

Дистанционные признаки карстового процесса на открытых территориях

Е. В. Дробинина, М. А. Китаева, А. А. Ежова

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: alenadrobina@yandex.ru*

Статья посвящена рассмотрению вопроса комплексного подхода к выявлению дистанционных признаков сульфатного и карбонатно-сульфатного карста на открытых территориях с использованием данных космической съёмки. На примере ключевых карстовых участков в Нижегородской области, Республике Башкортостан и Пермском крае систематизирован комплекс диагностических индикаторов: в работе не только рассматриваются прямые морфологические формы рельефа (карстовые воронки, котловины, слепые долины), отчётливо идентифицируемые при визуальном дешифрировании, но и анализируются косвенные геоботанические аномалии, выявляемые методами спектрального анализа. Особое методическое значение имеет апробация алгоритма автоматического картирования карстовых форм по результатам спектрального анализа, что повышает объективность и эффективность карстологического мониторинга. Сделан вывод о высокой надёжности и перспективности комплексного использования данных ДЗЗ, совмещающего визуальное и автоматизированное спектральное дешифрирование, для оценки карстоопасности территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектральный анализ, карст, геоинформационные системы

Одобрена к печати: 24.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-129-140

Введение

Характерная особенность карстового процесса, позволяющая проводить его дистанционное изучение, — формирование специфического рельефа. Этот рельеф является прямым морфологическим выражением процесса подземного выщелачивания, ведущего к образованию карстовых полостей и обрушению вышележащих пород, что создаёт серьёзные риски эксплуатации инженерных сооружений.

Выявление и мониторинг карстовой опасности традиционными методами (полевые исследования, бурение) требуют значительных временных и финансовых затрат, а зачастую затруднены из-за труднодоступности или большой площади исследований. В этом контексте методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выступают высокоэффективным инструментом для решения задач инженерного карстоведения. Снимки среднего и высокого пространственного разрешения, а также данные гиперспектральной, радиолокационной съёмки и продукты обработки космической съёмки (радарной, оптической) позволяют проводить детальный анализ обширных территорий и выявлять дистанционные признаки (индикаторы) карстового процесса (Полякова и др., 2025; Романова и др., 2025; Ferentinou et al., 2020; Khoshlahjeh Azar et al., 2021; Kim et al., 2016; Orhan et al., 2021; Theilen-Willige, 2024). К ним относятся специфические черты рельефа (замкнутые понижения, блюдца, воронки), особенности гидрографической сети (исчезающие реки, суходолы), вариации в состоянии растительности (аномалии фитомассы, ксерофитные сообщества) и спектральные аномалии почвенного и растительного покрова (Дробинина, 2022). Интеграция геоинформационных систем (ГИС) и данных ДЗЗ предоставляет оперативный доступ к достоверной информации, что в сочетании с её квалифицированной интерпретацией способствует повышению точности прогнозных моделей развития опасных геологических процессов (Дробинина и др., 2025).

Цель настоящей статьи — систематизация и анализ комплекса дистанционных признаков развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста по данным космической съёмки

с выделением специфики его проявлений на открытых территориях и рассмотрением возможности автоматического картографирования карстовых форм.

В целом для сульфатного и карбонатно-сульфатного карста, развивающегося с высокой скоростью, характерны следующие основные диагностические формы рельефа:

- карстовые воронки — отрицательные формы рельефа от нескольких метров до десятков метров в диаметре, имеющие в плане округлую, овальную или неправильную форму. Их пространственное расположение часто не является хаотичным, а вытянуто вдоль зон повышенной трещиноватости пород, что хорошо прослеживается на снимках при использовании линеamentного анализа;
- карстовые котловины — обширные замкнутые понижения сложной формы, часто представляющие собой результат слияния множества отдельных воронок;
- слепые долины и поноры — элементы гидрографической сети, где водотоки внезапно прерываются и «теряются» в подземных полостях, что является ярким индикатором активного карстообразования. Поноры могут также соединять днища карстовых воронок с элементами подземного карста, играя роль дрен поверхностных вод в карстовый массив.

Таким образом, дешифрирование проявлений карстового процесса по материалам дистанционного зондирования базируется на комплексном анализе местности: как на прямом выявлении в рельефе специфических форм карста, так и на интерпретации косвенных признаков, выраженных в аномалиях растительного покрова на закарстованной территории.

Исследуемая территория

В качестве рассматриваемых открытых территорий выбраны: северо-восток города Дзержинска (Нижегородской области), окрестности города Уфы (Республика Башкортостан) и Нижнесыльвинский район сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (город Кунгур, Пермский край (рис. 1, см. с. 131).

На северо-востоке Дзержинска карстовый процесс развивается преимущественно в сульфатных отложениях нижней перми, залегающих на глубине 65–68 м под толщей четвертичных (40 м) и уржумских пород (25–28 м). Иногда в кровле сульфатных пород отмечается маломощный прослой карбонатов (до 3 м) (Ерофеев, Катаев, 2010; Романова, Дробинина, 2024). Поверхностный карст — воронкообразные формы различного диаметра — результат провалообразования и суффозионного выноса песков в трещинно-карстовые коллекторы (Ерофеев, Катаев, 2010).

Интерес к выбранной территории обусловлен не только открытым характером местности, но и техногенной нагрузкой на последнюю. Кроме того, изучение характера поверхностной закарстованности на освоенных территориях представляет особый интерес как в силу интенсивного использования последних и крайней необходимости в объективной оценке карстовой опасности, так и в силу техногенного планирования территории, вносящего значительную сложность в дистанционное изучение процесса.

