

Автоматизация оценки поверхностной закарстованности по спутниковым снимкам Sentinel-2

Е. В. Дробинина

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

Демонстрируются преимущества проведения детального анализа данных дистанционного зондирования Земли в карстологических целях с использованием облачной платформы Google Earth Engine и геоинформационных систем. В качестве исследуемого выбран закарстованный участок в пределах Кишертского района развития гипсового и карбонатно-гипсового карста в Пермском крае. В статье демонстрируется применение классификации космических снимков с обучением, целью которой служит автоматическое зонирование территории по типу местности: луга и сельхозугодья, леса, урбанизированные участки. В пределах территорий, покрытых луговой растительностью, проведён расчёт вегетационных индексов с целью оконтурить потенциально опасные участки. Идея использования в оценке поверхностной закарстованности вегетационных индексов основана на том, что относительно высокие значения вегетационных индексов в пределах карстовых воронок являются отражением того, что борта, склоны и днища воронок на изучаемой площади покрыты кустарниковой влаголюбивой растительностью, которая при расчёте индексов весьма успешно дешифрируется на фоне луговой. На основе пространственного анализа, заключающегося в оценке площадного распространения потенциально опасных участков по данным растровых моделей вегетационных индексов, построена прогнозная модель, зонированная изучаемую территорию по степени карстовой опасности. В результате количественной оценки применимости предлагаемой методики можно сделать вывод, что участки совпадения всех четырёх индексов весьма точно характеризуют площадь распространения подтверждённых карстовых форм и комплексный учёт вегетационных индексов весьма информативен в оценке поверхностной закарстованности.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования земли, Google Earth Engine, вегетационные индексы, инженерно-геологические изыскания, поверхностная закарстованность, карстовый массив, карстовая опасность

Одобрена к печати: 28.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90

Введение

Карстовые провалы в силу внезапности образования считаются одним из осложняющих и неблагоприятных факторов при проектировании и строительстве. Неотъемлемая часть изысканий на закарстованных территориях — оценка карстовой опасности. Поиск закономерностей в распределении поверхностных карстовых форм не потерял своей актуальности: в большинстве случаев формирование новых карстовых провалов происходит на участках интенсивной поверхностной закарстованности, где имеются все предпосылки для провалообразования.

На сегодняшний день данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в инженерно-геологических изысканиях используются преимущественно только с целью визуального анализа и дешифрирования карстовых форм по снимкам в видимом диапазоне (RGB-изображения: R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий). 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 (Alexander et al., 2013; Luman, Panno, 2013; Panno, Weibel, 1996), данных радиолокационной съёмки либо мультиспектральных космоснимков (Hofierkaa et al., 2013; Siart et al., 2009).

Опыт применения анализа данных ДЗЗ в карстовых районах освещается в работах Е. В. Поляковой с коллегами (Полякова и др., 2018, 2021). Авторами предложено использовать методы

гидрологической коррекции цифровой модели рельефа (ЦМР) для обнаружения карстовых понижений и воронок. Проведена гидрологическая коррекция ЦМР Архангельской обл. (на основе данных ASTER GDEM v.2 (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)), получен векторный слой бессточных впадин, рассчитана их плотность на единицу площади.

Е. В. Поляковой с коллегами (Полякова и др., 2018, 2021) отмечается также, что более двух десятилетий в зарубежных исследованиях проводятся работы по выявлению впадин в цифровых моделях рельефа, 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 м), ALOS/PRISM-DEM (5 м) (*англ.* Advanced Land Observing Satellite / Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping Digital Elevation Model) и SRTM-DEM (90 м) (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) практически отсутствуют либо проводятся для открытых поверхностей, где карстовые воронки, выраженные в рельефе, задернованы, кустарниковой растительности на бортах и склонах нет (de Carvalho et al., 2014). В отечественных работах бессточные впадины, полученные в результате гидрологической коррекции, относятся к ошибкам в ЦМР (Полякова и др., 2021).

Кроме выделения бессточных впадин, в оценке карстовой опасности данные дистанционного зондирования применяются в линеаментном анализе. Под линеаментами понимаются узкие, протяжённые системы форм рельефа различного генезиса, прослеживаемые вдоль одной линии на значительные расстояния. Признаки, по которым дешифрируются трещино-разрывные нарушения, в общем, одинаковы для всех видов и типов последних независимо от их протяжённости, а также наличия или величины смещения. Принципиально выделение линеаментов проводится экспертным способом по комплексу геоморфологических и почвенно-геоботанических индикаторов (Золотарев, 2012; Золотарев, Катаев, 2013; Золотарев и др., 2011), которые на космоснимках регистрируются по различиям в цвете, тоне, текстуре (Bruning et al., 2011), или в автоматическом режиме с применением специализированного программного обеспечения.

Интерес к линеаментам объясняется тем, что карстовые воронки зачастую ориентируются вдоль зон трещиноватости и тяготеют к линеаментным узлам — участкам пересечения линеаментов (Shaban et al., 2006). Эти зоны, согласно исследованию ряда авторов, выступают индикаторами подземной сети карстовых полостей и трещин, отличаются повышенной проницаемостью и концентрируют сток поверхностных и подземных вод (Meijerink et al., 2007).

