Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 5 / 2023, Vol. 15, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/70NZVN523.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Борейша, Е. В. Сравнительная оценка современных геодезических методов, применимых для мониторинга состояния поверхностных карстовых проявлений / Е. В. Борейша, И. И. Ранов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/70NZVN523.pdf

For citation:
Boreisha E.V., Ranov I.I. Comparative assessment of modern geodetic methods applicable for monitoring the state of surface karst manifestations. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5): 70NZVN523. Available at: https://esj.today/PDF/70NZVN523.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 528.02

Борейша Елена Викторовна
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Преподаватель (аспирант) кафедры «Инженерных изысканий и геоэкологии»
E-mail: elena.boreysha@mail.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=681954

Ранов Игорь Иванович
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: ranov@mail.ru

Сравнительная оценка современных геодезических методов, применимых для мониторинга состояния поверхностных карстовых проявлений

Аннотация. Рассмотрено, как для оценки карстовой опасности на примере объектов, расположенных в Нижегородской области, используются современные высокопроизводительные методы измерений, такие как воздушная фотограмметрическая съемка, наземное лазерное сканировании, а также тахеометрическая съемка цифровым лазерным тахеометром. Отмечено, что съемка провалов шахтного типа невозможна вследствие возникновения виньетирования поля зрения трубы корпусом прибора при ее наклонах вниз на угол более 40 градусов. Описано применение устройства позволяющего избежать появления виньетирования. Показаны результаты съемки поверхности карстового провала электронным тахеометром, квадрокоптером, лазерным сканером. Авторами представлен результат обработки мониторинга поверхностных карстовых проявлений с использованием программ Autodesk Auto CAD Civil 3D, AGISOF PHOTOSCAN, Trimble real works 12.0 м, в качестве результатов измерений показаны формы внутренней поверхности карстового провала путем аппроксимирования поверхности треугольниками, вычислены объемы внутренней поверхности карстовых воронок, построены профили карстовых воронок. Отмечается потеря возможности использования результатов геологического дешифрирования фотоснимков при аппроксимировании поверхностей. Представлена возможность анализа профилей воронок для определения стадии их развития, с целью уточнения временных характеристик появления поверхностных карстовых проявлений. Выполнен анализ эффективности использования современных геодезических методов

мониторинга карстового образования шахтного типа, обозначены преимущества и недостатки каждого рассмотренного метода. Выполнен расчет разрешающей способности фотоснимков на местности с использованием значения высоты съемки и параметров фотокамеры квадрокоптера. Обоснована реальная возможность применения современных геодезических методов мониторинга для определения геометрических параметров карстовых провалов при проведении инженерных изысканий для строительства

Ключевые слова: карстовый провал; геометрические параметры; поверхность; метод; анализ

Введение

Сложность изучения и однозначного прогнозирования пространственно-временного развития покрытого карста можно объяснить трудностью обнаружения и оценки физико-геохимических процессов, происходящих в карстующемся массиве, находящегося под толщей покровного геологического материала. Кроме того, необходимо учитывать большое число меняющихся во времени факторов, влияющих на скорость этих процессов. Первые попытки оценки карстоопасности основывались на качественном учете поверхностных карстовых форм. В дальнейшем при качественной оценке и прогнозе карстоопасности стали уделять внимание геолого-гидрогеологическим условиям развития карста, подземной закарстованности, а также характеру техногенного воздействия на карстовый массив [1].

В настоящее время преобладающими параметрами являются количественные методы оценки карстовой опасности, при этом «прогнозируемые параметры карстовых деформаций определяют расчетом с использованием вероятностно-статистических и (или) аналитических методов, а основным расчетным параметром при проектировании противокарстовой защиты сооружения является расчетный диаметр карстового провала» [2].

Исходными данными для этих расчетов являются полевые материалы инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий. Последние являются источником геометрических параметров существующих поверхностных карстовых проявлений, таких как глубина, диаметр, площадь и объем карстовых воронок, а также ориентировку осей при их вытянутости.

Следует отметить, что многие исследователи считают, что использование вероятностно-статистических и (или) аналитических методов сдерживается из-за недостаточности объективных исходных данных при инженерных изысканиях.

Преодоление этого препятствия связано с использованием высокопроизводительных методов измерений, таких как воздушная и наземная фотограмметрическая съемка и наземное воздушное лазерное сканирование, а также топографическая съемка цифровыми лазерными тахеометрами.

Одним из первых фундаментальных трудов в этом направлении является работа М.Н. Петрусевича по методам геологического дешифрирования аэрофотоснимков[1], а также основополагающая коллективная монография, обобщающая результаты исследований, выполненных институтами академии наук СССР, академий наук союзных республик и рядом других организаций в области разработки методики применения аэрокосмической информации в геологии, затрагивающая вопросы геологического дешифрирования аэрофотоснимков [3].

[1] Петрусевич М.Н. «Аэрометоды при геологических изысканиях» под редакцией проф. А.А. Богданова. Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. Учебное пособие для вузов. Москва. 1961 с. 401.

Оценке степени закарстованности по результатам дешифрирования карстопроявлений по аэрофотоматериалам посвящены две работы В.И. Мартина опубликованные в 1971 и 1972 г. [4; 5].

К сожалению, аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка, для которых в то время было необходимым использование больших самолетов, уникального стереофотограмметрического оборудования и программного обеспечения для больших ЭВМ, а также события, связанные с распадом СССР произошедшие в нашей стране с 80-х по 2000-е годы застопорили исследования в этой области.

Сущность исследования

На сегодняшний день современные методы и средства без контактных измерений геометрических параметров объектов и способы их математической обработки свободны от большинства вышеуказанных недостатков. Они позволяют оперативно определять пространственные координаты и успешно решать такие задачи как определение площадей, объемов, нужного количества объектов, строить профили любых форм рельефа и впоследствии автоматически сравнивать их с расчетными моделируемыми и прогнозируемыми параметрами.