Ключевой особенностью карстового процесса по результатам мониторинга (Иконников, 2008) является то, что как древние, так и современные формы проявления карста на земной поверхности имеют тенденцию к концентрации на ограниченных участках. Их границы остаются стабильными во времени: новые карстовые деформации, как правило, возникают в непосредственной близости от уже существующих, причём примерно в 20 % случаев они формируются повторно на тех же местах. Поэтому детальная характеристика современного характера поверхностной закарстованности позволит оконтурить территории, где вероятность провалообразования в будущем максимальная.

На территории города Уфы карст связан с неотектоническим поднятием развитых в геологическом разрезе карбонатных и сульфатных пород. В пределах Уфы и окрестностей отмечается широкое распространение карстовых воронок, провалов, погребённых палеодолин.

Карст развивается и проявляется на поверхности участков, где мощность водопроницаемого покрова до 80 м, а водоупорного — до 50 м. По данным инженерно-геологического бурения кровля карстующихся отложений установлена с поверхности и до глубины 60 м. Карстопроявления концентрируются вдоль склонов долин рек, оврагов и балок (Камалов, 2019).

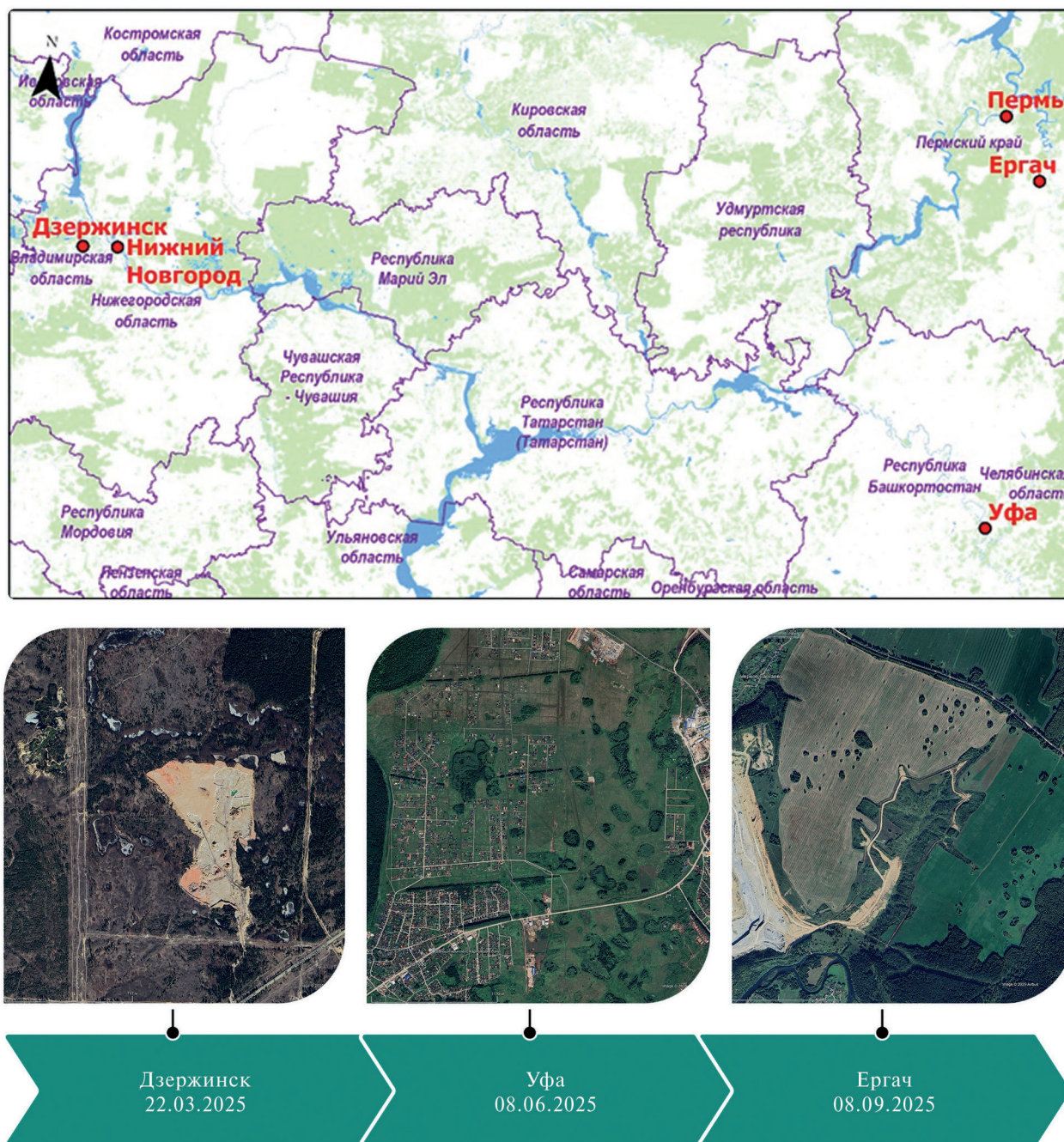


Рис. 1. Схема расположения участков

В Нижнесылвенском районе карст развивается преимущественно в гипсах и частично в карбонатных породах иренского горизонта, глубина залегания которого изменяется в широких пределах: от первых метров в долине реки Сылвы и её притоков до сотни метров на водораздельных пространствах. Поверхностные карстовые формы представлены воронками и котловинами различных форм и размеров, плотность которых возрастает в долинах логов и уменьшается с приближением к водоразделам (Максимович и др., 2021).

Отличием данных территорий друг от друга, кроме степени техногенной нагрузки, становится характер обводнённости поверхностных форм. Так, на северо-востоке Дзержинска и в окрестностях Уфы даже в меженное время наблюдается наличие воды в некоторых карстовых формах (см. *рис. 1*), что может быть связано с тампонажем дна карстовых воронок тонкодисперсным материалом, который предотвращает инфильтрацию и инфлюацию воды через днища воронок в карстовый массив. В Нижнесылвенском районе, наоборот, преимущественно все воронки сухие, поверхностный сток, который направляется в них очень быстро дренируется сквозь поноры (*рис. 2*) в днищах воронок. Понижения, наоборот, могут концентрировать сток — это находит выражение в изменении характера растительности.

