

# ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 553.635.1; 551.435.8

## Сравнительный анализ изучения карстовых процессов на урбанизированных территориях и месторождениях строительного гипса

К.О. Худеньких<sup>а</sup>, В.Н. Катаев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>ООО «Ергач»

617437, Пермский край, Кунгурский муниципальный округ, п. Ергач, ул. Заводская, 10.

E-mail: ms002@ergach0.ru

<sup>б</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: kataev@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 31 мая 2022 г.)

Для урбанизированных территорий и месторождений строительного гипса охарактеризованы естественные (природные) и антропогенные факторы, приводящие к провалообразованию, и методы изучения карстовых процессов. Сравнительный анализ показал, что изучение карстовых процессов как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса схожи, но их сущность различна для оценки карстоопасности. Рассмотрена возможность применения результатов изучения карстовых процессов на урбанизированных территориях к месторождениям строительного гипса и наоборот. Приведены рекомендуемые карстологические исследования на всех этапах и стадиях геологоразведочных работ.

Ключевые слова: *сравнительный анализ, карстовые процессы, урбанизированные территории, месторождения строительного гипса, карстологические исследования.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.3.264

### Введение

На современном этапе хозяйственного освоения территорий, где в разрезе присутствуют сульфатные отложения, карст играет основную роль как негативный фактор. Карстовые процессы оказывают отрицательное влияние как на урбанизированные территории, так и на локальные объекты, такие как месторождения строительного гипса. Ежегодный ущерб от этих процессов может достигать более 300 миллионов долларов (Kim Y. et al. 2020).

Основной проблемой, стоящей перед учеными, изучающими карст, является прогнозирование провальных карстовых явлений. В научной литературе предлагается множество решений этой задачи. Современные методические подходы к оценке карстоопасности были изложены в 2002 г. в 3 томе

монографического издания Российской академии наук «Природные опасности России» (Экзогенные геологические опасности. 2002).

Некоторые универсальные методы карстологической оценки территорий были закреплены в территориальных строительных нормах Республики Башкортостан (ТСН 302-50-95 РБ), Нижегородской области (ТСН 22-308-98 НН), Пермской области (ТСН 11-301-2004 По), в федеральных нормативных документах, например СП 11-105-97, инженерно-геологических изысканиях для строительства и в различных рекомендациях и руководствах.

К настоящему времени в инженерной геологии к практическому использованию рекомендовано большое количество способов оценки и прогнозирования карстовых явлений: от методов изучения динамики изменения во времени форм и параметров отдельных

карстовых полостей до формирования провалов на поверхности земли. Активно развиваются методы определения прогнозного диаметра провала под сооружением. Все эти методы так или иначе были применены к оценке карстоопасности урбанизированных территорий Пермского края и в том числе г. Кунгура (Катаев и др. 2009; Щербаков, Катаев, 2011; Щербаков и др. 2018).

По нашему мнению, основанному на практической реализации различных методов оценки карстоопасности, построение прогнозной территориальной модели должно базироваться на углубленном анализе пространственного распределения карстовых форм в зависимости от строения массива горных пород. Именно состояние закарстованного массива в первую очередь определяет интенсивность и направленность протекания карстового процесса, а следовательно рассмотрение отдельных составляющих геологического, гидрогеологического, структурно-тектонического, геоморфологического, инженерно-геологического строения в совокупности с зафиксированными карстовыми деформациями формирует целостную картину реальной карстовой опасности в пределах исследуемой территории.

Под карстологическим прогнозом авторы понимают научно обоснованное предсказание условий состояния, последовательности и развития карстового массива в целом или его отдельных элементов, включая карстовые формы, а также факторов, влияющих на активизацию карстовых процессов, приводящих к провалообразованию. Для проведения подобного прогноза необходим анализ баз геологических и карстологических данных, выполняемый в целях выявления закономерностей пространственного соотношения показателей состояния геолого-гидрогеологической среды и закартированных поверхностных и подземных карстопоявлений (Катаев, Ковалева, 2013). Это в равной степени применимо как для урбанизированных территорий, так и для месторождений строительного гипса.

На факторах, влияющих на активизацию карстовых процессов, приводящих к провалообразованию, необходимо остановиться подробнее. Условно их можно разделить на естественные (природные) и антропогенные. К естественным факторам следует отнести

геолого-гидрогеологическое строение: массив карстующихся пород представлен только сульфатными отложениями, либо они чередуются с карбонатными. Также следует учитывать литологию перекрывающих отложений, наличие/отсутствие подземных водоносных горизонтов и естественный приток инфильтрационных вод.

