

К вопросу оптимизации принятия проектных решений на закарстованных территориях с использованием ДЗЗ и ГИС

Е. В. Дробинина¹, М. А. Китаева¹, Е. Р. Романова^{2,3}, И. Г. Ермолович¹

¹ *Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: alenadrobina@yandex.ru*

² *Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН
Москва, 109004, Россия*

³ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Россия*

Работа посвящена вопросу комплексной оценки карстовой опасности на территории прохождения линейных сооружений с использованием данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) для оптимизации принятия проектных решений. Методический подход основан на анализе данных ДЗЗ с применением инструментария современных геоинформационных систем (ГИС). По данным ДЗЗ построена «стоимостная» поверхность, описывающая сложность пересечения и освоения изучаемой закарстованной местности и учитывающая поверхностную закарстованность, тип местности, уклон поверхности, расстояние от элементов овражно-балочной сети и карстовых форм. Для работы задействованы данные цифровой модели рельефа Forest And Buildings removed Copernicus 30m Digital Elevation Model (FABDEM) и космические снимки высокого разрешения. Результатом использования предлагаемой методики стало построение оптимального варианта расположения линейного сооружения, при котором его эксплуатация на изучаемой территории будет сопряжена с минимальными рисками. Предлагаемый подход отличается адаптивностью, доступностью, не требует большого времени на реализацию, и при этом позволяет снизить риски увеличения объема инженерно-геологических изысканий из-за возможного изменения генплана.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, цифровая модель рельефа, карст, «стоимостная» поверхность, кластеризация, геоинформационные системы

Одобрена к печати: 16.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-149-157

Введение

Освоение территорий, в пределах которых развиты проявления опасных геологических процессов, весьма трудоёмко. Зачастую при проведении инженерных изысканий возникает необходимость в специализированных исследованиях по оценке степени опасности того или иного процесса, на основании которых даже вносятся изменения в генеральный план проектируемых сооружений. Всё это обычно выливается в дополнительные финансовые и временные затраты. Однако современные методы анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют в короткие сроки и с высокой степенью достоверности делать предварительные заключения в отношении опасных геологических процессов, развитых на площадке изысканий, и хорошо дешифрируемых на космических изображениях. Преимуществом применения данных ДЗЗ является получение информации на расстоянии, в том числе за различные временные периоды, что особенно актуально при проведении изысканий в неблагоприятный период года и при ретроспективном анализе.

В данной работе на примере закарстованного участка освещается возможность оперативного комплексного анализа данных ДЗЗ и их производных с применением геоинформационных систем (ГИС) для выбора оптимального участка размещения линейного сооружения.

Исследуемая территория

В качестве изучаемой выбрана закарстованная территория вблизи деревни Пивоварово во Владимирской области, на которой планировалось строительство линейного сооружения. Широкое развитие проявлений карстового процесса на участке проектирования объекта изначально либо не было учтено, либо было учтено опосредовано, что, в свою очередь, привело к изменению проекта и поиску пути обхода участка концентрированного скопления карстовых форм.

Описанный участок расположен в Вязниковском районе, в 8 км северо-западнее населённого пункта Николгоры. Наибольшая плотность карстовых форм отмечается на так называемом Пивоваровском карстовом участке, расположенном к востоку от одноимённой деревни (рис. 1).