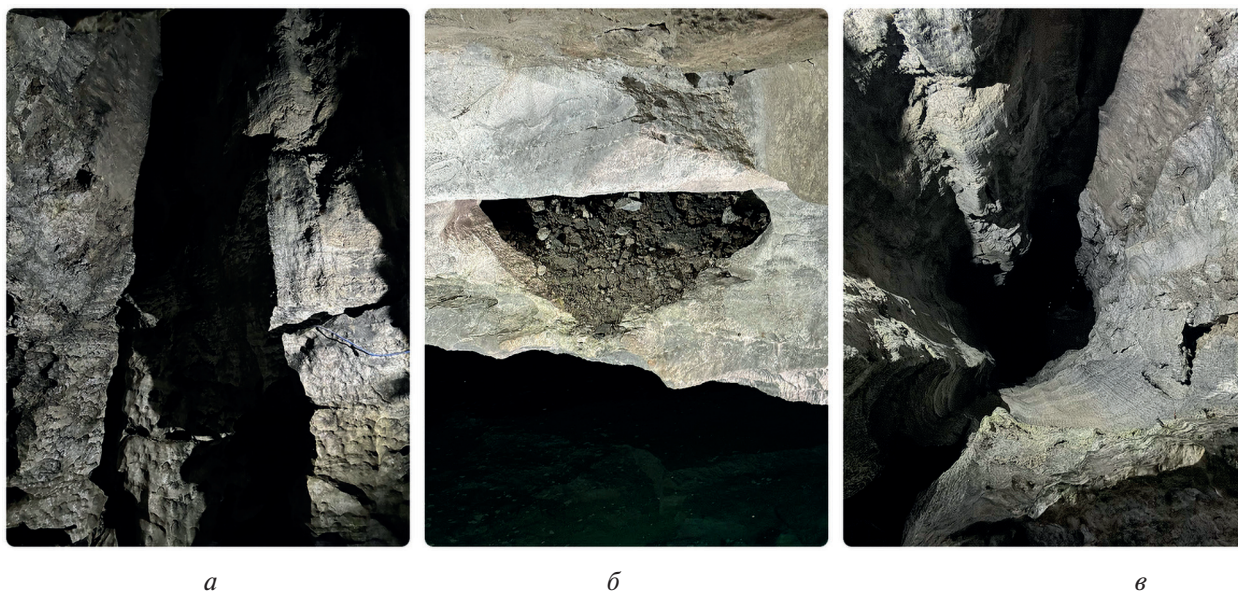


Рис. 2. Фото поноров, дренирующих поверхностный сток вглубь массива, в Нижнесылвенском карстовом районе (Кунгурская ледяная пещера): *а* — вид сбоку на пустой понор; *б* — вид снизу на затампонированный понор; *в* — вид снизу на пустой понор

Методика исследования

Основой для дешифрирования проявлений карстового процесса по данным ДЗЗ служит анализ характерных форм рельефа с использованием снимков сверхвысокого пространственного разрешения (менее 1 м на пиксель) в естественном цветовом диапазоне на портале Google Earth — изображения © 2025 Airbus (см. *рис. 1*). Для повышения достоверности интерпретации карстовых форм в методику исследования поверхностной закарстованности в работе включён анализ косвенных признаков, выявляемых методом спектрального анализа космических снимков. К таким признакам отнесены:

- геоморфологический, представленный ориентированными вдоль склонов аномалиями, связанными с пониженной влажностью субстрата из-за развития трещин бортового отпора;
- геоботанический, представляющий собой аномалии растительного покрова, такие как контрастные скопления влаголюбивой кустарниковой растительности по периметру карстовых форм, идентифицируемые по характерным спектральным откликам в ближнем инфракрасном NIR (*англ.* near infrared) диапазоне.

Методика дешифрирования карстовых форм основана на комплексном анализе прямых морфологических признаков по снимкам сверхвысокого разрешения и спектральных аномалий, являющихся индикаторами геоботанического и геоморфологического признаков закарстованности.

Анализ геоморфологического признака проводился с использованием нормализованного разностного индекса влажности NDMI (*англ.* Normalized Difference Moisture Index) (Gao, 1996) за два периода (весна и лето 2025 г.).

Показатель NDMI применяется для оценки содержания влаги в растительности и почвенном покрове, он позволяет выявлять участки, где растения испытывают недостаток влаги. Чем больше воды в биомассе, тем выше значение NDMI. Его расчёт основан на комбинации данных NIR и коротковолнового инфракрасного SWIR (*англ.* short wave infrared) диапазонов спектра.

Использование снимков Sentinel-2 MSI накладывает некоторые ограничения на проведение спектрального анализа в карстологических целях вследствие относительно низкого пространственного разрешения этих снимков. Применение спектрального анализа для снимков высокого разрешения космических аппаратов, таких как «Ресурс-П», технические характеристики съёмочной аппаратуры которых позволяют получать данные с разрешением на местности в пределах первых метров, позволит повысить точность карстологических прогнозов с использованием спектральных оценок.

В работе продемонстрирован пример автоматизированного дешифрирования карстовых форм с применением снимков аппарата «Ресурс-П». Для анализа построена карта изменения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974), позволяющего идентифицировать карстовые воронки по характерным фитоиндикаторам. Индекс NDVI — это числовой показатель состояния растительности, рассчитываемый по мультиспектральным спутниковым снимкам на основе того, как растения отражают и поглощают свет в красной (Red) и ближней инфракрасной (NIR) зонах спектра. Значения NDVI меняются от -1 до 1 , где высокие положительные значения указывают на пышную, здоровую растительность. Низкие положительные значения свидетельствуют о том, что растения находятся в начале вегетации; значения близкие к нулю указывают на участки, где растительность отсутствует; отрицательные значения соответствуют снегу, воде.