В дешифрировании линеаментов с успехом используются вегетационные индексы, причём индекс NDMI (*англ.* Normalized Difference Moisture Index — стандартизованный индекс различий увлажнённости) больше подходит для этих целей, чем индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), так как лучше характеризует содержание влаги в растительности (Jin, Sader, 2005) и менее подвержен влиянию облачности (Gao, 1996). Бо-Цай Гао (Gao, 1996) обнаружил существование корреляции между линеаментами и состоянием растительности: линеаменты довольно хорошо выстраиваются в зоны с повышенными положительными значениями NDMI (0,2–0,6) и высокими положительными значениями NDVI (0,7). Эти области — потенциальные зоны питания водоносных горизонтов карстового массива.

В настоящей работе предпринята попытка расширить возможности анализа ДЗЗ в карстологических целях с использованием платформы Google Earth Engine (GEE) и геоинформационных систем (ГИС). Проведена оценка поверхностной закарстованности изучаемой территории посредством классификации спутникового изображения и расчёта вегетационных индексов для участка развития карбонатно-сульфатного типа карста. Методика проведения оценки полностью автоматизирована, что до минимума сокращает время осуществления анализа. В качестве исходных данных использованы два набора космических снимков Sentinel-2 MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument, Level-2A — данные с проведённой атмосферной коррекцией): летнего периода 01.07.2021–01.08.2021 и весеннего 01.04.2021–01.05.2021, на которых процент облачности не превышает 1 %.

Краткая характеристика изучаемой площади

В рамках исследования оценена поверхностная закарстованность северо-западного участка Кишертского муниципального округа Пермского края России в окрестностях д. Подпалиново (рис. 1).