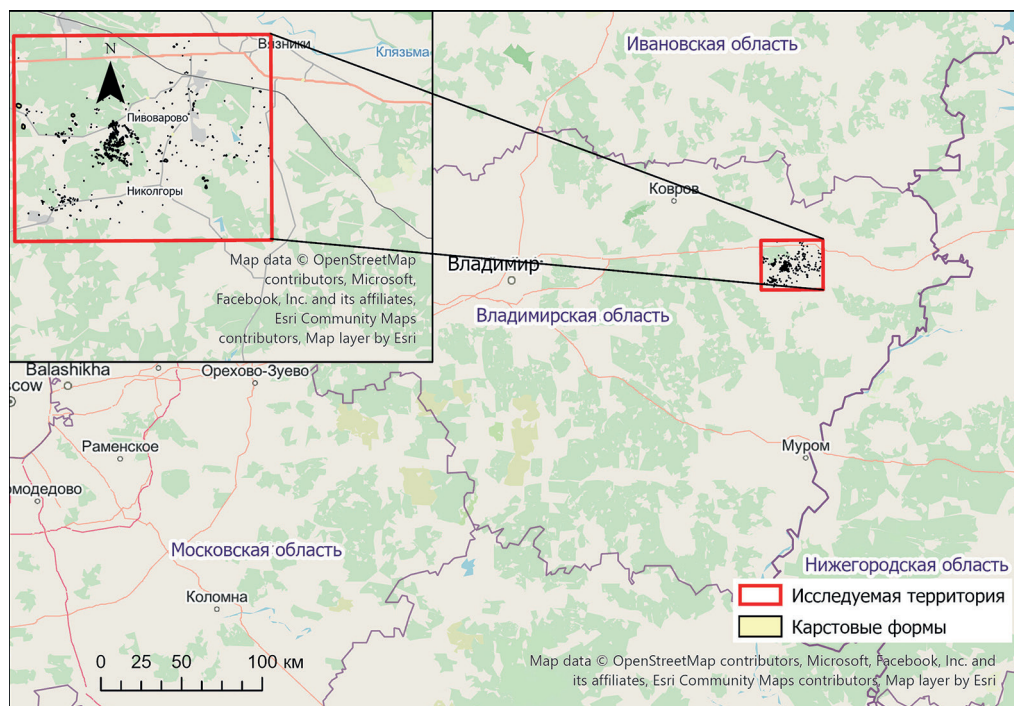


Рис. 1. Схема расположения участка работ

Карстовый процесс развивается преимущественно в сульфатных отложениях пермского возраста, перекрытых не выдержанной по мощности толщей уржумских глин и комплексом четвертичных терригенных отложений различных генетических типов, также различных по мощности (Дробинина, Китаева, 2024; Ковалёва, Каменских, 2019; Макарова и др., 2012). На поверхности карст проявляется в виде провалов, карстовых воронок, озёрных котловин больших диаметров и глубин. В основном воронки являются разновозрастными карстово-обвальными — сформировавшимися в результате обрушения свода карстовой полости в момент, когда массив потерял устойчивость. Это преимущественно круглые хорошо дешифрируемые на космических изображениях формы; для древних карстовых воронок диаметр изменяется в пределах от 5,1 до 97,4 м при среднем значении 25,5 м, для молодых — от 2,5 до 61,5 м, при среднем значении — 18,9 м, глубина составляет 1,0–15,0 м у древних форм, 0,5–20,0 м — у молодых.

Высокое содержание песков в перекрывающей толще выражается в развитии суффозионного процесса наряду с карстовым. Их парагенезис находит своё отражение в формировании форм карстово-суффозионной природы. Воронки карстово-суффозионные также в большинстве обладают неплохой дешифрируемостью в силу своего размера и формы: средний диа-

метр древних карстово-суффозионных форм изменяется в пределах 2,5–60,1 м (при среднем значении 14,2 м), молодых — 2,5–12,0 м (при среднем значении 4,6 м), глубина составляет 0,2–4,5 м и 0,5–3,0 м у древних и молодых форм соответственно. Размер таких форм связан с аккумулятивной ёмкостью трещинно-полостного пространства карстового массива, являющегося приёмником дисперсного материала, которая, в свою очередь, определяется не только величиной полостей и шириной раскрытия трещин, но и характером сообщения отдельных элементов ослабления между собой.

Воронки суффозионные, образованные в результате выноса суффозионно-неустойчивых грунтов в трещины в уржумских глинах, дешифрируются хуже всего в силу своих маленьких размеров как по простиранию, так и в глубину. Тем не менее, данный недостаток на стадии предварительной оценки компенсируется относительно низкой степенью опасности таких постепенно образующихся форм по сравнению с образующимися спонтанно карстово-обвальными формами, процесс подготовки которых скрыт от непосредственного наблюдения.