Для иллюстрации этих возможностей представим результаты исследований, проведенных с июля 2018 года по апрель 2023 года, карстового провала вблизи деревни Неледино Нижегородской области произошедшего в июле 2018 г.

Первое измерение (рис. 1).

Рисунок 1. *Измерение геометрических параметров Нелединского провала (используется с разрешения автора[2])*

Измерения проводились при помощи системы блоков, отвеса и рулетки. Как видно из фотографии мерщик находится на безопасном удалении от бровки провала т. к. вследствие разуплотнения грунта на поверхности имелись обвальные трещина на расстоянии 1–1,5 м от обрыва. На рисунке 2 представлена схема провала, построенная по результатам вышеупомянутых промеров, эта схема сопровождается следующим указанием: « *По данным бурения скважин в с. Смирново (абсолютная отметка устья 192 м), расположенном приблизительно в 9 км к юго-западу от участка, и в с. Неледино (абсолютная отметка устья ~170 м) участок имеет следующее (указанное на схеме) геологическое строение*» [6].

[2] Фото выполнено сотрудниками карстовой лаборатории города Дзержинска под руководством В.М. Леоненко.

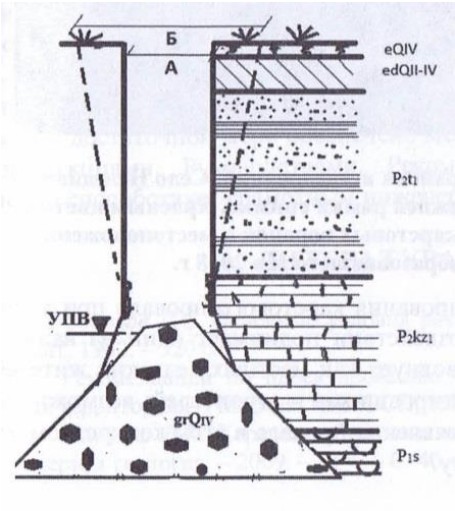


Рисунок 2. *Схематический геологический разрез участка карстового провала [6]*

На фотоснимках (рис. 3) хорошо видно, что толща известняка в кровле (своде, полости) **ПРОЛОМЛЕНА.** Это заключение основывается на анализе геологического строения карстового участка, результатах промеров и на анализе уникальных фотоснимков представленных на рисунке 3. Эти фотоснимки сделаны на глубине 40–45 м подвесной видеокамерой ориентированной в разных направлениях. При этом впервые получены фотоснимки внутренней поверхности карстовой полости, являющейся конусом с отрицательным углом наклона (*используемый с разрешения автора).* По результатам их дешифрирования получены приведенные выше заключения о строении карстующейся толщи и характере ее разрушения.

Рисунок 3. *Снимки внутренней полости обрушения известняков с обратными уклонами конусной поверхности*[3]

Анализируя представленные материалы изучения Нелединского карстового провала надо отметить следующее:

- сотрудниками «Дзержинской карстовой лаборатории», несмотря на опасность нахождения в зоне обрушения бровки провала, получены геометрические характеристики: диаметр верхней бровки, диаметр горловины полости разрушения известкового свода и его глубину, а также глубину залегания обрушенного материала, что позволило ориентировочно вычислить объем обрушившейся породы;

[3] Фото выполнено сотрудниками карстовой лаборатории города Дзержинска под руководством В.М. Леоненко.

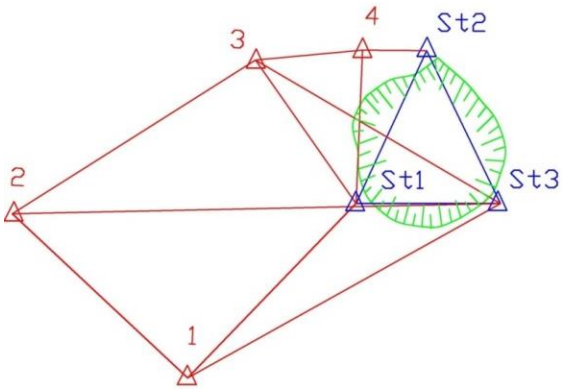
- закономерным, вследствие сложности и опасности работ, недостатком, с точки зрения метрологии, является отсутствие сведений о количестве произведенных измерений и величинах их возможных погрешностей, что, однако, не ставит под сомнение их результаты, так-так их допустимость подтверждена более поздними альтернативными измерениями;
- получены уникальные снимки внутренней поверхности полости разрушения известкового массива, выполнено их дешифрирование, позволившее сделать заключение о строении карстующейся толщи и характере ее разрушения.

В качестве пожелания следует порекомендовать владельцам раскадровки видео, обработать кадры видео по общедоступной программе AGISOF MEMETASHAP или AGISOF PHOTOSCAN, которая позволяет строить по перекрывающимся снимкам пространственное облако точек, с последующим получением их координат. Это возможно позволило бы выполнить детальные промеры блоков и трещиноватости, а также размеров внутренней поверхности полости разрушения известкового массива.

Дальнейшие измерения геометрических параметров провала было сделано в сентябре 2018 г. сотрудниками кафедры Инженерных изысканий и геоэкологи НИУ МГСУ Борейша Е.В. и Рановым И.И. ими было принято решение о выполнении съемки электронным тахеометром внутренней поверхности Нелединского карстового провала.

Однако при анализе литературных источников было выявлено что, съемка стенок глубоких карстовых шахт стандартной аппаратурой не может быть качественно и безопасно выполнена геодезическими методами съемки вследствие целого ряда указанных в работе [7] причин. Например, при наклоне вниз зрительной трубы всех электронных тахеометров на угол более 40° начинается виньетирование поля зрения трубы корпусом прибора, с потерей изображения объекта. Аналогичная причина делает невозможной съемку глубоко расположенных объектов наземным лазерным сканированием.

Для оценки ситуации, первоначально была выполнена тахеометрическая съемка видимой части поверхности провала электронным тахеометром Leica TS06 R400 (2"), с 3-х точек стояния, расположенных на расстоянии 1,5–2 метра от трещин, обозначивших зону обрушения бровки провала. Эти точки входили в общую геодезическую сеть, включающую 4 катафотных марки, закрепленные на стволах деревьев, находящихся в 10-50-80 м от бровки провала (рис. 4) [8].