Карта изменения NDVI была бинаризована. После создания бинарной маски выполнена процедура векторизации выделенных объектов с последующим сглаживанием их границ для достижения корректной геометрии объектов. Затем все векторизованные формы подверглись двухуровневой фильтрации на основе морфометрических и морфологических характеристик, типичных для карстовых проявлений в районе работ. Процедура фильтрации реализована в два последовательных этапа.

Первый этап — отбор по площадному критерию (морфометрическая характеристика), где нижний порог определяется разрешающей способностью космического снимка, а верхний — региональными особенностями морфометрии карстовых форм: минимальная площадь — 30 м^2 (исключение артефактов и шумовых объектов); максимальная площадь — 8000 м^2 (исключение некарстовых форм рельефа).

Второй — идентификация изометричных контуров с применением специализированных метрик (морфологическая характеристика). Для количественной оценки степени округлости форм использовались коэффициент округлости, основанный на изопериметрическом соотношении, и индекс изометричности.

Коэффициент округлости определяется из изопериметрического неравенства, представленного в виде:

$$4\pi S \leq P^2,$$

где S — площадь фигуры, ограниченной кривой длиной P .

То есть для любой замкнутой кривой, заключённой на плоскости, квадрат её длины всегда больше или равен произведению 4π на площадь ограниченной этой кривой области; равенство выполняется только в случае окружности. Поэтому чем ближе отношение $4\pi S/P^2$ к 1 , тем ближе форма к кругу.

Индекс изометричности — это отношение меньшего диаметра D_{\min} к большему D_{\max} , которое для круглых форм тоже будет стремиться к 1 .

С использованием векторного слоя выделенных форм в калькуляторе поля ГИС QGIS (англ. Quantum Geographic Information Systems) вычислены ключевые морфометрические характеристики каждого объекта, включая площадь, периметр, диаметр большой и малой оси, коэффициент округлости и индекс изометричности.

Обсуждение результатов

Спектральный анализ снимков выявляет аномалии, неразличимые в видимом диапазоне: геоботанические (скопления влаголюбивых кустарников по краям воронок) и геологические (выходы коренных пород) признаки. Зоны развития трещин бортового отпора, характеризующиеся пониженной влажностью и разреженной растительностью, визуализируются на спектральных изображениях как линейные спектральные аномалии, ориентированные вдоль склонов (рис. 3).

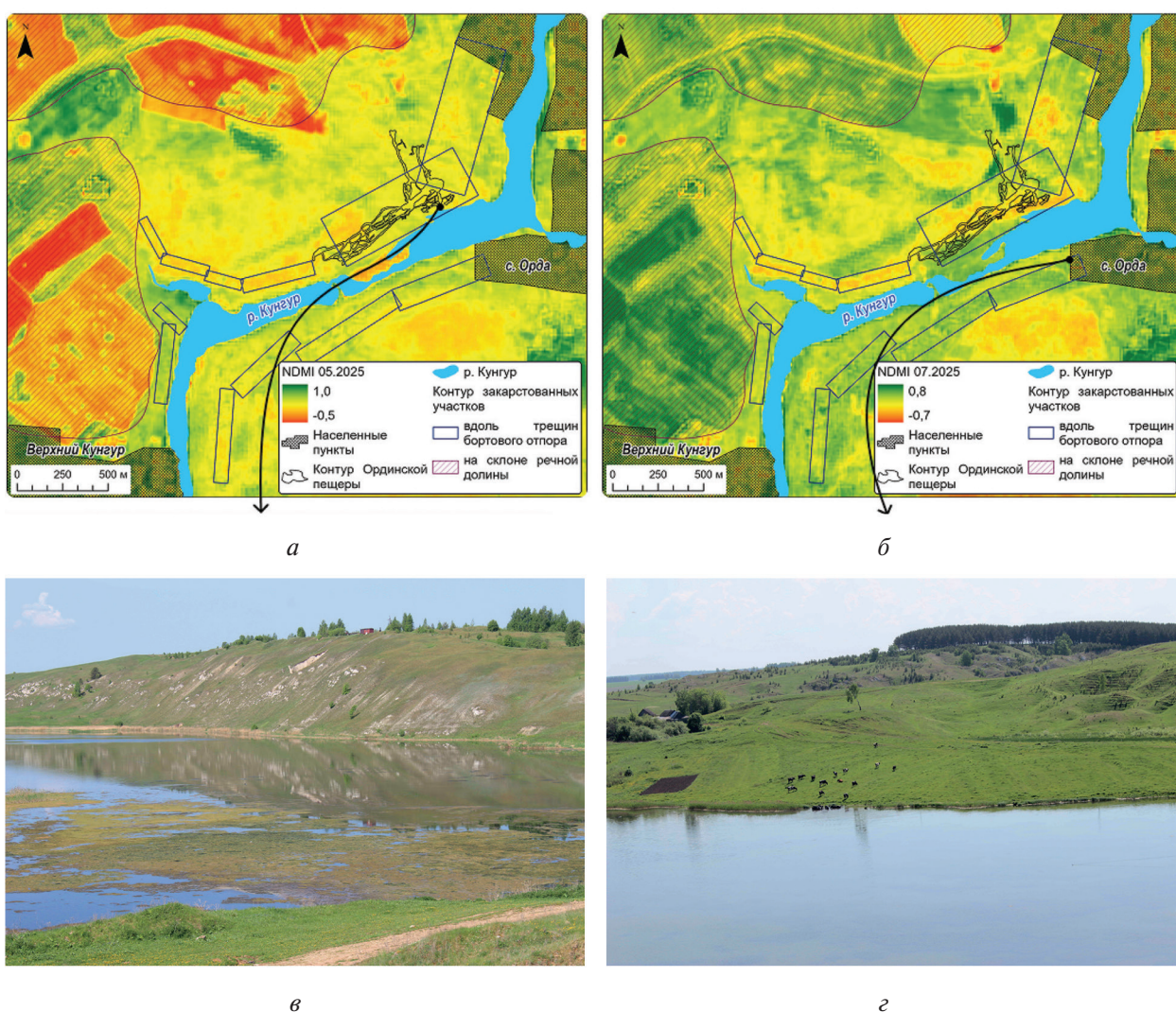


Рис. 3. Карты изменения NDMI весной (а) и летом (б) 2025 г. с фотографиями местности правого (в) и левого (з) берега реки Кунгур