Методика исследования

Методически подход к поиску оптимального расположения линейного сооружения на закарстованном участке базируется на применении современных инструментов пространственного анализа, позволяющих с учётом комплекса факторов строить «стоимостную» поверхность, представляющую собой зонирование территории по сложности её пересечения объектом, и на основе этой поверхности прокладывать оптимальный путь, следование которому будет сопряжено с минимальными для данной территории затратами.

Стоимостную поверхность не стоит путать со стоимостной инженерно-геологической или инженерно-геокриологической картами, которые отражают геолого-экономическое районирование. Например, стоимостная инженерно-геокриологическая карта для случая застройки территории в районе Воркуты пятиэтажными жилыми зданиями характеризует участки определённого сочетания природных условий, для которых посчитана суммарная приведённая стоимость нулевого цикла здания, включающая начальную стоимость и цену риска, связанного с опасностью эксплуатации сооружений в условиях развития опасных геологических процессов. Разработанная методика позволяет количественно оценить потери от возможных геокриологических опасностей на осваиваемых территориях и добиваться наилучших инженерных решений при строительстве (Бондарик, Ярг, 2018). Здесь стоимостная поверхность не характеризует напрямую стоимость строительства в карстовых районах, она является оценочной, позволяющей судить о сложности освоения территории с учётом опасности проявлений карстового процесса. Причём для оценки предлагается использование данных дистанционного зондирования как доступных в оперативном режиме до начала изысканий.

Сначала с использованием данных ДЗЗ — детальных космических снимков, например World Imagery, — дешифрируются карстовые формы. Закарстованные участки, представляющие собой особый вид ландшафта, достаточно легко дешифрируются даже на мелкомасштабных изображениях, однако для поиска единичных форм рекомендуется использовать космоснимки высокого разрешения. Набор дешифровочных признаков, типичных для проявлений данного процесса, определён давно и детально описан, например, в работах (Антипов и др., 2016; Шихов и др., 2020). В качестве карстовых форм в условиях исследуемой территории выделяются характерного округлого вида впадины различного размера, иногда заполненные водой, покрытые растительностью, неупорядоченно расположенные, иногда группами.

Затем с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) FABDEM (*англ.* Forest And Buildings removed Copernicus DEM) разрешением 30 м (Hawker et al., 2022), в основе которой лежит цифровая модель рельефа Copernicus DEM, на которой удалены артефакты зданий и лесов, строятся растровые поверхности уклона местности, удалённости от овражно-балочной сети и сети водотоков.

Слой уклонов описывает крутизну в каждой ячейке растровой поверхности, показателя, который напрямую влияет на сложность пересечения местности. Слой водотоков, полученный с применением инструментов гидрологического прогноза, также позволяет оценить сложность освоения территории. Ещё двумя производными ЦМР являются здесь удалённость от водотоков и карстовых форм, рассчитанная как расстояния по прямой от линий и полигонов — эвклидово расстояние. Плотность карстовых форм определена как количество дешифрованных форм на единицу площади.

Дополнительным набором входных данных послужила модель типов местности — мировая модель растительного покрова Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA) ESA WorldCover 10 m 2021, представляющая собой глобальную карту почвенно-растительного покрова на 2021 г. с разрешением 10 м на основе данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 (Zanaga et al., 2022). В силу глобального характера существует некоторая вероятность ошибки в типизации местности. Рядом авторов отмечаются значительные различия, обнаруженные в некоторых классах растительного покрова, что требует применения методик проверки на основе некоторых эталонных данных. Это касается, в первую очередь, специфических для территорий типов ландшафтов (Duarte et al., 2023). Для выбранной авторами территории в целях исследования данная модель подойдёт, однако для повышения точности результата рекомендуется корректировка модели посредством уточнения по эталонным данным или типизации конкретной местности с использованием методов машинного обучения (Дробинина, Пенкин, 2023).