1, 2, 3, 4 — точки геодезической сети в условной системе координат и высот; St1, St2, St3 — точки стояния тахеометра (станции)

Рисунок 4. *Геодезическая сеть [8]*

По результатам съемки была выполнена 3D визуализация, после чего в AutoCAD Civil 3D внутренняя поверхность была показана в горизонталях с сечением через 2 м. На рисунке 5 [8], видно, что при условной высоте бровки провала 140 м, нижние точки съемки имеют высоту 126 м. По данным, приведенным в работе [6], в июле 2018 г. глубина провала составляла примерно 40 м, таким образом, зона доступная для съемки составила всего 13–14 м, что составляет не более 30 % от всей поверхности [8].

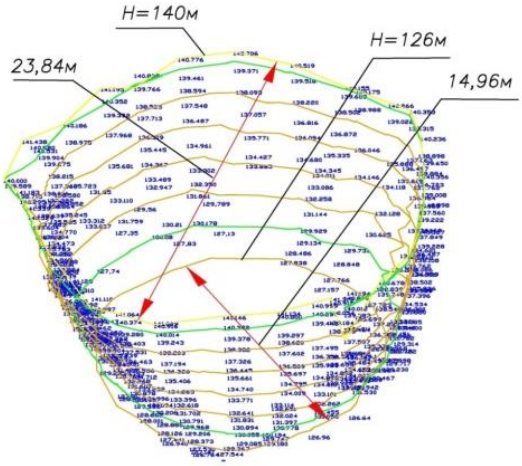
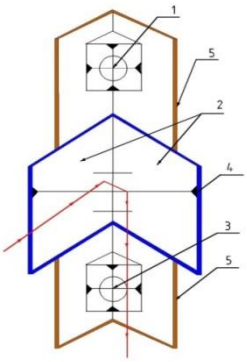


Рисунок 5. *Результаты съемки тахеометром Leica TS06 R400 (2") [8]*

Съемка нижней части поверхности провала, невидимой с точек стояния тахеометра была выполнена с использованием двухзеркального отражателя [8] (рис. 6, 8 а, 8 б).



1 — верхняя марка фиксации ребра двух зеркального отражателя; 2 — двух зеркальный отражатель; 3 — нижняя марка фиксации ребра двух зеркального отражателя; 4 — метки для фиксации точки визирования; 5 — основание двухзеркального отражателя

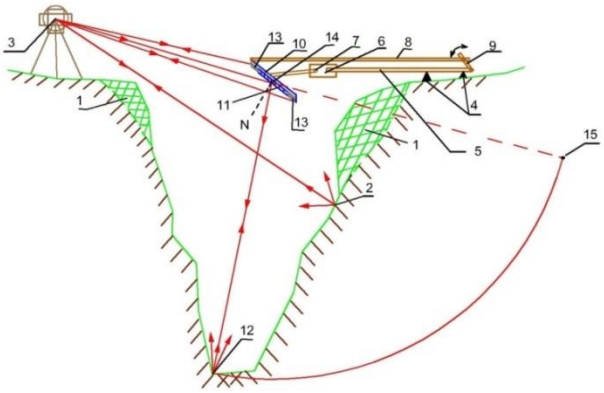
Рисунок 6. *Двухзеркальный отражатель [8]*

Конструкция устройства позволяет изменять угол наклона основания 5 от 0 до ±45°, что приводит к наклону луча лазера вниз или вверх на угол от 0° до ±90° [9]. Величину изменения угла наклона вычисляют по значению координат марок 1 и 3.

Такое устройство обладает также свойством инвариантности к разворотам основания,[4] т. е. отраженный луч возвращается в одной вертикальной плоскости с пришедшим лучом.

На рисунке 7 показа схема съемки внутренней поверхности провала.

[4] Бебчук Л.Г., Богачев Ю.В., Заказнов Н.П. [и др.]; «Прикладная оптика» ред. Заказнов Н.П. — 2-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2007. — 311 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Библиогр.: с. 300–301. — ISBN 978-5-8114-0757-6.



1 — зоны обрушения карстовой шахты; 2 — доступный уровень съемки тахеометра; 3 — безопасная точка стояние тахеометра; 4 — опоры геодезической вехи; 5 — телескопическая (выдвижная) геодезическая веха; 6 — серийное карданное крепление для призмы; 7 — ось наклона двухзеркального отражателя; 8 — тяга наклона двухзеркального отражателя; 9 — рычаг изменения наклона; 10 — основание двухзеркального отражателя; 11 — двухзеркальный отражатель; 12 — текущая точка съемки; 13 — две катафотные марки для определения угла наклона линии пересечения зеркал; 14 — точка отражения съемочного луча; 15 — мнимое изображение точки 12

Рисунок 7. *Схема съемки с двухзеркальным отражателем*

Как следует из рисунка 7, основание10 двухзеркального отражателя является одной из сторон шарнирного параллелограмма, опоры геодезической вехи 4 установлены вне зоны обрушения 1.Наклон отражателя изменяется перемещением рычага 9. Из рисунка 7 видно, что для получения координат текущей точки 12 необходимо измерить координаты марок 1 и 3 рисунок 6.

Рисунок 8 а. *Двухзеркальный отражатель на бровке провала (фото авторов)*

Рисунок 8 б. *Внешний вид двухзеркального отражателя (фото авторов)*

По результатам тахеометрической съемки с использованием данного устройства выполнена обработка полученных измерений и построена поверхность Нелединского провала, рисунок 9 [8].