Анализ геоморфологического признака. Изучая карту NDMI для иренского карстового района, являющегося классическим примером сульфатного карста, можно сделать вывод об изменении влажности в карстовых воронках и за их пределами отдельно на участках распространения карстовых форм в условиях развития трещин бортового отпора и на удалении

от берега — на склоне речной долины. Заметно также, как в течение вегетационного периода поменялась картина: если на полях до установления растительного покрова карстовые воронки выделялись как участки, покрытые влаголюбивой растительностью, то после зарастания полей мы видим снижение влажности в точках развития карстовых форм (см. *рис. 3*), объяснение которому — дренаж и осушение воронок через поноры на дне. Отбор снимков Sentinel-2 MSI (A/B) NDMI проводился по критериям минимальной облачности (до 5%), отсутствия дымки для весеннего (24.05.2025) и летнего (13.07.2025) периода.

Анализ геоботанического признака. С использованием снимков аппарата «Ресурс-П» на 21.06.2021 на пилотном участке на севере населённого пункта Ергач (Кунгурский муниципальный округ, Пермский край, Россия) построена карта изменения NDVI (*рис. 4а*).

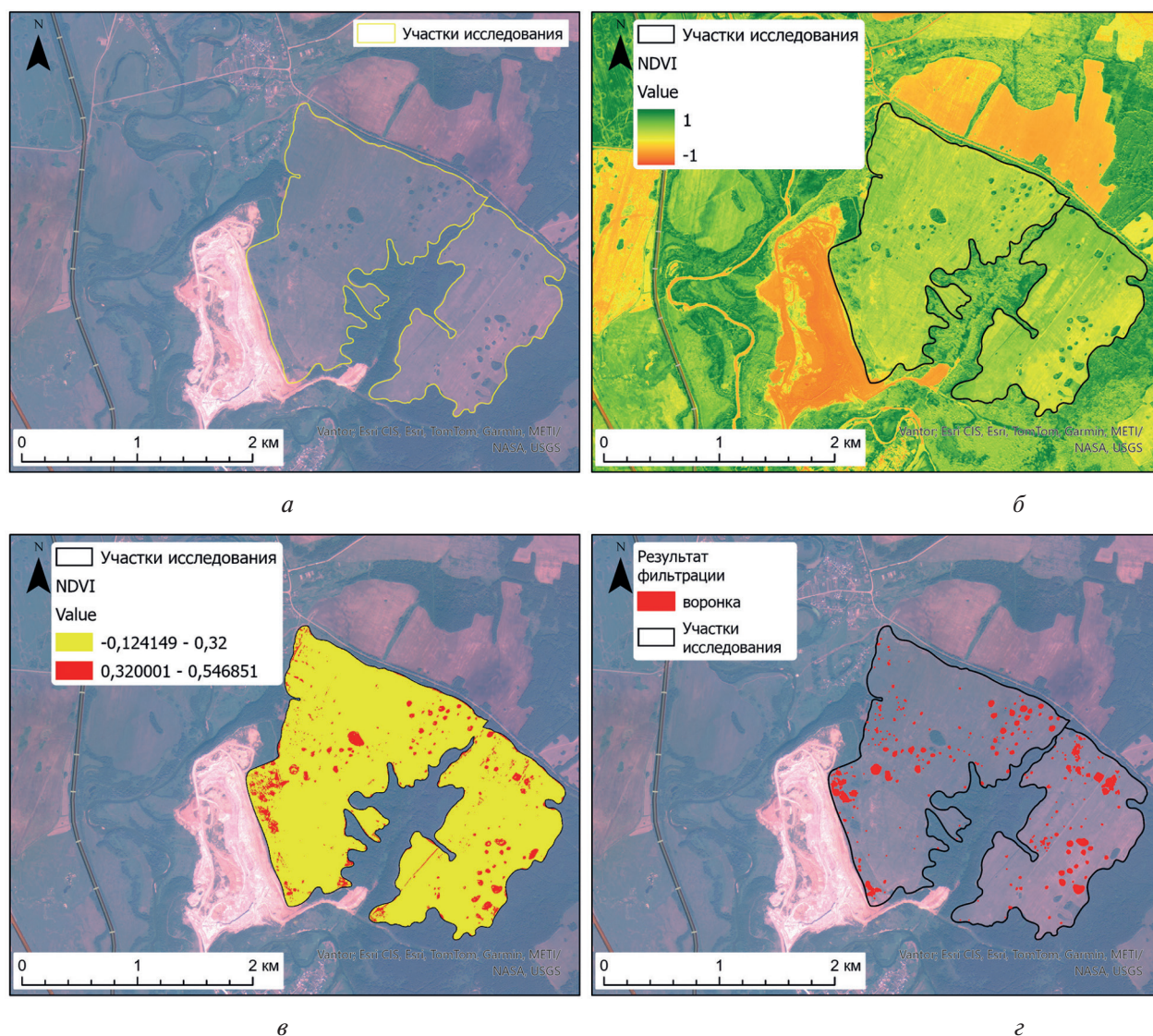


Рис. 4. Схемы исследуемой территории: *а* — космоснимок «Ресурс-П» на 21.06. 2021; *б* — карта изменения NDVI; *в* — бинаризованный растр NDVI; *г* — выделенные карстовые воронки

Особенностью карстовых форм на изучаемой территории считается специфический растительный покров: периферийные части воронок обычно заняты влаголюбивыми кустарниковыми ассоциациями, днища характеризуются изменённым видовым составом травянистой растительности. Эти геоботанические аномалии чётко детектируются на карте NDVI в виде контрастных зон с атипичными значениями индекса (см. *рис. 4б*).

