции строятся растровые модели.

Относительно горизонтальной расчлененности рельефа наблюдается нормальная закономерность в распределении карстовых воронок с ярко выраженной асимметрией в сторону меньших значений: большая часть зафиксирована на территории со значениями параметра 1,0–4,5 км/км<sup>2</sup>, включительно. Относительно вертикальной расчлененности рельефа наблюдается нормальная законо-

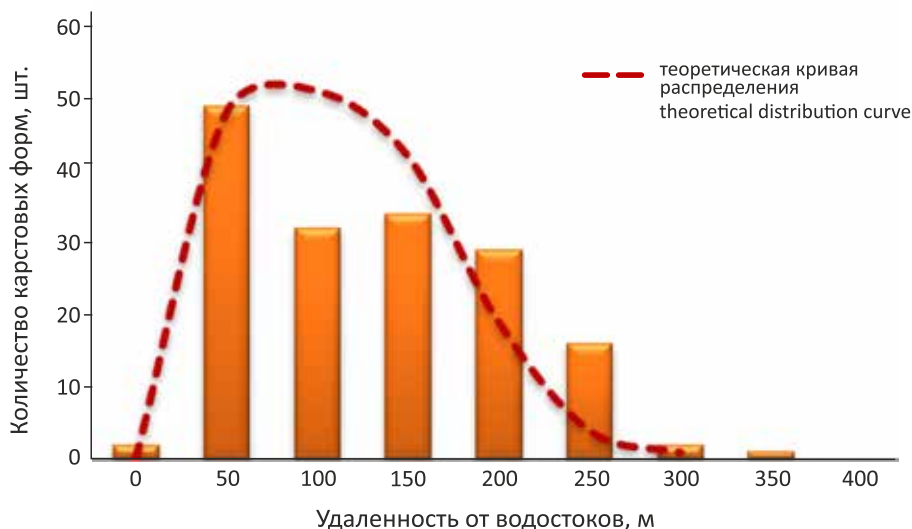
мерность в распределении карстовых воронок: большая их часть зафиксирована на территории со значениями параметра 7–15 м (рис. 4).

Удаленность от водотоков посчитана с применением инструмента Euclidean Distance. Выходные данные инструмента — растровая поверхность, каждая ячейка которой содержит числовой параметр, характеризующий расстояния от нее до водотока в метрах. Большая часть воронок приурочена к территориям, удаленным от водотоков на расстояния 50–250 м (склоновые части долин водотоков, что подтверждает исследования пермских ученых [1, 6, 7, 8]). Характер распределения нормальный с

**Рис. 4.** Гистограммы распределения поверхностных карстовых форм в зависимости от расчлененности рельефа местности  
*Fig. 4. Surface karst forms distribution histogram as a function of topography dissection*



**Рис. 5.** Гистограмма распределения поверхностных карстовых форм в зависимости от удаленности от водотоков  
*Fig. 5. Surface karst forms distribution histogram as a function of distance from watercourses*