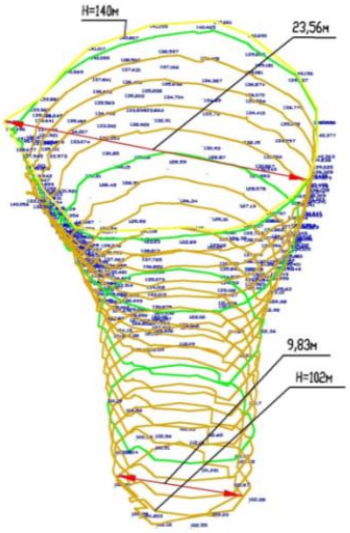


Рисунок 9. *Результаты съемки внутренней поверхности двухзеркальным отражателем [8]*

Горизонтали с сечением через 2 метра построены по точкам снятым тахеометром Leica TS06 R400(2") через двух зеркальный отражатель.

В выполненный по описанной здесь методике, результат работы представлен на рисунке 9, из которого видно, что при условной высоте бровки провала 140 м, нижние точки съемки, расположенные на дне провала, имеют высоту 102 м. Таким образов глубина дна провала, зафиксированная съемкой через двухзеркальный отражатель, составляла 38 м. Изображенные на рисунке горизонтали проведены через 2 метра и полностью отражают состояние провала близ деревни Нелединo, Шатковского района Нижегородской области на дату 10–12 сентября 2018 г. [8].

Для дальнейшего изучения состояния и изменения геометрических параметров Нелединского провала была выполнена при помощи квадрокоптера маршрутно-площадная фотосъемка с продольным перекрытием соседних снимков в маршруте70 %, а межмаршрутных 60 %.

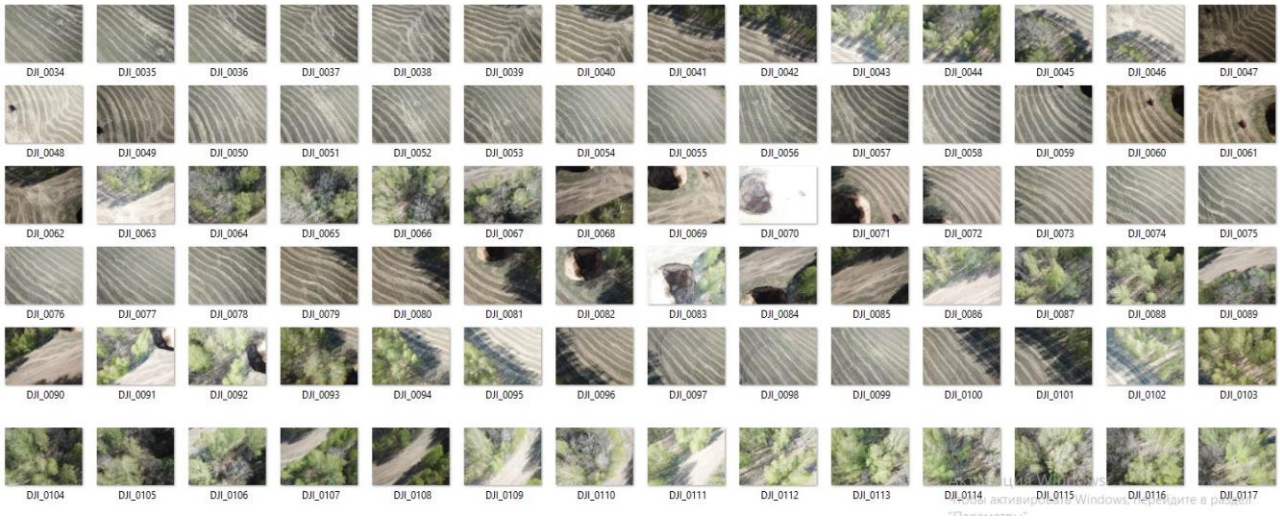


Рисунок 10. *Массив раскадровки снимков маршрутно-площадной съемки (фото авторов)*

При фотосъемке на матрицу 12 мегапикселей камерой с фокусным расстоянием объектива 28 мм с высоты 40 м получен масштаб 1:1 470, размер пикселя на местности составляет 7 мм, по стандарту ВВС для изображения минимального элемента требуется 3 двойных линии, получаем разрешение изображения 42 мм.

Данные расчеты подтверждают представленные на рисунке 10 снимки, которые как и снимки на рисунке 11, обладают высокими изобразительными качествами, позволяющими отдешифрировать наличие и развитие гравитационных и водно-гравитационных процессов, создающих под действием денудационных сил, зоны обвалов, осыпей, оползаний и аккумуляции покровных горных пород на дне воронки.

Однако эти сведения, имеющие исключительно качественный характер не несут количественной информации о геометрических параметрах карстового проявления, необходимых для вероятностно-статистической оценки опасности состояния объекта и прилегающей территории. Этот недостаток преодолим, если использовать стереофотограмметрический способ обработки стереопар снимков, о применении, которого будет сказано в конце статьи.

Рисунок 11. *Стереопара снимков из массива площадной съемки (фото авторов)*

На рисунке 12 показаны результаты обработки массива снимков по программе AGISOF PHOTOSCAN, которая как отмечалось выше строит по перекрывающимся снимкам пространственное облако точек с последующей аппроксимацией системы треугольников и получением координат их вершин, а так же построением в Autodesk Auto CAD Civil 3D топографических планов, чертежей, профилей и определением объемов полостей обрушения горных пород на дне воронки.

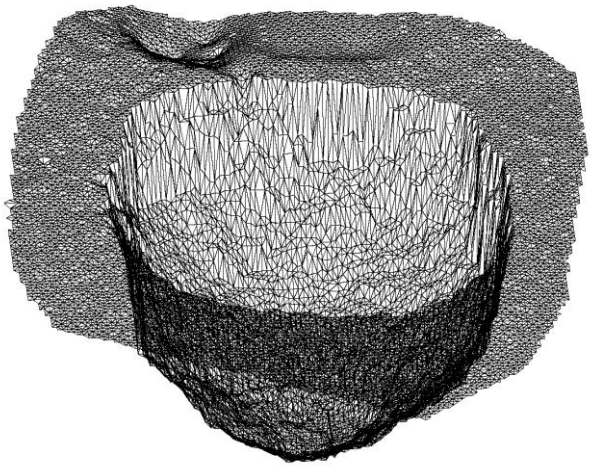


Рисунок 12. *Результат аппроксимирования поверхности провала, системы треугольников (фото авторов)*

Ниже представлен результат (рис. 13) изображения поверхности провала горизонталями сечением 1,0 м построенный в Autodesk Auto CAD Civil 3D по результатам аппроксимации представленной на рисунке 12.