Дальнейшая бинаризация карты изменения NDVI проведена с установлением порогового значения NDVI, равного 0,32. Пороговое значение определено экспертным путём посредством визуального анализа результатов дешифрирования карстовых форм на изучаемой территории с использованием снимков сверхвысокого пространственного разрешения в естественном цветовом диапазоне на портале Google Earth и не является постулативным для предлагаемого метода — оно выбирается на основании конкретных особенностей закарстованной территории и разрешения космоснимка. Учитывая относительный характер вегетационного индекса, предварительно была проведена маскировка условно-однородных ландшафтных комплексов, исключившая из анализа лесные массивы, техногенные объекты, водные поверхности и т. п. Это позволило сфокусировать исследование на однородных закарстованных участках, площадь которых составила 3,9 км². После создания бинарной маски выполнена процедура векторизации выделенных объектов с последующим сглаживанием их границ для достижения корректной геометрии объектов.

С использованием векторного слоя выделенных форм в калькуляторе поля ГИС QGIS вычислены ключевые морфометрические характеристики каждого объекта, включая площадь, периметр, диаметр большой и малой оси, коэффициент округлости и индекс изометричности. Диапазон перечисленных параметров указан в *таблице*.

Основные морфометрические характеристики

Количество выделенных форм	Диаметр карстовых форм, м			Площадь, м ²	Периметр, м
	минимальный	максимальный	средний		
<i>До фильтрации по морфометрическому признаку До фильтрации по морфологическому признаку</i>					
1925	1,4–195,5	1,8–339,0	1,7–223,1	2,06–18 570,9	5,4–1547,4
<i>До фильтрации по морфологическому признаку</i>					
486	2,7–100,6	4,2–339,0	4,2–176,8	30,3–6881,3	13,1–731,8
<i>После фильтрации с использованием индекса изометричности</i>					
266	4,8–100,6	6,7–150,5	6,2–125,55	30,3–6881,3	19,7–731,8

Всего выделено 1925 форм. В результате фильтрации по площадному критерию отфильтровано 486 форм, удовлетворяющих поставленным условиям, остальные 1439 — артефакты (1244 шт) и другие формы рельефа (195 шт). Из выделенных с использованием индекса изометричности 266 форм определены как карстовые воронки.

Фильтрация на основе оценки степени округлости использована по причине того, что карстовые воронки в большинстве своём представляют в плане круглые или незначительно вытянутые в одном направлении формы. Таким образом, в результате этой фильтрации продолговатые канавообразные формы исключены из выборки.

На *рис. 5* (см. с. 137) представлены гистограммы распределения коэффициента округлости и индекса изометричности для форм до фильтрации по морфологическому признаку (см. *рис. 5а*) и после фильтрации с использованием индекса изометричности (см. *рис. 5б*). К карстовым воронкам отнесены формы, индекс изометричности которых составил 0,55 и более. Выбор индекса изометричности вместо коэффициента округлости обусловлен лучшими результатами фильтрации по данным дешифрирования карстовых форм.

На основе комплексного анализа полученных метрик сформирована выборка исключительно воронкообразных форм, соответствующих диагностическим признакам карстового морфогенеза (266 форм). Отфильтрованная выборка демонстрирует типичные геометрические параметры поверхностных проявлений карстового процесса (см. *рис. 4е*).

Выделенные формы занимают 5,1 % от исследуемых закарстованных участков. Гистограмма распределения среднего диаметра карстовых форм демонстрирует типичный для изучаемого района логнормальный характер со средним значением диаметра 20,4 м, стандартным отклонением 18,5 м (*рис. 6*, см. с. 137). На исследуемой территории встречены

карстовые формы средним диаметром преимущественно от 6,2 до 73,3 м, однако отмечены единичные формы диаметром более 100 м (карстовые котловины).

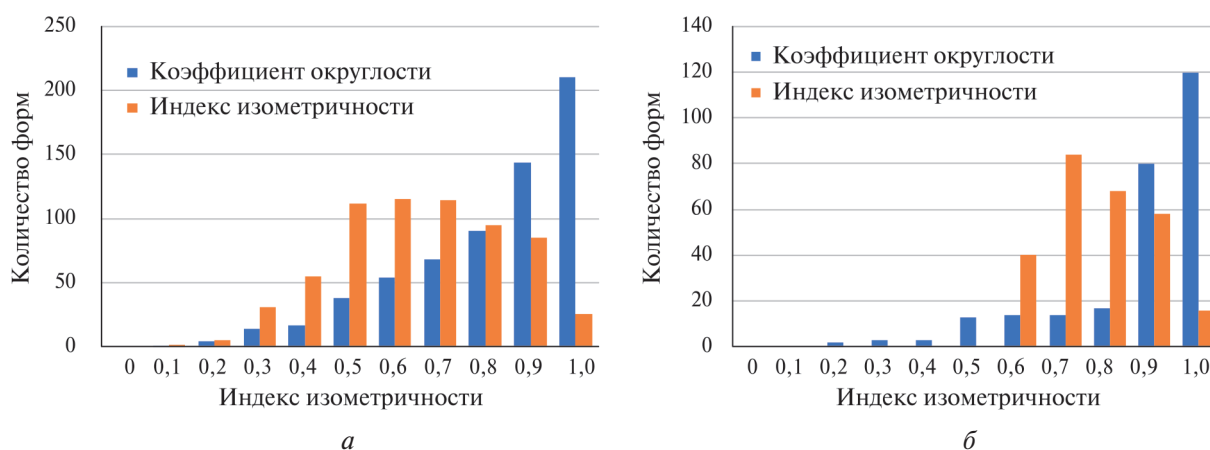


Рис. 5. Гистограммы распределения коэффициента округлости и индекса изометричности для форм до фильтрации по морфологическому признаку (а) и после фильтрации с использованием индекса изометричности (б)