Стоимостная поверхность представляет собой растровую модель, которая определяет сложность перемещения через каждую ячейку. Эта поверхность представлена одним набором данных, который, однако, может использоваться для представления нескольких критериев. В данном случае в виде критериев выступили:

- 1) тип местности как определяющий сложность освоения в период строительства и транспортную доступность в периоды строительства и эксплуатации;
- 2) уклон поверхности как влияющий на инфильтрацию пресных атмосферных вод в карстовый массив;
- 3) расстояние от овражно-балочной сети и водотоков как определяющее область движения подземных вод по массиву в направлении к области разгрузки;
- 4) расстояние от карстовых форм и плотность карстовых форм как описывающие характер поверхностной закарстованности массива.

Каждый из этих наборов данных имеет свои единицы измерения, и напрямую их сравнивать нельзя: нужно предварительно переклассифицировать — привести к единой размерности посредством перевода реальных единиц измерения в балльные. Переклассификация производится на основании экспертного определения вклада фактора в оценку сложности освоения территории. В качестве метода классификации выбран метод геометрических интервалов. Критерии для присвоения баллов для каждой поверхности представлены ниже:

- 1) для модели типов местности максимальная стоимость присваивалась лесным массивам, далее по мере снижения — застроенным территориям, болотам, пашням, лугам;
- 2) для модели уклонов: максимальная — высоким значениям, как сложным в отношении пересечения местности, затем малым, как наиболее благоприятным в отношении карстового процесса, так как там существуют все условия для инфильтрации поверхностных вод и их движения к области разгрузки, и затем — ровным поверхностям;
- 3) для модели расстояний от водотоков и элементов овражно-балочной сети, а также карстовых форм, стоимость уменьшалась по мере удаления от них.

В данном исследовании все выбранные поверхности приняты условно равнозначными, однако при необходимости можно проводить взвешивание наборов данных в соответствии с их долевым влиянием на сложность освоения территории. После переклассификации необходимо провести комбинирование переклассифицированных наборов данных посредством сложения поверхностей.

С использованием намеченных критериев создаётся оптимальный путь по изучаемому закарстованному участку между двумя точками (<https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/connect-locations-with-optimal-paths.htm>). Для построения оптимального пути сначала получаются два растра: накопления расстояния и обратного расстояния, которые в дальнейшем используются в качестве входных параметров для построения вектора, описывающего оптимальный путь. Полигональные воронкообразные формы дополнительно указываются в качестве барьеров, причём группы карстовых воронок объединяются в поля с использованием кластерного подхода — алгоритма DBSCAN (*англ.* Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума).

Авторами предлагается идея кластеризации карстовых воронок для выделения карстовых полей. В задачи кластеризации входит разбиение множества объектов на однородные группы (кластеры), состоящие из похожих друг на друга объектов, так как карстовые воронки зачастую группируются в карстовые поля, под которыми подразумеваются участки, покрытые воронками, границы которых определяют произвольно или путём нахождения минимальных обобщающих радиусов. Площадь таких полей обычно не превышает 2 км² (Горбунова и др., 1992). Группировка карстовых воронок в поля связана с общностью геологических условий их образования и существования и, следовательно, выделение карстовых полей как групп объектов, имеющих общие свойства «кластеров», вполне обосновано.

Кластерному анализу в силу его преимуществ в изучении многофакторных величин давно отведено особое место (Гитис, 2003), а с появлением современного инструментария его применение на практике стало ещё проще. В геологии примеры его использования освещаются в работах по исследованию литохимического состава пород (Ткачев, 2019; Ткаченко, Карелина, 2023), однако для проявлений такого многофакторного процесса, как карстовый, использование кластеризации вполне обосновано.

Алгоритм DBSCAN выбран по причине того, что при его использовании нет необходимости указывать количество кластеров, которое изначально неизвестно, однако нужно указать минимальное количество объектов в кластере и максимальное расстояние между объектами одного кластера, которое, следует заметить, является важным фактором анализа. В данной работе максимальное расстояние между объектами выбрано экспериментально — 300 м. Такое пороговое значение определено с использованием гистограммы распределения расстояний между ближайшими дешифрованными карстовыми формами (*рис. 2*). Гистограмма демонстрирует логнормальный характер распределения, вполне характерный для территорий с широким развитием карстовых полей. Так как чётких критериев для выделения нескольких форм в карстовое поле нет, минимальное количество объектов в кластере выбрано равным пяти.