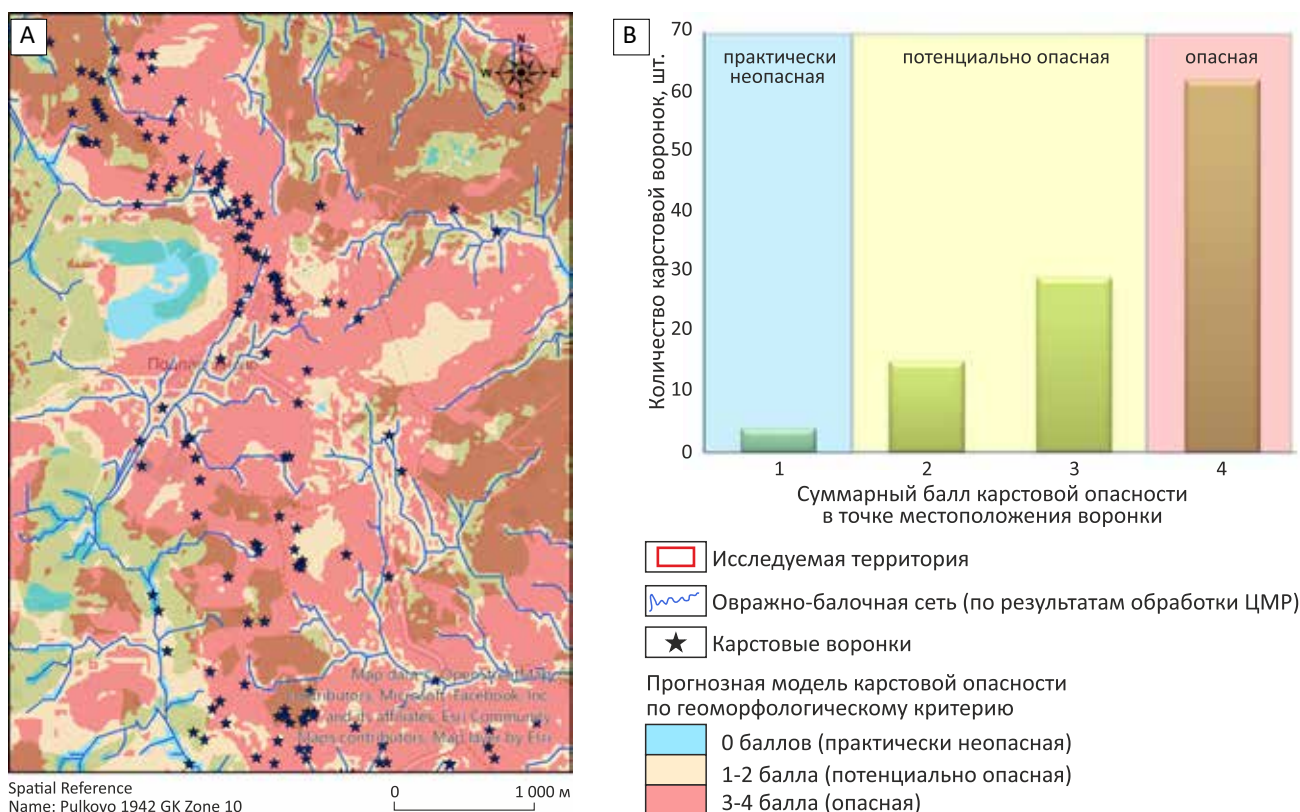
выраженной асимметрией в сторону меньших значений (рис. 5).

С использованием данных закономерностей в распределении карстовых форм получена интегральная картографическая модель зонирования территории по степени карстовой опасности территории по геоморфологическому критерию. Модель построена посредством суммирования растровых моделей частных показателей. Предварительно частные модели, описывающие геоморфологические показатели, методом переклассифи-

кации превращены в балльные: 1 балл присвоен «опасным» в отношении карста интервалам значений — таким, в пределах которых преимущественно развиты поверхностные карстовые формы согласно гистограммам распределения, 0 баллов — остальным. Результирующий растр представляет собой картографическую модель со значениями от 0 до 4 баллов, описывающую карстовую опасность территории по геоморфологическому критерию. Предлагается ранжировать степень карстовой опасности следующим образом: 0 баллов — практически

**Рис. 6.** Зонирование территории по карстовой опасности на основании анализа ЦМР

*Fig. 6. Karst hazard zoning of the area based on DEM analysis*



**А** – картографическая модель; **Б** – гистограмма распределения поверхностных форм по категориям карстовой опасности  
*A – cartographic model; B – histogram of surface form distribution according to karst hazard categories*

неопасная в отношении карста; 1-2 балла – потенциально опасная; 3-4 – опасная (рис. 6).

**Выводы**

Таким образом, применение анализа данных дистанционного зондирования Земли в инженерных изысканиях даст возможность оперативно и с высокой точностью проводить зонирование территории в отношении опасных геологических процессов (в частности, карстового) с целью принятия проектных решений как на стадии планирования и благоустройства территории, так и в процессе эксплуатации сооружения.