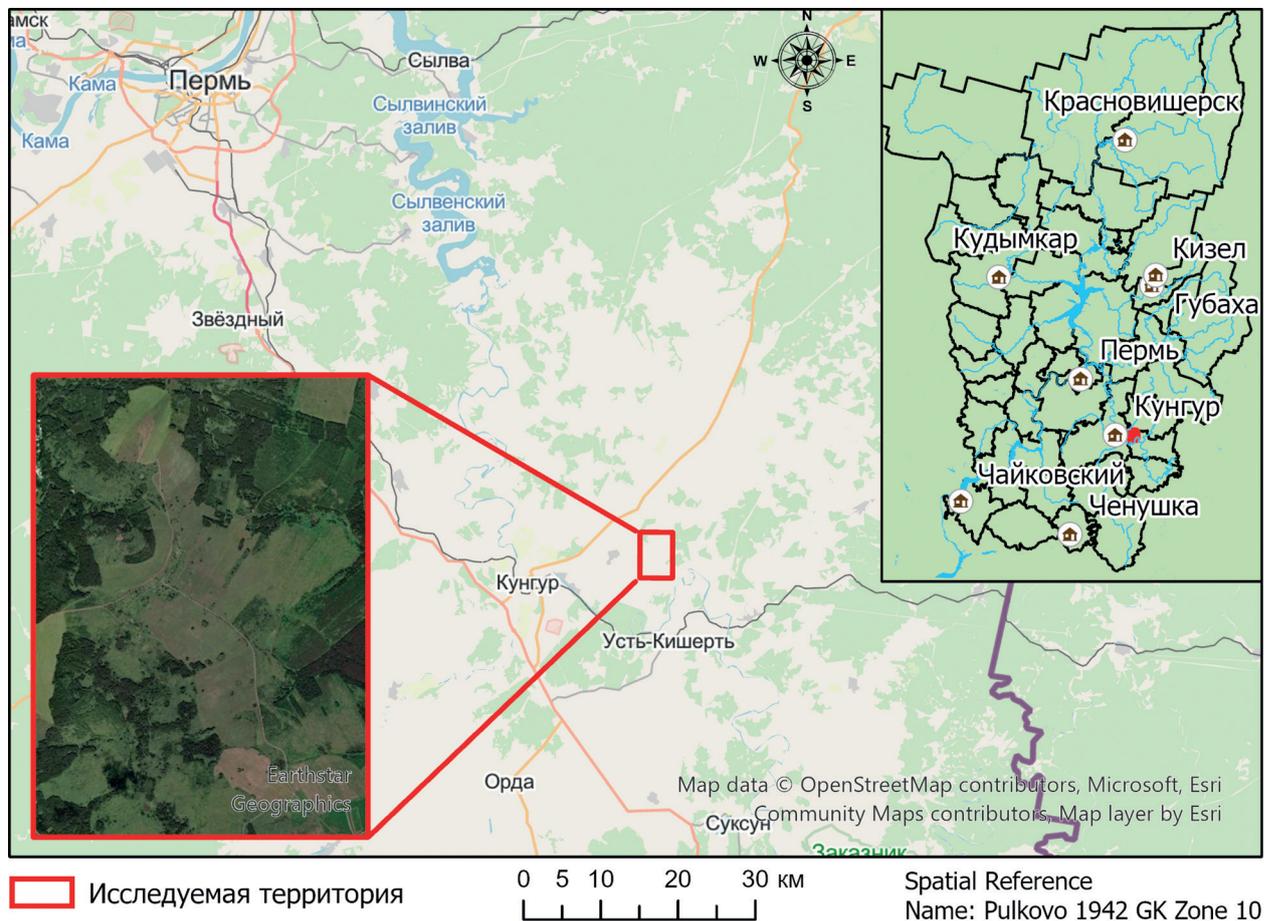


Рис. 1. Схема расположения изучаемой площади

Кишертский административный район в соответствии со схемой районирования карста Пермского края относится к одноимённому району развития преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста (Горбунова и др., 1992). Поверхностные формы карста представлены карстовыми озёрами, воронками, реже блюдцами оседания. Дно и склоны воронок иногда осложняют поноры. Большинство воронок в плане имеют овальную и круглую форму, в разрезе — блюдцеобразную и чашеобразную. Выделяется как беспорядочное, так и линейное расположение карстовых воронок, последнее зачастую приурочено к разрывным нарушениям, транслируемым на поверхность в виде линеаментов.

На данной площади ранее в рамках проекта по теме «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области» (2006–2010) исследователями-карстоведами лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета в ходе обработки архивных материалов и рекогносцировочного обследования карстовые формы были подтверждены и детально описаны. Согласно распределению значений диаметров зафиксированных карстовых воронок, на изучаемой площади встречаются в основном воронки диаметром 15–35 м.

Особенность поверхностных карстовых форм на рассматриваемой территории заключается в развитии кустарниковой растительности на их бортах, склонах и днищах, что накладывает

существенные трудности на проведение анализа данных ДЗЗ посредством выделения бессточных впадин при гидрологической коррекции общедоступных цифровых моделей рельефа (ASTER-GDEM, ALOS/PRISM-DEM, SRTM-DEM) по причине относительно низкого разрешения последних. Дешифрирование карстовых воронок методом гидрологической коррекции ЦМР с большим успехом может быть реализовано с применением высокоточных цифровых моделей рельефа (*англ.* Digital Terrain Model — DTM), исключающих влияние растительности на результат анализа.

Классификация космических снимков с обучением

Классификация космических снимков проводилась с применением облачной платформы Google Earth Engine (GEE), каталог наборов геопространственных данных которой содержит: космоснимки высокого разрешения (например, коллекции Landsat, Sentinel-1, -2), прогнозные климатические модели, карты типов растительности, геофизические и социально-экономические наборы данных и пр. (Gorelick et al., 2017).

Система GEE взаимодействует с веб-базой пространственных данных (точки, линии и полигоны с атрибутами) (Gorelick et al., 2017), поэтому весьма интерактивна в отношении геоинформационных систем, объекты которых могут быть как импортированы в GEE, так и экспортированы из неё в растровом и векторном формате для последующего анализа с применением ГИС (ArcGIS, QGIS, Global Mapper и пр.)

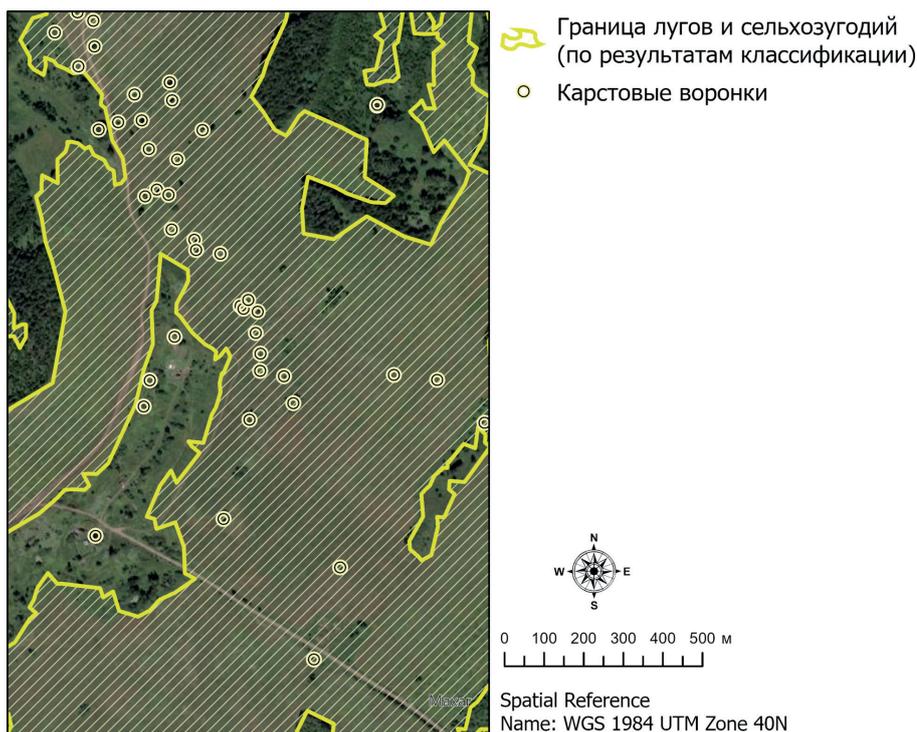


Рис. 2. Результаты выделения лугов и сельхозугодий посредством классификации спутникового изображения

В GEE с применением алгоритма CART (*англ.* Classification and Regression Tree) реализована возможность проведения контролируемой классификации, позволяющей оперативно получить тематическую карту типов местности в зависимости от заданной пользователем обучающей выборки. Каждый тип местности изучаемой территории: луга и сельхозугодья, леса, урбанизированные участки — представлен несколькими обучающими выборками (20–25 точек, равномерно распределённых по изучаемому участку). Каждому набору образ-

цов для упрощения визуализации в зависимости от категории присвоено свойство (*англ.* land-cover — LC), выраженное целым числом: луга и сельхозугодья (*англ.* Fields) — 2, леса (*англ.* Woods) — 1, урбанизированные участки (*англ.* Urban) — 0. Данные в процессе обработки объединены в единую коллекцию объектов функцией merge.