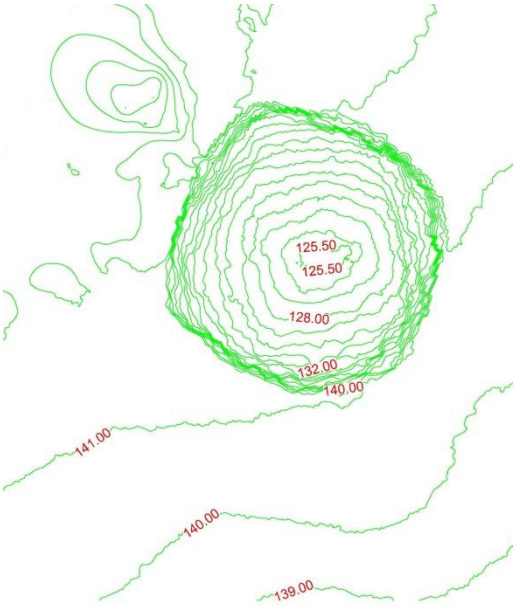


Рисунок 13. *Рельеф участка местности с сечением горизонталями через 1,0 м воронки Нелединского провала 04.2022 г. (фото авторов)*

Кроме этого показаны изображения профилей внутренней поверхности повала (рис. 14) построенные по данным рисунка 13. Поскольку эти профили являются графической иллюстрацией пространственных цифровых чертежей AUTOCAD, совершенно понятна возможность получения количественных оценок вышеназванных денудационных зон и сравнения их с любыми результатами теоретических расчетов и моделирования, применяемых для оценки фазы развития карстовых проявлений и их возраста.

Таким образом, можно надеяться, что появилась техническая возможность внедрения в широко применяемые методики оценки карстовой опасности основанные чаще всего только на измерении площадей воронок, диаметров и их количества, использование большого количества достоверных автоматизированных измерений, ранее редко применяемых из-за большой трудоемкости цифровых показателей, дает новые перспективы вероятностно-статистической оценки карстовой опасности объекта и прилегающей территории.

На наш взгляд, особого внимания заслуживает количественная оценка не только стадийности развития карстового процесса, но и стадийности состояния и развития форм поверхностного проявления карста. Поскольку законы денудации очевидно применимы и к развитию карстовых воронок, то правомерно выделение на профилях участков обрушения, участков осыпания, оползания и аккумуляции пород, составляющих покровную толщу. Их четко видно по углам наклона линии профилей 1-1 и 2-2 недавнего (2018 г.) провала (рис. 14).

На профиле1-1 и 2-2 легко разделяются зоны обрушения, осыпания и аккумуляции, это позволяет связать текущее состояние воронки с фазами развития, приведенные в работе [10], что очевидно позволит определять фазы развития более поздних провалов и уточнять время их образования (в сочетании с другими методами), это в свою очередь уточняет значения площадных и объемных коэффициентов закарстованности соотносимых со временем образования карстовых воронок.

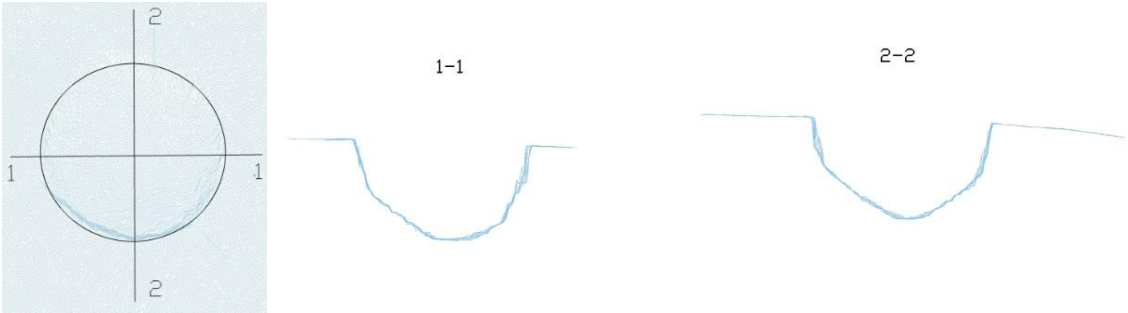


Рисунок 14. *Профили поверхности воронки Нелединского провала (фото авторов)*

Для сравнения профилей были выполнены съемки более ранних карстовых проявлений, расположенных в нескольких километрах от Нелединского провала (рис. 15). Апробация метода была выполнена фотосъемкой с квадрокоптера на карстовом участке межу селами Малая Якшень и Большие Печеры по методике аналогичной предыдущей.

Рисунок 15. *Фотоплан на карстовом участке межу селами Малая Якшень и Большие Печеры (фото авторов)*

На рисунке 16 (а, б, в) показаны результаты обработки массива снимков программой AGISOF PHOTOSCAN.