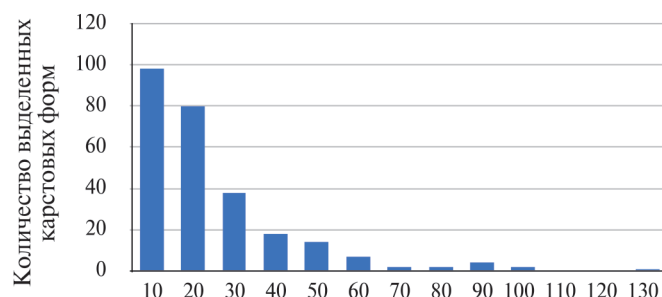


Рис. 6. Гистограмма распределения значений среднего диаметра карстовых форм

Выводы

Таким образом, были проанализированы косвенные признаки закарстованности территорий: развитие трещин бортового отпора в закарстованных массивах, зарастание бортов карстовых воронок влаголюбивой растительностью — дешифрирование которых возможно с использованием спектральных оценок. В статье систематизирован подход к изучению дистанционных признаков карстового процесса на открытых территориях: отдельно рассмотрено дешифрирование специфических форм рельефа с применением снимков сверхвысокого разрешения, а также предложена методика автоматизированного выделения карстовых форм с использованием спектральных индексов на основе регионального геоботанического признака поверхностной закарстованности. С применением этого признака на открытых территориях весьма успешно дешифрируются карстовые воронки. Морфология карстовых воронок — преимущественно изометричная округлая форма — также позволяет автоматизировать их выделение.

Интеграция современных методов анализа данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения с мощным аналитическим аппаратом ГИС позволила разработать эффективную методику оперативного картографирования карстовых форм. Основное преимущество предложенного подхода заключается в возможности быстрого получения структурированных векторных данных, готовых для последующего пространственного анализа. Традиционное требование верификации дистанционных данных полевыми исследованиями *in situ* не умаляет операционных преимуществ методики, а формирует основу для комплексного многоуровневого исследования поверхностной закарстованности массивов.

Наиболее полное и достоверное дистанционное изучение проявлений карстового процесса достигается при комплексном анализе не только прямых, но и косвенных признаков (индикаторов). Спектральный анализ данных ДЗЗ является мощным инструментом для карстологического дешифрирования, позволяет идентифицировать признаки, не прослеживающиеся в видимом диапазоне: геоботанические аномалии (скопление влаголюбивой растительности по бортам воронок); участки скудной растительности вдоль зон развития трещин бортового отпора; спектральные аномалии, связанные с обнажениями коренных растворимых пород.

Проведённая работа по автоматическому выделению карстовых форм на основе результатов спектрального анализа открывает путь к созданию стандартизированных, высокопроизводительных методов мониторинга. Такой подход позволяет:

- объективизировать процесс дешифрирования, снижая субъективность визуальной оценки;
- ускорить обработку данных для обширных территорий;
- повысить точность карт карстоопасности за счёт выявления слабо выраженных форм.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-00350, <https://rscf.ru/project/24-27-00350/>.

Литература

1. Дробинина Е. В. Автоматизация оценки поверхностной закарстованности по спутниковым снимкам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 79–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90.
2. Дробинина Е. В., Китаева М. А., Романова Е. Р. Особенности мониторинга опасных инженерно-геологических процессов с применением геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли // Вестн. Пермского ун-та. Геология. 2025. Т. 24(1). С. 23–31. DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23.
3. Ерофеев Е. А., Катаев В. Н. Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории // Инженерная геология. 2010. № 4. С. 34–46.
4. Иконников Л. Б. Основные результаты карстомониторинга г. Дзержинска (1992–2005 гг.) // Геориск. 2008. № 3. С. 50–54.
5. Камалов В. Г. Опасные геологические процессы на территории Уфимского «полуострова» (Инженерная геодинамика). Уфа: Информреклама, 2019. 239 с.
6. Максимович Н. Г., Кадебская О. И., Мещерякова О. Ю. Сульфатный карст Пермского края. Пермь, 2021. 302 с.
7. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Геоморфометрические признаки карстового процесса на равнинных лесопокрытых территориях (на примере Двинско-Мезенской карстовой провинции) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 173–183. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-173-183.
8. Романова Е. Р., Дробинина Е. В. Применение современных открытых данных дистанционного зондирования Земли в изучении поверхностной закарстованности территорий на примере участков около г. Дзержинска // Материалы Всероссийской научно-практич. конф. с международ. участием «Карст и пещеры. 2024». Пермь: Пермский гос. нац. исследоват. ун-т, 2024. С. 145–151.
9. Романова Е. Р., Китаева М. А., Дробинина Е. В. К вопросу изучения опасных инженерно-геологических процессов с применением данных дистанционного зондирования Земли // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 8. С. 74–94. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872.
10. Ferentinou M., Witkowski W., Hejmanowski R. et al. Detection of sinkhole occurrence, experiences from South Africa // Proc. Intern. Association of Hydrological Sciences. 2020. V. 382. P. 77–82. DOI: 10.5194/piahs-382-77-2020.
11. Gao B.-c. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. Iss. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
12. Khoshlahjeh Azar M., Hamedpour A., Maghsoudi Y., Perissin D. Analysis of the deformation behavior and sinkhole risk in Kerdabad, Iran using the PS-InSAR method // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 14. Article 2696. DOI: 10.3390/rs13142696.