На основе обучающей выборки в точках-образцах извлекаются данные об отражательной способности каждого канала спутникового изображения (*табл. 1*). Данные обучения в дальнейшем накладываются на пиксели исходного изображения с формированием результирующего тематического растра — изображения, классифицированного в соответствии с заданными пользователем параметрами (*рис. 2*, см. с. 82).

Таблица 1. Каналы спутникового изображения Sentinel-2 MSI, используемые в анализе

Канал (bands)	Описание	Разрешение, м	Длина волны S2A/S2B, нм
B2	Blue	10	496,6/492,1
B3	Green		560,0/559,0
B4	Red		664,5/665
B5	Red Edge 1	20	703,9/703,8
B6	Red Edge 2		740,2/739,1
B7	Red Edge 3		782,5/779,7
B8	NIR	10	835,1/833
B8A	Red Edge 4	20	864,8/864
B11	SWIR 1		1613,7/1610,4
B12	SWIR 2		2202,4/2185,7

Примечание: Red Edge — дальний инфракрасный; NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный; SWIR1 — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный.

Качество итогового изображения напрямую зависит от качества входных данных и количества «образцов», заданных пользователем. Чем выше детальность исследования, тем лучшее разрешение требуется от входного спутникового изображения. Рядом авторов при проведении автоматической типизации местности в карстовых районах с применением данных дистанционного зондирования Земли: цифровой модели рельефа, разновременных мультиспектральных космоснимков RapidEye и аэрофотоснимков — отмечается применимость такого подхода именно на локальном и региональном уровнях, на детальном уровне типизация не обладает высокой точностью (Valjavec et al., 2018).

Описанным выше способом на изучаемой территории оконтурены площади распространения луговой растительности. В пределах выделенных луговых территорий с применением вегетационных индексов проведена оценка поверхностной закарстованности и выделены участки различной степени опасности в отношении карста.

Расчёт вегетационных индексов

Идея использования в оценке поверхностной закарстованности вегетационных индексов основана на том, что относительно высокие значения рассчитанных индексов в пределах карстовых воронок являются отражением того, что борта, склоны и днища последних на изучаемой площади покрыты кустарниковой влаголюбивой растительностью, которая при расчёте индексов весьма успешно дешифрируется на фоне луговой. Кроме того, принимая во внимание тот факт, что карстовые воронки на изучаемой территории представляются областью, к которой направлен поверхностный и подземный сток, — областью разгрузки вод в трещинно-карстовые коллекторы, разница в увлажнении поверхности может найти отражение в состоянии

растительности в пределах карстовых воронок и на окружающей территории, что, в свою очередь, повысит производительность дешифрирования карстовых воронок с применением вегетационных индексов.

Расчёт индексов производился также в GEE. На космоснимках в пределах изучаемых участков карстовые формы хорошо дешифрируются на фоне луговой растительности с использованием индексов NDVI, IPVI (англ. Infrared Percentage Vegetation Index — инфракрасный вегетационный индекс), GNDVI (англ. Green Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс зелени), ARVI (англ. Atmospherically Resistant Vegetation Index — вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы) (табл. 2). Примечательно, что данные индексы позволяют выделять карстовые формы, которые при визуальном анализе спутниковых снимков не дешифрируются.

Таблица 2. Вегетационные индексы, использованные при анализе данных ДЗЗ

Вегетационный индекс	Краткое описание	Ссылка на публикацию
NDVI	Нормализованный разностный вегетационный индекс	(Rouse et al., 1974)
IPVI	Инфракрасный вегетационный индекс	(Crippen, 1990)
GNDVI*	Нормализованный разностный вегетационный индекс зелени	(Susantoro et al., 2018)
ARVI	Вегетационный индекс, устойчивый ко влиянию атмосферы	(Kaufman, Tanre, 1992)

* Характеризует фотосинтетическую активность растений и применяется для поиска насаждений, испытывающих дефицит или переизбыток влаги.

При рассмотрении распределения карстовых воронок в зависимости от вегетационных индексов на летних снимках можно сделать вывод, что карстовые воронки, зафиксированные на изучаемой площади, преимущественно попадают на территорию с высокими значениями индексов — NDVI: 0,8–1,0; IPVI: 0,9–1,0; ARVI: 0,8–0,9; GNDVI: 0,6–0,8 (рис. 3).