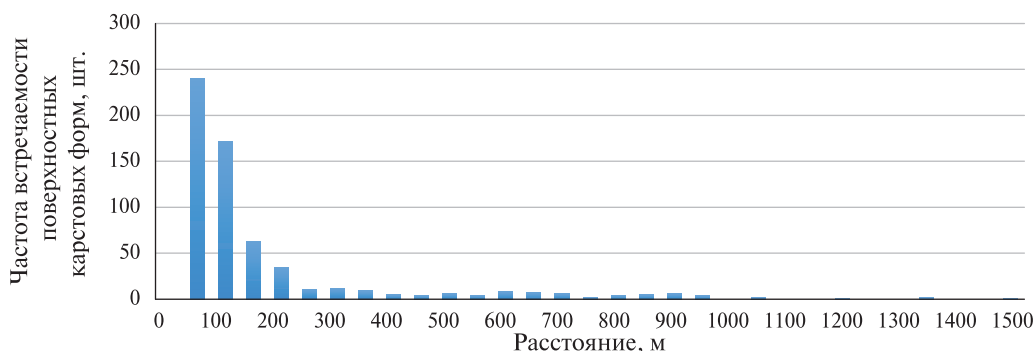


Рис. 2. Гистограмма распределения форм по расстоянию между соседними

Результатом работы алгоритма DBSCAN является разбиение всего набора карстовых форм на кластеры. Те формы, что находятся за пределами граничных условий работы алгоритма,

в кластеры не включаются. Для того чтобы оконтурить каждый кластер (карстовое поле) использована минимальная вогнутая поверхность (Пугачев, 2023), создающая полигональный слой в виде невыпуклого многоугольника, ограничивающего точки каждого кластера. Использование вогнутой, а не выпуклой поверхности позволяет точнее оконтурить кластеры. Так как кластеризация велась по точечным данным, все построенные полигоны были скорректированы таким образом, чтобы крайние для всех полей карстовые формы оказались внутри контура.

Сам слой барьеров, использованный в построении оптимального пути, — это результат объединения карстовых полей, отдельных карстовых форм и крупных водотоков, протекающих на изучаемой территории. Описанный выше подход использования в качестве барьеров карстовых полей как кластеров позволит исключить из оптимального пути территории в пределах полей как потенциально опасные участки ещё не реализованной карстовой опасности в непосредственной близости к существующим карстовым воронкам. Включение в слой барьеров водотоков сделает возможным построение оптимального пути таким образом, чтобы избежать появления лишних переходов через водные преграды, весьма удорожающих проектные решения.

Результаты и обсуждения

Процесс построения оптимального пути реализован с применением пространственного анализа в ГИС. Стоимостная поверхность — комбинация факторных моделей — де-факто представляет собой карту карстовой опасности, построенную в баллах, с учётом того, что авто-рами добавлены также критерии, определяющие степень доступности территории (тип местности, уклон, водотоки) (рис. 3).