13. Kim J. W., Lu Z., Degrandpre K. Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1A SAR interferometry (preliminary results) // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. Iss. 4. Article 313. DOI: 10.3390/rs8040313.
14. Orhan O., Oliver-Cabrera T., Wdowinski S. et al. Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapınar Region, Turkey: A multi-sensor InSAR time series study // *Sensors*. 2021. V. 21. Iss. 3. Article 774. DOI: 10.3390/s21030774.
15. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp. NASA SP-351. 1974. V. 1. P. 309–317.
16. Theilen-Willige B. Remote sensing contribution to the detection of karst features and their structural environment in the area of the Bekaa Valley in Central-Lebanon // *Mediterranean J. Basic and Applied Sciences*. 2024. V. 8. Iss. 2. P. 133–155. DOI: 10.2139/ssrn.4861190.

Remote signs of karst process in open areas

E. V. Drobinina, M. A. Kitaeva, A. A. Ezhova

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

The article is devoted to the research of a comprehensive approach to identifying remote signs of sulfate and carbonate-sulfate karst in open areas using remote sensing data. The paper proposes a set of diagnostic indicators systematized using karst areas in Nizhny Novgorod Region, Republic of Bashkortostan, and Perm Krai as examples. The indicators take into account both direct morphological forms of relief (e.g. karst sinkholes, basins, blind valleys) that are clearly identifiable during visual interpretation and indirect geobotanical anomalies identified by spectral analysis methods. Of particular methodological importance is the testing of an algorithm for automatic mapping of karst forms based on the results of spectral analysis, which increases the objectivity and effectiveness of karst monitoring. The conclusion drawn is that remote sensing data, when combined with visual and automated spectral interpretation, are highly reliable and have great potential for assessing the karst hazard of territories.

Keywords: remote sensing, spectral analysis, karst, geoinformation systems

Accepted: 24.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-129-140

References

1. Drobinina E. V., Automation of surface karst assessment using Sentinel-2 satellite imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 79–90 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90.
2. Drobinina E. V., Kitaeva M. A., Romanova E. R., Monitoring of hazardous geotechnical processes using the geoinformation systems and Earth remote sensing data, *Bull. of Perm University. Geology*, 2025, V. 24(1), pp. 23–31 (in Russian), DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23.
3. Erofeev E. A., Kataev V. N., Application of probabilistic and statistical methods for assessing karst hazards in conditions of anthropogenic impact on karstified territories, *Engineering Geology World*, 2010, No. 4, pp. 34–46 (in Russian).
4. Ikonnikov L. B., Main results of karst monitoring in Dzerzhinsk (1992–2005), *Georisk*, 2008, No. 3, pp. 50–54 (in Russian).
5. Kamalov V. G., *Opasnye geologicheskie protsessy na territorii Ufimskogo "poluostrova" (Inzhenernaya geodinamika)* (Dangerous geological processes on the territory of the Ufa "peninsula" (Engineering geodynamics)), Ufa: Informreklama, 2019, 239 p. (in Russian).

6. Maksimovich N. G., Kadevskaya O. I., Meshcheryakova O. Yu., *Sul'fatnyi karst Permskogo kraya* (Sulfate karst of the Perm region), Perm, 2021, 302 p. (in Russian).
7. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Geomorphometric features of karst process in plain forested territories (by the example of the Dvinsk-Mezen karst province), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 173–183 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-173-183.
8. Romanova E. R., Drobina E. V., Application of modern open data of Earth remote sensing to study the karst forms distribution on the example of areas near the city of Drezhinsk, *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Karst i peshchery. 2024"* (Proc. All-Russian scientific and practical conference with international participation "Karst and caves. 2024"), Perm: Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2024, pp. 145–151 (in Russian).
9. Romanova E. R., Kitaeva M. A., Drobina E. V., Application of Earth remote sensing data when studying hazardous geotechnical processes, *Bull of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, V. 336, No. 8, pp. 74–94 (in Russian), DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872.
10. Ferentinou M., Witkowski W., Hejmanowski R. et al., Detection of sinkhole occurrence, experiences from South Africa, *Proc. Intern. Association of Hydrological Sciences*, 2020, V. 382, pp. 77–82, DOI: 10.5194/piahs-382-77-2020.
11. Gao B.-c., NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, Iss. 3, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
12. Khoshlahjeh Azar M., Hamedpour A., Maghsoudi Y., Perissin D., Analysis of the deformation behavior and sinkhole risk in Kerdabad, Iran using the PS-InSAR method, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 14, Article 2696, DOI: 10.3390/rs13142696.
13. Kim J. W., Lu Z., Degrandpre K., Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1A SAR interferometry (preliminary results), *Remote Sensing*, 2016, V. 8, Iss. 4, Article 313, DOI: 10.3390/rs8040313.
14. Orhan O., Oliver-Cabrera T., Wdowinski S. et al., Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapinar Region, Turkey: A multi-sensor InSAR time series study, *Sensors*, 2021, V. 21, Iss. 3, Article 774, DOI: 10.3390/s21030774.
15. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp.*, NASA SP-351, 1974, V. 1, pp. 309–317.
16. Theilen-Willige B., Remote sensing contribution to the detection of karst features and their structural environment in the area of the Bekaa Valley in Central-Lebanon, *Mediterranean J. Basic and Applied Sciences*, 2024, V. 8, Iss. 2, pp. 133–155, DOI: 10.2139/ssrn.4861190.