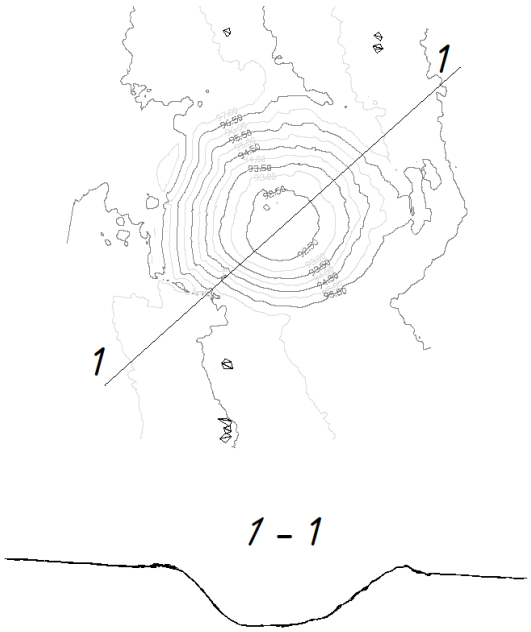


Рисунок 16 а. *Результат съемки воронки 1 на участке межу селами Малая Якшень и Большие Печеры (фото авторов)*

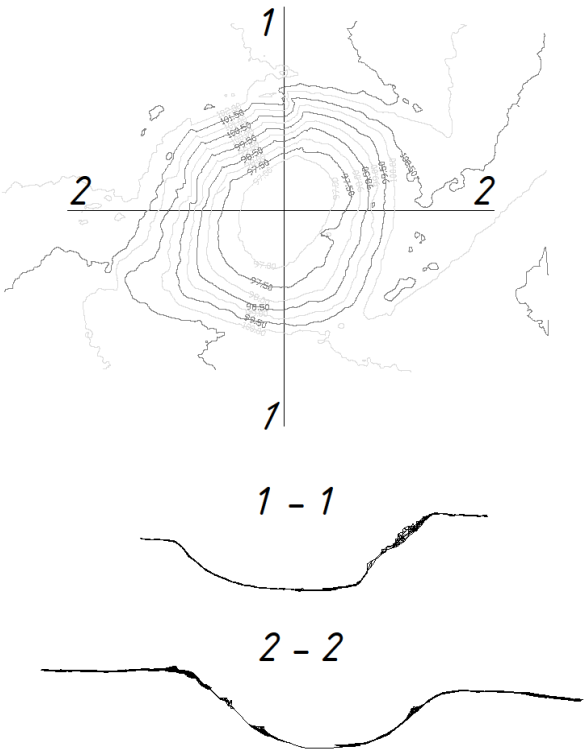


Рисунок 16 б. *Результат съемки воронки 2 на участке межу селами Малая Якшень и Большие Печеры (фото авторов)*

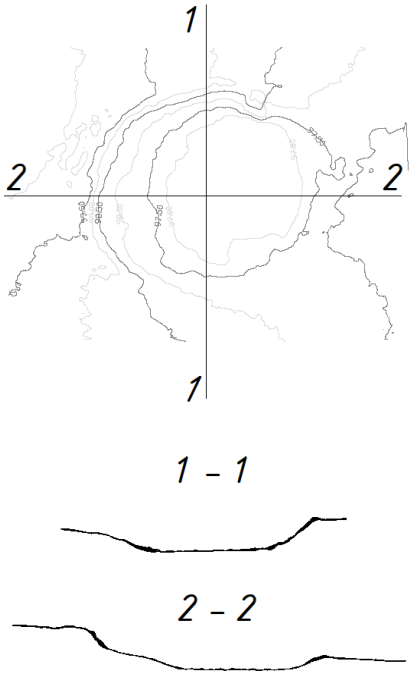


Рисунок 16 в. *Результат съемки воронки 3 на участке межу селами Малая Якшень и Большие Печеры (фото авторов)*

Даже визуальный анализ показанных выше профилей приводит к выводу о разновременности их появления и времени развития. Очевидно, что в комбинации и сравнении с другими методами определения времени возникновения карстовых воронок, использование анализа профилей может существенно уточнить значение временного параметра в формулах вычисления коэффициентов закарстованности участков.

В апреле 2023 года, для сравнения с результатами 2018 года по идентичной методике была произведена тахеометрическая съемка Нелединского провала электронным тахеометром. Поскольку за 5 лет глубина провала значительно уменьшилась, появилась возможность снимать существующее дно воронки электронным тахеометром, установленным на безопасном расстоянии от зоны обрушения. Результаты съемки показаны на рисунке 17.

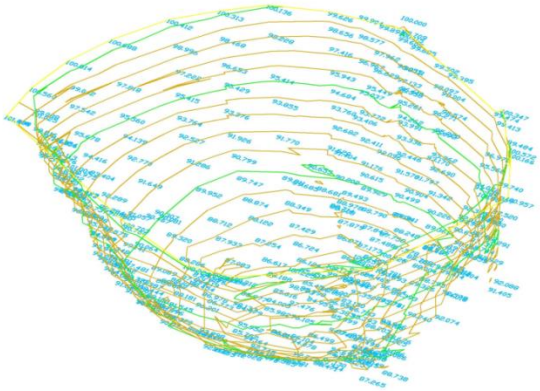


Рисунок 17. *Рельеф участка местности с сечением горизонталями через 1,0 м воронки Нелединского провала (фото авторов)*

В дальнейшем по данным измерениям был вычислен объем провала. Результаты тахеометрической съемки 2023 года были обработаны по программе вычисления объемов, входящей в состав программы Autodesk Auto CAD Civil 3D данная программа аппроксимировала внутреннюю поверхность воронки треугольниками (рис. 18).

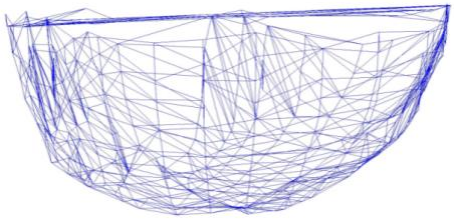


Рисунок 18. *Результат аппроксимирования поверхности провала, системы треугольников (фото авторов)*

Из протоколов вычисления объема внутренней поверхности, рисунок 19 видно, что объем составляет 6 175,61 куб. м учитывая достоверность определений выполненные в 2018 г. можно сделать заключение, что за период до 2023 года объем карстовой воронки изменился не более чем на 325 куб. м это менее чем 4 %.