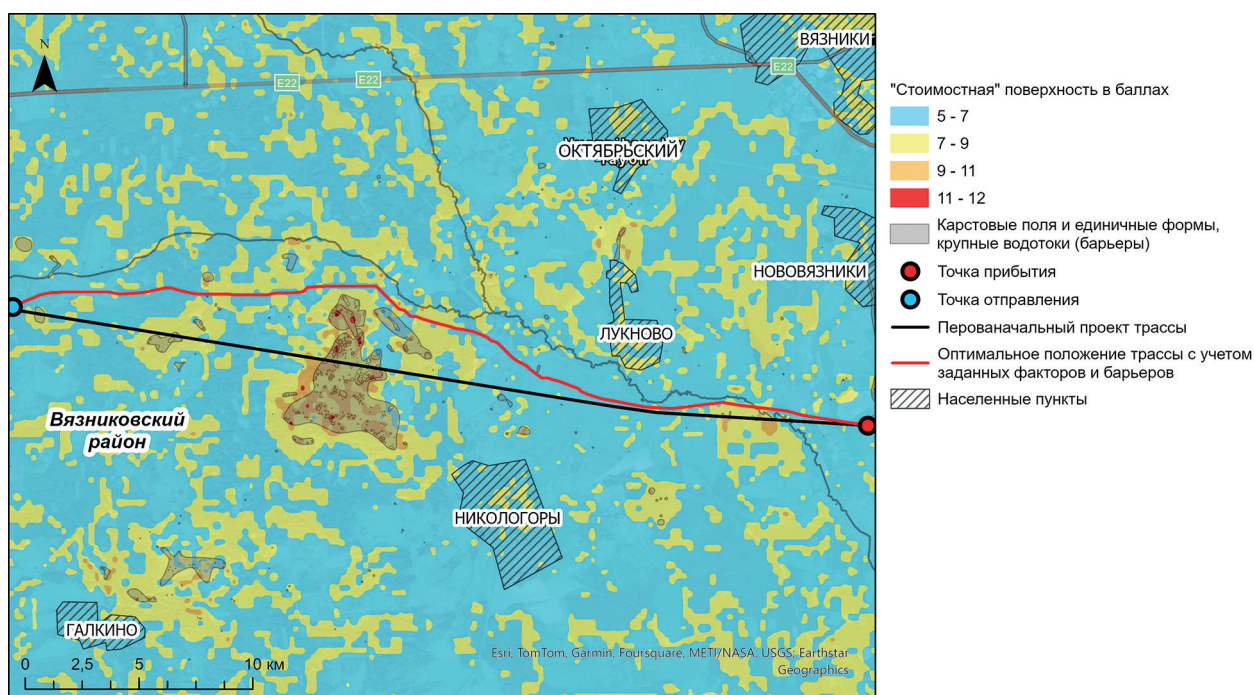


Рис. 3. Результат построения оптимального пути для линейного сооружения

С использованием стоимостной поверхности и слоя барьеров в ГИС в кратчайшие сроки рассчитывается наиболее оптимальное перемещение из пункта отправления в пункт назначения по территории, максимально удовлетворяющей условиям безопасной эксплуатации сооружения на закарстованной территории.

Результатом является линейный объект, расположенный в наиболее благоприятных условиях. Если посмотреть на *рис. 3*, то видно, что самое первое проектное расположение практически не учитывает факторы, осложняющие освоение территории. Данный подход позволил за короткий промежуток времени с использованием данных дистанционного зондирования получить то расположение, которое эти факторы учитывает.

Описанная методика весьма гибкая: при должном обосновании в стоимостную поверхность можно включить другие факторы, наличие которых на данной территории также может оказать существенное влияние на принятие проектных решений. Слой барьеров также может быть расширен, если необходимо какие-то территории обойти по той или иной причине, например особо охраняемые природные территории и т. п.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Построение «стоимостной» поверхности в балльной системе позволяет выполнить комплексную оценку влияния различных факторов, которые напрямую сравнивать нельзя из-за различных единиц измерения.
2. Кластеризация карстовых форм посредством алгоритма DBSCAN позволяет оконтурить карстовые поля как территории повышенного скопления карстовых форм и участки ещё не реализованной карстовой опасности в непосредственной близости к ним.
3. Используемая методика характеризуется высокой адаптивностью: набор факторов можно изменить или расширить в зависимости от запроса, от инженерно-геологических условий исследуемого участка, класс барьеров также отличается гибкостью — возможно его расширение с целью исключения территорий, которые нужно обойти.
4. Преимуществом подхода является доступность качественных исходных данных ДЗЗ и оперативность их получения.
5. Применение данной методики на стадии планирования позволит по заданному пользователем входному набору данных выбрать в короткие сроки наиболее подходящее расположение площадки под объект на участке развития опасных геологических процессов.
6. Предлагаемый подход позволит минимизировать риски увеличения объёма инженерно-геологических изысканий из-за возможного переноса площадки в связи с не учтёнными на этапе планирования работ факторами, а также повысить безопасность эксплуатации сооружения.