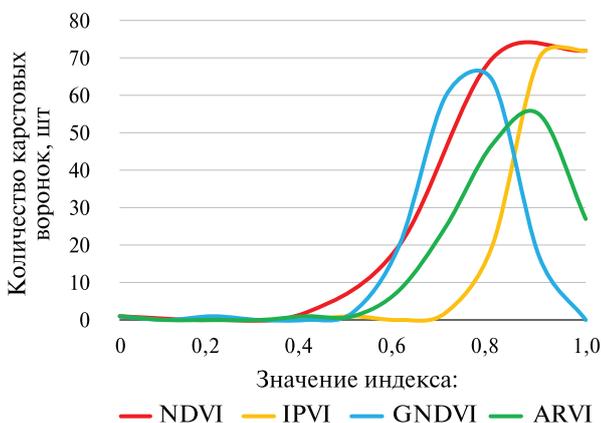


Рис. 3. Кривые распределения карстовых воронок в зависимости от значений вегетационных индексов (космоснимки летнего периода)

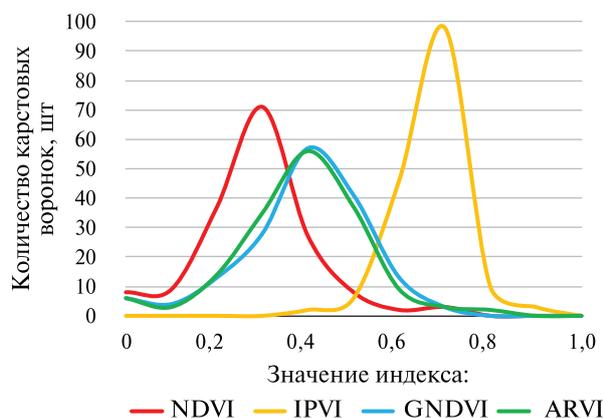


Рис. 4. Кривые распределения карстовых воронок в зависимости от значений вегетационных индексов (космоснимки весеннего периода)

На весенних снимках данная тенденция не прослеживается: в районе распространения воронок индексы близки к фоновым значениям, характерным для изучаемой территории в целом. Исключение составляет IPVI с заметной асимметрией в сторону высоких значений (рис. 4). Характер кривых распределения свидетельствует о том, что в качестве исходных данных рекомендуется использовать снимки летнего периода, на которых воронки с применением вегетационных индексов легко дешифрируются благодаря их основному геоботаническому признаку: развитию кустарниковой растительности на бортах, склонах и на дне.

Оценка поверхностной закарстованности

Для пространственной оценки поверхностной закарстованности в пределах территории распространения луговой растительности предпринята попытка оконтуривания участков, в пределах которых значения индексов совпадают с интервалами, наиболее характерными для карстовых воронок. В качестве примера приведена карта изменения индекса NDVI и выделены потенциально опасные участки со значениями индексов 0,8–1,0 (рис. 5).

В результате пространственного анализа, заключающегося в оценке площадного распространения потенциально опасных участков на основе растровых моделей рассматриваемых вегетационных индексов (NDVI, IPVI, ARVI, GNDVI), построена прогнозная модель (рис. 6, см. с. 86), представляющая собой зонирование территории по степени карстовой опасности. Так, при прочих равных условиях наибольшая опасность характерна для территорий, попавших в четвёртую категорию, — эти участки на всех четырёх растровых моделях вегетационных индексов отнесены к потенциально опасным. Степень карстовой опасности снижается по мере сокращения количества пространственного совпадения потенциально опасных участков отдельных моделей (с 4 до 1).

Для количественной оценки применимости данной методики проведено пространственное соотношение полученных категорий с зарегистрированными карстовыми формами и с точками — центрами потенциально опасных участков, выделенных по результатам расчёта вегетационных индексов (табл. 3).

Согласно табл. 3 можно сделать вывод, что участки совпадения всех четырёх индексов весьма точно характеризуют площади распространения подтверждённых карстовых форм и комплексный учёт вегетационных индексов вполне информативен в оценке поверхностной закарстованности. Таким образом, с учётом количественной оценки применимости расчёта вегетационных индексов при определении поверхностной закарстованности рекомендуется в качестве малоопасной выделить вторую категорию (совпадение по двум индексам), потенциально опасной — третью (совпадение по трём индексам) и опасной — вторую (совпадение по четырём индексам) (см. рис. 5).