Современные технические возможности позволяют проводить автоматизацию рабочего аналитического процесса, и, следовательно, получать оценочные сведения в короткие сроки с минимумом ошибок, связанных с человеческим фактором, неизбежно возникающем, когда существует необходимость воспроизведения ряда последовательных процедур.

Преимуществом предлагаемой методики является возможность экстенсивного расширения набора входных параметров при должном обосновании влияния каждого из добавляемых факторов на изучаемый процесс.

**Список источников**

1. *Бутырина К.Г.* Гипсовый карст центральной части Пермской области: дисс. ... канд. географ. наук. – Пермь : ПГУ, 1968. – 380 с.
2. *Геологический риск урбанизированных территорий / под. ред. акад. В.И. Осипова.* – М. : РУДН, 2020. – 316 с.
3. *Дробинина Е.В.* Использование инструментов гидрологического анализа в карстологическом прогнозе // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 14–18 ноября 2022 года). – М. : ИКИ РАН, 2022. – С. 267. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
4. *Дробинина Е.В.* Оптимизация камеральной обработки материалов инженерно-геологических изысканий с использованием ГИС // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы XVI Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций (Москва, 1–3 декабря 2021 г.). – М. : Геомаркетинг, 2021. – С. 93–99.

5. *Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.* Идентификация поверхностных форм карста по материалам спутниковых изображений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2017. – № 17. – С. 193–197.
6. *Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.* Анализ поверхностной закарстованности бассейна р. Ирень дистанционными методами // Гидрогеология и карстование : межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 20. – Пермь : ПГНИУ, 2020. – С. 166–176.
7. *Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.* Геологические закономерности развития карста на примере Нижнеиренско-Ординского опорного участка (Пермский край) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2020. – Т. 6. – № 3. – С. 301–320.
8. *Катаев В.Н., Ермолович И.Г.* Трещины бортового отпора и закарстованность в пределах Камско-Чусовского междуречья // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2021. – № 4 (41). – С. 223–232.
9. *Ковалёва Т.Г.* Оценка карстоопасности территории г. Кунгура на основе общегеологического подхода // Вестник Пермского университета. Геология. – 2016. – № 4 (33). – С. 18–25. DOI: 10.17072/psu.geol.33.26.
10. *Курлович Д.М.* Использование Model Builder при разработке набора инструментов «Структурно-геоморфологический ГИС-анализ» для ArcToolbox ГИС ArcGIS 9.3 // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии: Материалы международного научного конгресса (Минск, 31 октября – 3 ноября 2011 г.). – Ч. 2. – Минск: БГУ, 2011. – С. 193–198.
11. *Назаров Н.Н.* Карст Прикамья. Физико-географические аспекты. – Пермь : ПГНИУ, 1996. – 93 с.
12. *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 учетом глобального изменения климата «Геориск – 2018» : материалы X Международной научно-практической конференции (Москва, 23–24 октября 2018 г.) / отв. ред. Н.Г. Мавлянова. – Т. 2. – М. : РУДН, 2018. – С. 221–225.
13. *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 университета. Серия: Естественные науки. – 2021. – Т. 163. – № 2. – С. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
14. *Alexander S.C., Rahimi M., Larson E., Bomberger C., Greenwaldt B., Alexander E.C.* Combining LiDAR, aerial photography and pictometric tools for karst features database management [Электронный ресурс] // NCKRI Symposium 2. Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (KIP Talks and Conferences, 36). – 2013. – pp. 441–448. Режим доступа: [https://digitalcommons.usf.edu/kip\\_talks/36](https://digitalcommons.usf.edu/kip_talks/36) (дата обращения: 20.11.2023).
15. *Burrough P.A., McDonnell R.A.* Principles of geographical information system. – Oxford – New York: Oxford University Press, 1998. – 333 p.
16. *Carvalho Júnior O.A de., Guimaraes 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. – Iss. 1. – pp. 330–351. DOI: 10.3390/rs6010330.
17. *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.
18. *Hofierka J., Gallay M., Bandura P., Šašak J.* Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis // Geomorphology. – 2018. – Vol. 308. – pp. 265–277. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
19. *Kobrick M., Crippen R.* SRTMGL1 v003. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Электронный ресурс]. – 2000. – Режим доступа: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/> (дата обращения: 21.11.2023).
20. *Panno S.V., Luman D.E.* Mapping palimpsest karst features on the Illinois sinkhole plain using historical aerial photography // Carbonates and Evaporites. – 2013. – Vol. 28. – pp. 201–214. DOI: 10.1007/s13146-012-0107-4.
21. *Panno S.V., Weibel C.P., Li W.* Karst regions of Illinois (Open File Series 1997-2). – Champaign: Illinois State Geological Survey, 1997. – 90 p.
22. *Preeety K., Prasad A.K., Varma A.K., El-Askary H.* Accuracy assessment, comparative performance, and enhancement of public domain digital elevation models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) using DGPS // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – Iss. 6. – 1334. DOI: 10.3390/rs14061334.
23. *Siart C., Bubbenzer O., Eitel B.* Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete // Geomorphology. – 2009. – Vol. 112. – № 1-2. – pp. 106–121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.05.010.