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

Литература

1. Антипов В. С., Волин К. А., Журавлев Е. А. Выявление карстовых и сульфидно-карстовых объектов по материалам космических съемок в центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016. Вып. 4. С. 4–16. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.401.
2. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Инженерно-геологические изыскания: учеб. пособие, электрон. изд. сетевого распространения. М.: КДУ, Добросвет, 2018. <https://bookonlime.ru/node/563/>.
3. Дробинина Е. В., Китаева М. А. Изучение инженерно-геологических процессов на закарстованных территориях с применением данных дистанционного зондирования Земли // Карст и пещеры. 2024: сб. науч. тр. (по материалам Всероссийской научно-практ. конф. с международ. участием. 28 мая – 1 июня 2024 г.). Пермь, 2024. С. 64–70.
4. Дробинина Е. В., Пенкин К. А. Сравнение методов классификации спутниковых изображений в решении вопросов установления границ земель различного назначения // 12-я Международ.

- научно-практ. конф. «Актуальные вопросы геодезии и геоинформ. систем». 31 августа – 1 сентября 2023 года. Программа, тезисы и доклады. 2023. С. 22–25.
5. Гитис Л. Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. М.: Горная книга (МГГУ), 2003. 157 с.
 6. 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.
 7. Ковалёва Т. Г., Каменских К. С. К оценке карстоопасности Пивоваровского карстового участка // Всероссийская научно-практ. конф. «Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и эколог. безопасности»: сб. ст. Оренбург, 2019. С. 17–19.
 8. Макарова Н. В., Макеев В. М., Суханова Т. В., Микляев П. С., Дорожко А. Л., Коробова И. В. Новейшая тектоника и геодинамика Нижнеокского района (Русская плита) // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 3–11.
 9. Пугачев А. И. Алгоритм построения вогнутой оболочки множества точек // Международ. журн. гуманитарных и естественных наук. 2023. № 4–3(79). С. 109–113. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-4-3-109-113.
 10. Ткачев Ю. А. Основания многомерного кластерного анализа в геологии // Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 2(290). С. 44–52. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-44-52.
 11. Ткаченко М. А., Карелина Е. В. Кластерный анализ как метод выявления потенциального хромитового оруденения в пределах Войкаро-Сыньинского массива // Международ. научно-исследоват. журн. 2023. № 10(136). 7 с. DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.63.
 12. Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь, 2020. 191 с.
 13. Duarte D., Fonte C., Costa H., Caetano M. Thematic comparison between ESA WorldCover 2020 Land Cover product and a national land use land cover map // Land. 2023. V. 12(2). Article 490. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12020490>.
 14. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research. 2022. No. 17. Article 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
 15. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>.

On the issue of optimizing the adoption of design schemas in karst areas using remote sensing and GIS

E. V. Drobiniina¹, M. A. Kitaeva¹, E. R. Romanova^{2,3}, I. G. Ermolovich¹

¹ Perm State University, Perm 614990, Russia
E-mail: alenadrobiniina@yandex.ru

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow 109004, Russia

³ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow 129337, Russia

The paper is devoted to the Issue of integrated assessment of karst hazard in the area of linear structures using remote sensing data (RS) to optimize design scheme. The methodological approach is based on the analysis of RS data using the tools of modern geographic information systems. A “cost” surface raster is constructed using RS data. The cost surface describes the complexity of crossing and development of the studied karsted terrain and takes into account surface karst, terrain type, surface slope, distance from the elements of gully network and karst forms. Forest and Buildings removed Copernicus 30m Digital Elevation Model (FABDEM) and high-resolution space images are used in the work. The result of the proposed methodology is the construction of the most optimal variant of linear structure location, at which its operation in the study area will be associated with minimal risks. The proposed approach is adaptive, accessible, does not require long time for implementation, and at the same time allows reducing the risks of increasing the volume of engineering-geological surveys due to possible changes in the general design scheme.