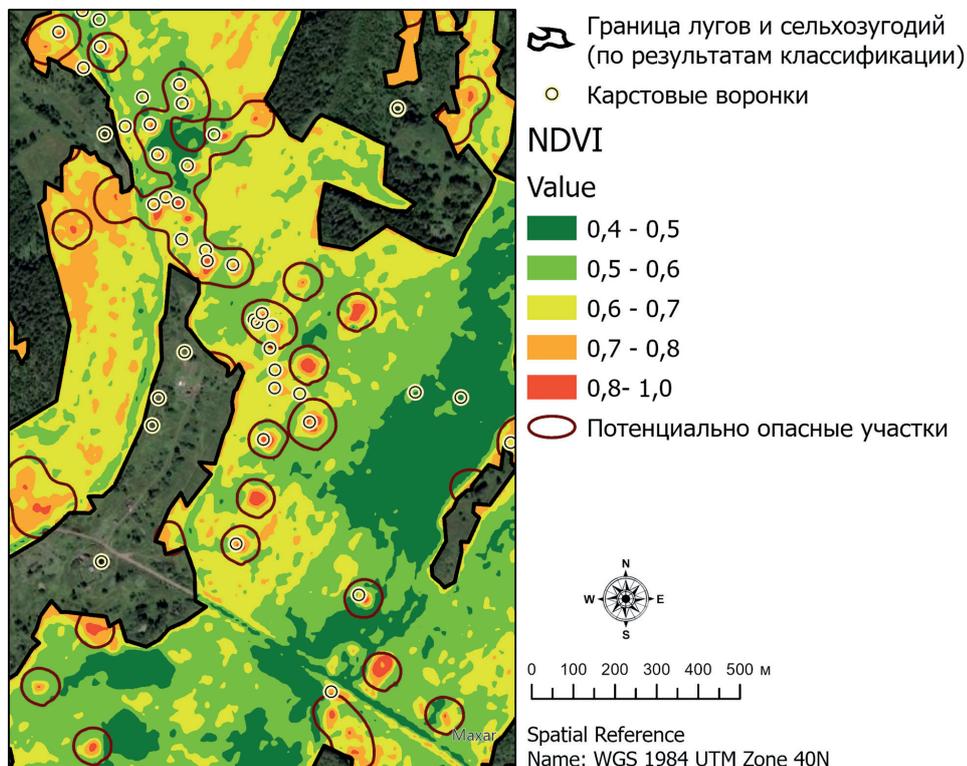


Рис. 5. Результаты расчёта индекса NDVI (фрагмент участка)

Таблица 3. Выводы по количественной оценке применимости методики

Категория карстовой опасности	Количество карстовых форм, шт. (по результатам маршрутного наблюдения)	Количество потенциально-опасных участков, шт. (по результатам расчёта вегетационных индексов)	Совпадения*, %
Не выделена	4	—	—
Первая	9	169	5
Вторая	15	102	15
Третья	19	74	26
Четвёртая	14	18	78

*Расчитан как отношение количества зарегистрированных карстовых воронок в пределах категории к количеству потенциально опасных участков.

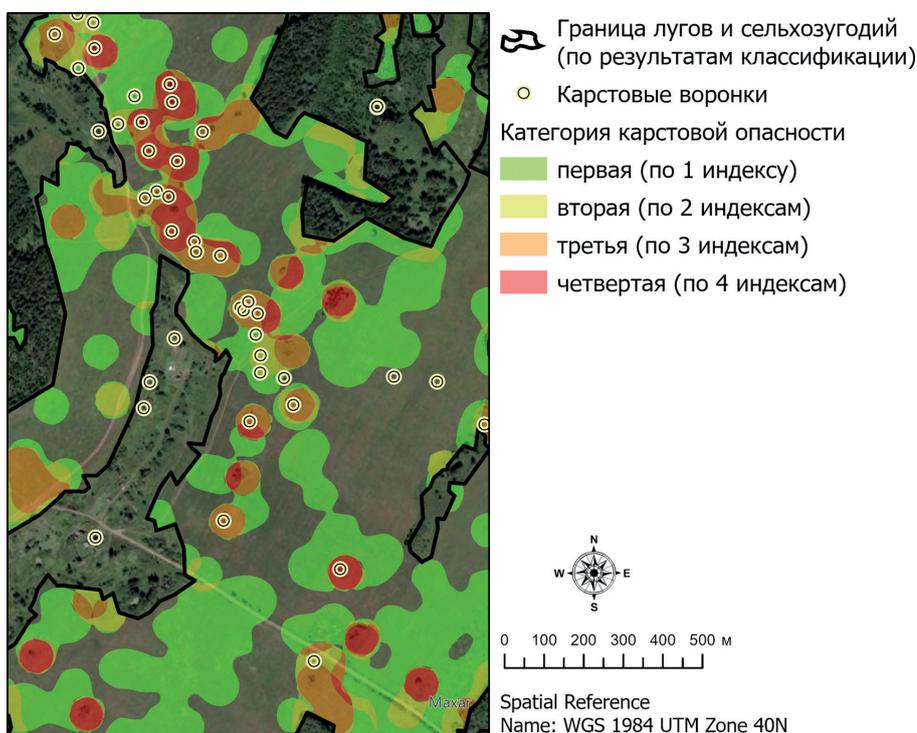


Рис. 6. Результаты расчёта карстовой опасности с использованием вегетационных индексов (фрагмент участка)

Выводы

Детальный анализ данных ДЗЗ с применением платформы GEE и ГИС повышает эффективность и скорость оценки поверхностной закарстованности при проведении инженерно-геологических изысканий в районах развития карста, не требует лишних экономических затрат (данные для анализа находятся в свободном доступе). Следует также отметить относительную простоту и скорость реализации описанного анализа, отсутствие необходимости в хранении большого объёма данных на локальных носителях.