## References

1. *Butyrina K.G.* Gipsovyi karst tsentral'noi chasti Permskoi oblasti [Gypsum karst in the central part of Perm region]: dissertation for the degree of candidate of geographical sciences. Perm: PGU; 1968. 380 p.
2. *Osipov V.I.* (ed.) Geologicheskii risk urbanizirovannykh territorii [Geological risk of urbanized territories]. Moscow: RUDN; 2020. 316 p.
3. *Drobinina E.V.* Ispol'zovanie instrumentov gidrologicheskogo analiza v karstologicheskoi prognoze [Using tools of hydrological analysis in karst hazard assessment]. In: Materialy 20 Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» (Moscow, 14–18 November 2022). Moscow: IKI RAN, 2022. p. 267. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
4. *Drobinina E.V.* Optimization of office studies of the engineering surveys results using GIS. In: Prospects for development of engineering survey in Russian Federation: materials of the XVI All-Russian conference of prospecting organizations (Moscow, 1–3 December 2021). Moscow: Geomarketing; 2021. pp.93–99.
5. *Erofeev E.A., Kataev V.N.* Identification of the surface karst forms on materials of satellite images. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2017;(17):193–197.
6. *Erofeev E.A., Kataev V.N.* Results of analysis of the surface of the basin r. Iren' by remote methods. In: Hydrogeology and Karstology: Proceeding Interuniversity Collection. Vol. 20. Perm': PGNIU; 2020. pp. 166–176.
7. *Erofeev E.A., Kataev V.N.* Geological regulations of karst development on the example of the Nizhniirensky-Ordinsky support area (Perm territory). *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2020;6(3):301–320.