Keywords: remote sensing, digital elevation model, karst, cost surface, clustering, geoinformation systems

Accepted: 16.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-149-157

References

1. Antipov V. S., Volin K. A., Zhuravlev E. A., Identification of karst and karst-suffosion features on satellite imagery in the central part of East European platform, *Bull. Saint Petersburg University. Ser. 7. Geology. Geography*, 2016, Issue 4, pp. 4–16 (in Russian), DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.401.
2. Bondarik G. K., Yarg L. A., *Engineering and geological surveys: a textbook, an electronic publication of network distribution*, Moscow: KDU, Dobrosvet, 2018 (in Russian), <https://bookonlime.ru/node/563/>.
3. Drobina E. V., Kitaeva M. A., Study of geotechnical processes in karst areas using Earth remote sensing data, *Karst i peshchery. 2024: sbornik nauchnykh trudov (po materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. 28 maya – 1 iyunya 2024 g.* (Karst and caves. 2024: collection of scientific papers (based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. May 28 – June 1, 2024)), Perm, 2024, pp. 64–70 (in Russian).
4. Drobina E. V., Penkin K. A., Comparison of methods of classification of satellite images in solving issues of establishing boundaries of lands for various purposes, *12-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Aktual'nye voprosy geodezii i geoinformatsionnykh sistem". 31 avgusta – 1 sentyabrya 2023 goda. Programma, tezisy i doklady* (12th Intern. Scientific and Practical Conf. "Topical issues of geodesy and geoinformation systems". August 31 – September 1, 2023. The program, abstracts and reports), 2023, pp. 22–25 (in Russian).
5. Gitis L. H., *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasternyi analiz* (Statistical classification and cluster analysis), Moscow: Gornaya kniga (MGGU), 2003, 157 p. (in Russian).
6. Gorbunova K. A., Andreychuk V. N., Kostarev V. P., Maksimovich N. G., *Karst i peshchery Permskoi oblasti* (Karst and caves of the Perm region), Perm: Perm State University, 1992, 200 p. (in Russian).
7. Kovaleva T. G., Kamenskikh K. S., To assess the karst hazard of the Pivovarovsky karst site, *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Regional'nye problemy geologii, geografii, tekhnosfernoi i ekologicheskoi bezopasnosti": sbornik statei* (All-Russian Scientific and Practical Conference "Regional problems of geology, geography, technosphere and environmental safety": Proc.), Orenburg, 2019, pp. 17–19 (in Russian).
8. Makarova N. V., Makeev V. M., Sukhanova T. V., Miklyaev P. S., Dorozhko A. L., Korobova I. V., The newest tectonics and geodynamics of the Nizhneoksky district (Russian plate), *Bull. Moscow University. Ser. 4. Geology*, 2012, No. 4, pp. 3–11 (in Russian).
9. Pugachev A. I., Algorithm for constructing a concave hull of a set of points, *Intern. J. Humanities and Natural Sciences*, 2024, Vol. 4–3 (79), pp. 109–113 (in Russian) DOI:10.24412/2500-1000-2023-4-3-109-113.
10. Tkachev Yu. A., Multivariate cluster analysis in geology, *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 2019, No. 2(290), pp. 44–52 (in Russian), DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-44-52.
11. Tkachenko M. A., Karelina Y. V., A cluster analysis as a method of identifying potential chromite mineralisation within the Voykar-Syninsky massif, *Intern. Research J.*, 2023, No. 10(136), 7 p., (in Russian), DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.63.
12. Shikhov A. N., Gerasimov A. P., Ponomarchuk A. I., Perminova E. S., *Tematicheskoe deshifrirovaniye i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya* (Thematic decoding and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution), Perm, 2020, 191 p. (in Russian).
13. Duarte D., Fonte C., Costa H., Caetano M., Thematic comparison between ESA WorldCover 2020 Land Cover product and a national land use land cover map, *Land*, 2023, Vol. 12(2), Article 490, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12020490>.
14. Hawke L., Uhe P., Paulo L. et al., A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed, *Environmental Research*, 2022, No. 17, Article 024016, DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
15. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al., *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>.