При рассмотрении распределения карстовых воронок в зависимости от вегетационных индексов на летних снимках можно сделать вывод, что карстовые воронки, зафиксированные на изучаемой площади, преимущественно попадают на территорию с высокими значениями индексов — NDVI: 0,8–1,0; IPVI: 0,9–1,0; ARVI: 0,8–0,9; GNDVI: 0,6–0,8. На весенних снимках данная тенденция не прослеживается: в районе распространения воронок индексы близки к фоновым значениям, характерным для изучаемой территории в целом. Исключение со-

ставляет IPVI с заметной асимметрией в сторону высоких значений. Характер кривых распределения свидетельствует о том, что в качестве исходных данных рекомендуется использовать снимки летнего периода, на которых воронки с применением вегетационных индексов легко дешифрируются благодаря их основному геоботаническому признаку — развитию кустарниковой растительности на бортах, склонах и на дне.

В качестве ограничения предложенного метода стоит отметить, что результаты оценки карстовой опасности могут зависеть от особенностей увлажнения территории в конкретный сезон. Снимки территории в засушливый год (как, например, использованные в анализе снимки лета 2021 г.) позволяют успешнее выявлять аномалии вегетационных индексов, связанные с карстовыми формами, тогда как при использовании снимков дождливого сезона аномалии вегетационных индексов могут быть менее контрастными.

Литература

1. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н. Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Пермский гос. ун-т, 1992. 200 с.
2. Золотарев Д. Р. Результаты линеamentного анализа на закарстованных территориях Пермского края // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. 9 с. <https://science-education.ru/article/view?id=7233> (дата обращения: 04.10.2022).
3. Золотарев Д. Р., Катаев В. Н. Воздействие линеamentной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // Геориск. 2013. № 1. С. 34–43.
4. Золотарев Д. Р., Катаев В. Н., Щербаков С. В. Соотношение закарстованности и линеamentов в пределах Полазненского локального поднятия // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы юбилейной научно-практич. конф., посвященной 80-летию геол. факультета и 95-летию Пермского ун-та. Пермь, 2011. С. 153–155.
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 учетом глобального изменения климата «Геориск-2018». Материалы 10-й Международ. научно-практич. конф. В 2 т. Т. 1 / 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. Alexander S. C., Rahimi M., Larson E., Bomberger C., Greenwaldt B., Alexander Jr. E. C. Combining LiDAR, aerial photography and pictometric tools for karst features database management // NCKRI Symp. 2: Proc. 13th Multidisciplinary Conf. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst / eds. Land L., Doctor D. H., Stephenson J. B. Carlsbad, New Mexico, 2013. P. 441–448.
8. Bruning J., Gierke J., Maclean A. An Approach to Lineament Analysis for Groundwater Exploration in Nicaragua // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2011. No. 77(5). P. 509–519. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.5.509>.
9. Crippen R. E. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71–73. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
10. de Carvalho Jr. O. A., Guimarães R. F., Montgomery D. R., Gillespie A. R., Gomes R. A. T., de Souza Martins É., 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. P. 330–351. DOI: 10.3390/rs6010330.
11. Gao B.-C. NDWI — A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space // Remote Sensing of Environment. 1996. No. 58(3). P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
12. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
13. Hofierkaa J., Gallaya M., Bandurab P., Šašaka J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis // Geomorphology. 2018. V. 308. P. 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>.

14. Jin S., Sader S. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances // *Remote Sensing of Environment*. 2005. No. 94. P. 364–372. DOI: 10.1016/j.rse.2004.10.012.
15. Kaufman Y.J., Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. N.Y., 1992. V. 30. Iss. 2. P. 261–270. DOI: 10.1109/36.134076.
16. Luman D.E., Panno S.V. Mapping palimpsest karst features on the Illinois sinkhole plain using historical aerial photography // *Carbonates and Evaporites*. 2013. No. 28. P. 201–214. <http://dx.doi.org/10.1007/s13146-012-0107-4>.
17. Meijerink A., Bannert D., Batelaan O., Lubczynski M., Pointet T. *Remote Sensing Applications to Groundwater*. Paris, France, 2007. 304 p.
18. Panno S.V., Weibe C.P., Li W. *Karst regions of Illinois: Illinois State Geological Survey. Open File Ser. 1997-2*. 1996. 90 p.
19. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 Symp. (ERTS-1)*. 1974. V. 1. P. 48–62.
20. Shaban A., Khawlie M., Abdallah C. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon // *Hydrogeology J.* 2006. No. 14. P. 433–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>.
21. Siart C., Bubenzler 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. No. 112(1). P. 106–121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.05.010.
22. Susantoro T.M., Wikantika K., Saepuloh A., Harsolumakso A.H. Selection of vegetation indices for mapping the sugarcane condition around the oil and gas field of North West Java Basin, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2018. 149 p. DOI: 10.1088/1755-1315/149/1/012001.
23. Valjavec M.B., Ciglič R., Oštir K., Ribeiro D. Modelling habitats in karst landscape by integrating remote sensing and topography data // *Open Geosciences*. 2018. No. 10. P. 137–156. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0011>.