8. Kataev V.N., Ermolovich I.G. Cracks in the side rebound and karst formation within the Kamsko-Chusovsky interfluve. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2021;41:223–232.
9. Kovaleva T.G. Karst hazards assessment based on the general geological approach at the territory of city of Kungur. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2016;33:26–35. DOI: 10.17072/psu.geol.33.26.
10. Kurlovich D.M. Ispol'zovanie Model Builder pri razrabotke nabora instrumentov «Strukturno-geomorfologicheskii GIS-analiz» dlya ArcToolbox GIS ArcGIS 9.3 [Using Model Builder to develop a set of tools "Structural-geomorphological GIS analysis" for ArcToolbox GIS ArcGIS 9.3]. In: International congress on computer science: information systems and technologies: proceedings of International Scientific Congress (Minsk, 31 October – 3 November 2011). Pt. 2. Minsk: BGU; 2011. P. 193–198.
11. Nazarov N.N. Karst of Prikamye. Physical-geographical (geomorphological) aspects. Perm': PGNIU; 1996. 93 p.
12. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Geoehologicheskaya otsenka veroyatnosti aktivizatsii karstovykh protsessov na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'efa [Geoecological assessment of the probability of activation of karst processes based on digital relief modeling]. In: Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchedom global'nogo izmeneniya klimata «Georisk – 2018»: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moscow, 23–24 October 2018). Mavlyanova N.G. (ed.). Vol. 2. Moscow: RUDN; 2018. pp. 221–225.
13. Polyakova E.V., Kutinov Y.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 (Russia). *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennyye nauki*. 2021;163(2): 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
14. Alexander S.C., Rahimi M., Larson E., Bomberger, C., Greenwaldt B., Alexander E.C. Combining LiDAR, aerial photography and pictometric tools for karst features database management. In: NCKRI Symposium 2. Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (KIP Talks and Conferences, 36). 2013. pp. 441–448. Available at: [https://digitalcommons.usf.edu/kip\\_talks/36](https://digitalcommons.usf.edu/kip_talks/36) (accessed 20.11.2023).
15. Burrough P.A., McDonnell R.A. Principles of geographical information system. Oxford – New York: Oxford University Press; 1998. 333 p.
16. Carvalho Júnior O.A. de., 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;6(1):330–351. DOI: 10.3390/rs6010330.
17. 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;39(6):928–936. DOI: 10.11932/karst20200612.
18. Hofierka J., Galloway M., Bandura P., Šašák J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*. 2018;308:265–277. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
19. Kobrick M., Crippen R. SRTMGL1 v003. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. 2000. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/> (accessed 08.04.2022).
20. Panno S.V., Luman D.E. Mapping palimpsest karst features on the Illinois sinkhole plain using historical aerial photography. *Carbonates and Evaporites*. 2013;28:201–214. DOI: 10.1007/s13146-012-0107-4.
21. Panno S.V., Weibel C.P., Li W. Karst regions of Illinois (Open File Series 1997-2). Champaign: Illinois State Geological Survey; 1997. 90 p.
22. Preetly K., Prasad A.K., Varma A.K., El-Askary H. Accuracy assessment, comparative performance, and enhancement of public domain digital elevation models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) using DGPS. *Remote Sensing*. 2022;14(6):1334. DOI: 10.3390/rs14061334.
23. Siart C., Bubenzer O., Eitel B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*. 2009;112(1-2):106–121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.05.010.

Статья поступила в редакцию 22.06.2023, одобрена после рецензирования 27.09.2023, принята к публикации 10.12.2023.  
 The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 27.09.2023; accepted for publication 10.12.2023.

### Информация об авторах

#### **Китаева Марина Алексеевна**

Студент

Пермский государственный национальный  
исследовательский университет

614068 Пермь, ул. Букирева, д. 15

Инженер-геолог

ООО «Противокарстовая и береговая защита»  
Пермский филиал

614068 Пермь, ул. Сергея Данщина, д. 4, офис 443

e-mail: kitaeva0822@yandex.ru

ORCID 0009-0001-5405-0578

#### **Дробинина Елена Викторовна**

Кандидат геолого-минералогических наук

Научный сотрудник, доцент

Пермский государственный национальный  
исследовательский университет

614068 Пермь, ул. Букирева, д. 15

e-mail: alenadrobina@yandex.ru

ORCID 0000-0002-6756-7947

Web of Science ResearcherID GQY-6222-2022

SPIN-код 4500-3517

Scopus AuthorID 56416422000

AuthorID 879933

### Information about authors

#### **Marina A. Kitaeva**

Student

Perm State National Research University  
15, Bukireva Str., Perm, 614068, Russia

Geological Engineer

LLC «Karst-Control and Bank Protection» (Perm' Branch)  
4, Sergey Danschin Str., Perm, 614068, Russia

e-mail: kitaeva0822@yandex.ru

ORCID 0009-0001-5405-0578

#### **Elena V. Drobina**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
Researcher, Associate Professor

Perm State National Research University  
15, Bukireva Str., Perm, 614068, Russia

e-mail: alenadrobina@yandex.ru

ORCID 0000-0002-6756-7947

Web of Science ResearcherID GQY-6222-2022

SPIN-код: 4500-3517

Scopus AuthorID 56416422000

AuthorID 879933