Статистика	Значение
⊞ **Общие**	
⊞ **TIN**	
⊟ **Объем**	
Базовая поверхность	Поверхность1
Поверхность сравнения	Поверхность6
Коэффициент выемки	1.000
Коэффициент засыпки	1.000
Объем выемки (отрегулировано)	6175.61 Куб. м
Объем насыпи (отрегулировано)	0.27 Куб. м
Чистый объем (отрегулировано)	6175.34 Куб. м <Выемка>
Объем выемки (без поправок)	6175.61 Куб. м
Объем насыпи (без поправок)	0.27 Куб. м
Чистый объем (без поправок)	6175.34 Куб. м <Выемка>

Рисунок 19. *Протокол вычисления объема внутренней поверхности (фото авторов)*

В этот же период, в апреле 2023 была выполнена съемка Нелединского провала методом наземного лазерного сканирования. При обработке материала сканирования программой Trimble real works 12.0м было получено изображение внутренней поверхности провала с очень высокой детальностью, на которой прекрасно видно зону осыпания и зону аккумуляции, рисунок 20. В отличие от тахеометрической съемки и съемки с квадрокоптера, детальность лазерного сканирования позволяет наблюдать структуру поверхности воронки. Данная программа дает возможность получить плоские и объемные чертежи, а также 3D модель и величину объема исследуемой поверхности. На рисунке 20 представлен результат съемки Нелединского провала выполненной сканером Faro focus s150.

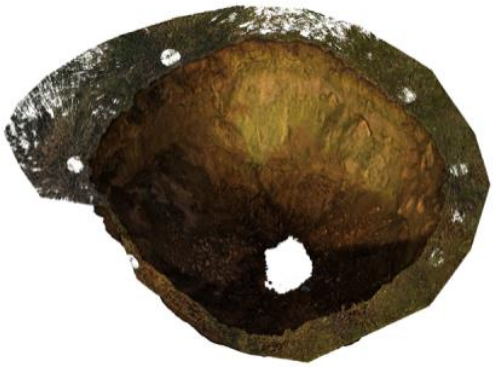


Рисунок 20. *Результат съемки Нелединского провала сканером Faro focus s150 (фото авторов)*

На рисунке 21 показаны профили сечений по четырем направлениям, а на рисунках 22, 23, показаны профили по каждому направлению, где детализация аппроксимации поверхности воронки во много раз выше. Это объясняется тем фактом, что при съемке, например, тахеометром было измерено и аппроксимировано порядка 500 точек, а при аппроксимации поверхности программой Trimble real works 12.0м их несколько тысяч.

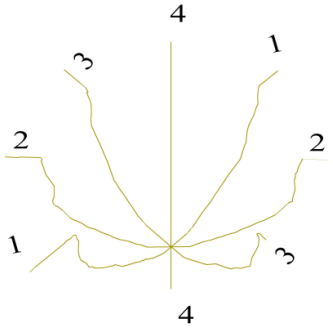


Рисунок 21. *Профили по четырем направлениям поверхности Нелединского провала (фото авторов)*

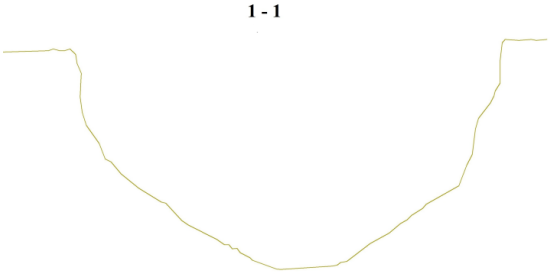


Рисунок 22. *Профиль по направлению 1-1 (фото авторов)*

70NZVN523
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

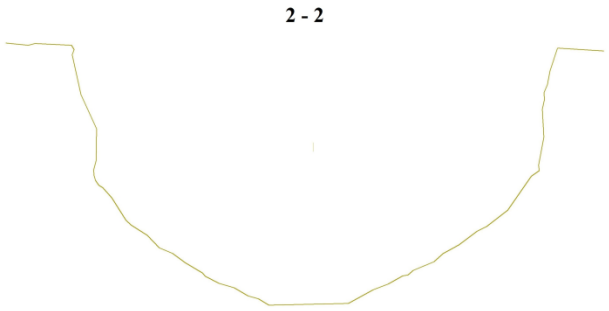


Рисунок 23. *Профиль по направлению 2-2 (фото авторов)*

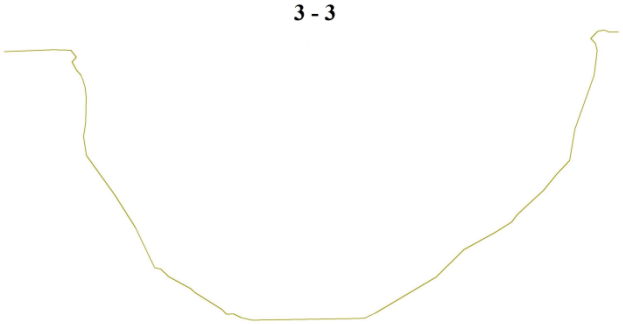


Рисунок 24. *Профиль по направлению 3-3 (фото авторов)*

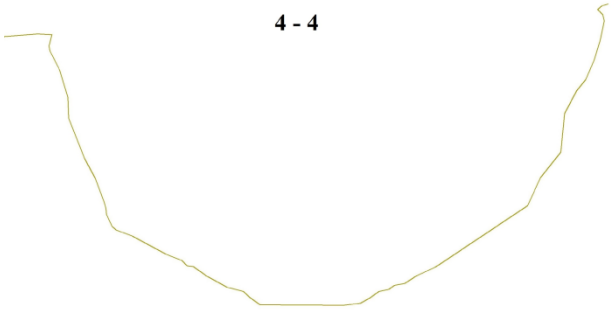


Рисунок 25. *Профиль по направлению 4-4 (фото авторов)*

Видимая на сканах и профилях горизонтальная водная поверхность в зоне аккумуляции горной породы имеет незначительную глубину сопоставимую с величинами осыпавшихся обломков, что подтверждается экстраполированием профиля под поверхностью воды.

Заключение

В данной статье показаны реальные возможности методов измерений, использованных для определения геометрических параметров нескольких карстовых провалов в Нижегородской области с целью изучения возможностей возникающих при использовании этих методов для вычислений большего числа показателей карстовой опасности.