Automation of surface karst assessment using Sentinel-2 satellite imagery

E. V. Drobina

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

The article demonstrates the advantages of a detailed analysis of remote sensing data for karstological purposes using the Google Earth Engine cloud platform and geographic information systems. The karst area within the Kishert gypsum and carbonate gypsum karst development area in Perm Krai was chosen as the study area. The article demonstrates the application of space imagery classification with learning. The purpose of imagery classification is automatic zoning of the territory by type of land cover: meadows and croplands, forests, urbanized areas. Within meadows and croplands calculation of vegetation indices has been carried out in order to delineate potentially karst hazardous areas. The idea of using vegetation indices in assessing surface karst is based on the geobotanical properties of sinkholes in the study area. The relatively high values of vegetation indices within sinkholes reflect the fact that the sides, slopes and bottoms of sinkholes are covered with shrubby, moisture-loving vegetation. This vegetation is interpreted successfully by vegetation indices calculation under these conditions. Based on the spatial analysis of the distribution of potentially hazardous areas, a predictive model, zoning of the study area according to the degree of karst hazard, was built. As a result of the quantitative assessment of the methodology applicability, we can conclude that the areas of coincidence of all four vegetation indices very accurately characterize the karst forms distribution, so the comprehensive research of the vegetation indices is very informative in assessing of the surface karst distribution.

Keywords: remote sensing data, Google Earth Engine, vegetation indices, geotechnical surveys, surface karst, karst massif, karst hazard

Accepted: 28.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90

References

1. Gorbunova K. A., Andreichuk V. N., Kostarev V. P., Maksimovich N. G., *Karst i peshchery Permskoi oblasti* (Karst and caves of the Perm region), Perm: PSU, 1992, 200 p. (in Russian).
2. Zolotarev D. R., The Results of Lineament Analysis on the Karst Areas of Perm Territory, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, No. 5, 9 p. (in Russian), <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7233>.
3. Zolotarev D. R., Kataev V. N., Lineament tectonic influence on development of karst processes at the local level, *Georisk*, 2013, No. 1, pp. 34–43 (in Russian).
4. Zolotarev D. R., Kataev V. N., Shcherbakov S. V., Correlation between karst and lineaments within the Polaznensky local uplift, *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala* (Geology and minerals of the Western Urals), Proc. Scientific-Practical Conf. Dedicated to the 80th Anniversary of Faculty of Geology and the 95th Anniversary of Perm University, Perm, 2011, pp. 153–155 (in Russian).
5. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Geoecological assessment of the probability of activation of karst processes based on digital relief modeling, *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi 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. 10th Intern. Scientific-Practical Conf., 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, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, Ser. "Estestvennye Nauki"*, 2021, Vol. 163, No. 2, pp. 302–319 (in Russian), DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
7. Alexander S. C., Rahimi M., Larson E., Bomberger C., Greenwaldt B., Alexander Jr. E. C., Combining LiDAR, aerial photography and pictometric tools for karst features database management, *NCKRI Symp. 2, Proc. 13th Multidisciplinary Conf. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Land L., Doctor D. H., Stephenson J. B. (eds.), Carlsbad, New Mexico, 2013, p. 441–448.
8. Bruning J., Gierke J., Maclean A., An Approach to Lineament Analysis for Groundwater Exploration in Nicaragua, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, No. 77(5), pp. 509–519, <https://doi.org/10.14358/PERS.77.5.509>.
9. Crippen R. E., Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, pp. 71–73, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
10. de Carvalho Jr. O. A., Guimarães R. F., Montgomery D. R., Gillespie A. R., Gomes R. A. T., de Souza Martins É., 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, pp. 330–351, DOI: 10.3390/rs6010330.
11. Gao B.-C., NDWI — A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, No. 58(3), pp. 257–266, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
12. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
13. Hofierkaa J., Gallaya M., Bandurab P., Šašaka J., Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis, *Geomorphology*, Vol. 308, 2018, pp. 265–277, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>.
14. Jin S., Sader S., Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances, *Remote Sensing of Environment*, 2005, No. 94, pp. 364–372, DOI: 10.1016/j.rse.2004.10.012.
15. Kaufman Y. J., Tanre D., Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, New York, 1992, Vol. 30, Issue 2, pp. 261–270, DOI: 10.1109/36.134076.
16. Luman D. E., Panno S. V., Mapping palimpsest karst features on the Illinois sinkhole plain using historical aerial photography, *Carbonates and Evaporites*, 2013, No. 28, pp. 201–214, <http://dx.doi.org/10.1007/s13146-012-0107-4>.

17. Meijerink A., Bannert D., Batelaan O., Lubczynski M., Pointet T., *Remote Sensing Applications to Groundwater*, Paris, France, 304 p.
18. Panno S. V., Weibel C. P., Li W., *Karst regions of Illinois: Illinois State Geological Survey, Open File Ser. 1997-2, 1996*, 90 p.
19. Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W., Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 Symp. (ERTS-1)*, 1974, Vol. 1, pp. 48–62.
20. Shaban A., Khawlie M., Abdallah C., Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeology J.*, 2006, No. 14, pp. 433–443, <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>.
21. 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, No. 112(1), pp. 106–121, DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.05.010.
22. Susantoro T. M., Wikantika K., Saepuloh A., Harsolumakso A. H., *Selection of vegetation indices for mapping the sugarcane condition around the oil and gas field of North West Java Basin, Indonesia*, IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, 2018, 149 p., DOI: 10.1088/1755-1315/149/1/012001.
23. Valjavec M. B., Ciglič R., Oštir K., Ribeiro D., Modelling habitats in karst landscape by integrating remote sensing and topography data, *Open Geosciences*, 2018, No. 10, pp. 137–156, <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0011>.