1. Классический метод с использованием мерной рулетки и отвеса в принципе позволил измерить диаметры, глубину и вычислить объем, однако в сложившихся условиях, при такой технологии невозможно выполнить достаточное число измерений, чтобы получить реальную форму поверхности для анализа фазы развития провальных воронок.

2. Съемка электронным тахеометром была выполнена 2018 и 2023 годах. Основной целью измерений было, определение объемов провала и их сравнение, которое показало стабильное значение, с погрешностью не более 4 %. Недостатком этого метода является большая трудоемкость и недостаточная для анализа фазы развития воронки детальность, не смотря на то, что было выполнено более 500 измерений.
3. Съемка наземным лазерным сканированием позволяет наиболее полно определять геометрические параметры объекта, но ее применение сдерживается высокой стоимостью аппаратуры, легального программного обеспечения и необходимостью использования только высокотехнологичных компьютеров.
4. Наиболее рациональным, результативным и перспективным, по нашему мнению, следует считать использование наземной и воздушной фотосъемки, показанное здесь в варианте съемки с квадрокоптера. Достоинствами этого метода являются высокая производительность, малые трудозатраты, высокая детальность при достаточной точности и умеренной стоимости аппаратуры и программного обеспечения.

В перспективе этого метода имеется возможность совместного использования не только их метрических, но и высоких изобразительных свойств современных фотоснимков. Это возможно путем одновременного измерения и геологического дешифрирования стереопар как воздушных, так и наземных фотоснимков при обработке их на аппаратуре программном обеспечении PHOTOMOD.

Из представленной работы можно сделать вывод, что использование описанных здесь методов позволяет более широко применять на практике показатели закарстованности, содержащие величины объемов поверхностных карстовых проявлений, а также, в сочетании с другими методами, уточнить методику определения фазы развития и времени образования карстовых воронок, что в конечном итоге повысит достоверность оценки карстовой опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёва Т.Г. «Основные проблемы карстологического прогноза на урбанизированных территориях.» Москва. Журнал. «Современные проблемы науки и образования». 2014, № 6, с. 1674–1674.
2. Ковалев В.А., Патрикеев А.Б., Шейнин В.И. «К оценке параметров карстовой опасности с использованием рекомендаций СП 22.13330.2016» Москва. Журнал. «Вестник НИЦ строительство». № 1(20), 2019, с. 35–45.
3. Коллектив авторов. «Космическая информация в геологии» Издательство.: «Наука», Москва 1983. С. 536.
4. Мартин В.И., «Опыт оценки степени закарстованности башкирского Предуралья по данным дешифрирования аэрофотоснимков» // Карст Башкирии. Уфа. 1971, с. 51–52.
5. Мартин В.И., «О методике дешефрирования карстопроявлений по аэрофотоматериалам». Уральский научный центр АН СССР институт геологии и геохимии имени акад. А.Н. Заваринского Кунгурский стационар. «Вопросы инженерного карстоведения». Тезисы докладов к инженерно-геологическому совещанию г. Кунгур 1972, с. 37–38.

6. Леоненко М.В., Юргин О.В., Хоменко В.П., Лаврусевич «Риск образования карста» (на примере провала близ деревни Неледино Шатковсого района нижегородской области). Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков. Москва. Российский университет дружбы народов. 2018 г. С. 77–81.

7. Ранов И.И., «Устройство и способ съемки поверхности глубоко расположенных объектов шахтного типа». Москва. Журнал «Инновации и инвестиции» № 4, 2019 г., С. 335–338.

8. Борейша Е.В., «Топографическая съемка внутренней поверхности карстового провала». Москва. Журнал «Разведка и охрана недр» № 9, 2020, с. 31–34.

9. М. Борн, Э. Вольф. «Основы оптики» Издательство «НАУКА», Главная редакция физико-математической литературы Москва 1970 г. С. 856.

10. Копосов Е.В., Тычина О.В. «Изучение фаз развития и учет возраста провальных воронок при инженерно-геологическом районировании закарстованных территорий» Москва. Журнал «Инженерная геология» № 5, 1983, С. 67–74.

Boreisha Elena Viktorovna
National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: elena.boreysha@mail.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=681954

Ranov Igor Ivanovich
National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: ranov@mail.ru

Comparative assessment of modern geodetic methods applicable for monitoring the state of surface karst manifestations

Abstract. It is considered how modern high-performance methods of measurements, such as aerial photogrammetric survey, ground-based laser scanning, as well as total station survey by digital laser total station are used for karst hazard assessment on the example of objects located in the Nizhny Novgorod region. It was noted that surveying of mine-type failures is impossible due to vignetting of the field of view of the pipe by the instrument body when the pipe is tilted downward at an angle of more than 40 degrees. Application of a device allowing to avoid vignetting is described. The results of surveying the surface of karst failure by electronic total station, quadrocopter, laser scanner are shown. The authors presented the result of processing the monitoring of surface karst manifestations using the programs Autodesk Auto CAD Civil 3D, AGISOF PHOTOSCAN, Trimble real works 12.0m, as the results of measurements show the shapes of the inner surface of the karst cavity by approximating the surface with triangles, calculated volumes of the inner surface of karst sinkholes, built profiles of karst sinkholes. The loss of the possibility of using the results of geological interpretation of photographic images in approximating surfaces is noted. The possibility of analyzing the profiles of sinkholes to determine the stage of their development in order to clarify the temporal characteristics of the appearance of surface karst manifestations is presented. The loss of the possibility to use the results of geological interpretation is noted**.** The efficiency of using modern geodetic methods of monitoring of mine-type karst formation is analyzed, advantages and disadvantages of each considered method are outlined. Calculation of the resolution of photos on the ground using the value of the survey height and parameters of the quadrocopter camera is performed. The real possibility of application of modern geodetic methods of monitoring for determination of geometrical parameters of karst failures during engineering surveys for construction is substantiated.

Keywords: karst failure; geometric parameters; surface; method; analysis