Комплекс антропогенных факторов провалообразования на закарстованных территориях может различаться по содержанию относительно различных территорий с различной степенью инженерного освоения. Вместе с тем, анализ таких факторов на территории городов Москвы, Уфы, Дзержинска Нижегородской области, Кунгура в Пермском крае позволил выделить следующий набор факторов (Катаев, 2010; Камалов и др. 2017; Аникеев, 2017):

- откачка подземных вод для питьевого и технического водоснабжения;
- утечки из систем тепло- и водоснабжения;
- повышение агрессивности и растворяющей способности подземных вод за счет их химического и теплового загрязнения;
- накопление воды в искусственных понижениях (выемки, траншеи, котлованы и т.п.) с ее последующей инфильтрацией в рыхлые отложения и карстующиеся породы;
- обрушение грунтов и перекрытий над водонесущими коммуникациями в местах утечки воды из них;
- дренаж агрессивных городских и промышленных стоков в подземные горизонты, усиливающий активность растворения сульфатных и карбонатных пород;
- изменение уровня и напоров надкарстовых и трещинно-карстовых вод;
- увеличение вертикального и горизонтального градиентов фильтрации и, как следствие, скоростей движения подземных вод;
- изменения значений показателей физико-механических свойств грунтов;
- нарушение водоупорных свойств грунтов;
- активное внедрение селитебного и промышленного строительства в закарстованный массив;
- увеличение динамических и статических нагрузок на грунт;

– оседание или обрушение грунтов и насыпей над искусственными полостями (подвалы, камеры, ходы сообщения, засыпанные колодцы).

Если рассматривать населенные пункты и месторождения строительного гипса, расположенные в пределах одной территории (например, в границах Кунгурского муниципального округа), то геолого-гидрогеологические условия для них будут примерно одинаковыми. Антропогенные факторы существенно разнятся. На урбанизированных территориях к основному фактору, оказывающему влияние на активизацию карстовых процессов, приводящих к провалообразованию, следует отнести, в первую очередь, утечки из систем тепло- и водоснабжения. Как показала оценка техногенной нагрузки на территорию г. Кунгура (Пермский край), в месте ее максимальной плотности образовался крупный карстовый провал (Худеньких, 2010). Во-вторых, это отсутствие ливневой канализации, провоцирующее хаотичный «инфильтрационный вброс» поверхностных вод в массив карстующихся пород (сюда можно также отнести неконтролируемый приток воды из частного сектора: бани, открытые бассейны и пр.).

На месторождениях строительного гипса к основному антропогенному фактору следует отнести выемку вскрышных пород. Этот процесс влечет за собой ликвидацию всех водупоров, что позволяет поверхностным водам беспрепятственно проникать в гипсовый массив. Если при этом на открытой разработке не организована дренажная система, позволяющая контролировать поверхностный сток, то это может привести (и приводит!) к весьма активному провалообразованию (Худеньких, 2021b).

Следует также отметить, что любой прогноз основывается на каких-либо данных. Прогноз процессов провалообразования основывается, прежде всего, на результатах карстологического мониторинга. В настоящее время как в России, так и за рубежом существует множество систем карстомониторинга (Дурнаева, Смирнов, 2019; Катаев, 2013; Шаврина, 2015; Banks et al., 2015; Berthelin, Hartmann, 2020; Kim et al., 2020; Pan et al., 2018; Taminskas, Marcinkevicius, 2002).

Мониторинг карстовых процессов на месторождениях строительного гипса неизменно должен начинаться со сбора и систематизации информации, содержащейся в производственных и научно-исследовательских отчетах. Полученная и систематизированная информация должна аккумулироваться в специализированных базах данных, что позволяет провести ее качественный и всесторонний анализ, который, в свою очередь, ляжет в основу обоснования объектов мониторинговых исследований. Обязательным условием является привязка созданных баз данных к картографическим материалам, реализованным на какой-либо ГИС-платформе. Это дает возможность не только создавать различный специализированный картографический материал, но и отслеживать изменения тех или иных параметров и условий в режиме реального времени. В совокупности, базы данных, привязанные к картам ГИС-платформы, уже являются первичной информационной мониторинговой системой, позволяющей дать качественную оценку и прогноз развития карстовых процессов на начальном этапе наблюдений (Худеньких, 2021b).

Таким образом, суть мониторинговых исследований как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса сводится к единому: создание мощной информационной основы о состоянии геологической среды, в которую включены сведения, объединенные в единую систему и предназначенные для обоснования опорной наблюдательной сети, прогнозных мероприятий и выбора конкретного инженерного или управленческого решения (Катаев, 2012).

И здесь мы подходим к главному: система проведения карстомониторинга на урбанизированных территориях и месторождениях строительного гипса в целом схожа, однако подчас существует огромная разница в объемах исходной информации. Например, на территории г. Кунгура пройдено более 4300 скважин, геологические данные по которым объединены в единую электронную базу данных (Катаев, 2010; Кадебская и др., 2001a; Кадебская и др., 2001b).

Однако не все скважины БД являются карстологически информативными: большинство из них бурилось для инженерных изысканий под строительство, т.е. эти скважины

не вскрыли коренные отложения, а были пройдены только по перекрывающим их породам. Следует также отметить, что скважины, вскрывшие карстующие породы, пройдены на разном расстоянии друг от друга, можно сказать, нет какой-либо «сетки» бурения.

В отличие от урбанизированных территорий, на месторождениях строительного гипса разведочные скважины бурятся по определенной схеме, в зависимости от того, к какой категории будут отнесены запасы полезного ископаемого.

В частности, для запасов гипса, разведанных по категории С<sub>1</sub>, «сетка» скважин составляет 100×100 м. При этом разведочные скважины проходятся на всю мощность полезного ископаемого (гипса), что делает каждую из них информативной в карстологическом аспекте. И, наконец, если сравнить плотность таких информативных скважин на территории урбанизированного объекта и на площади конкретного месторождения, то на последнем она будет гораздо выше.

Следовательно, массив геологической и карстологической информации, имеющийся на месторождениях строительного гипса, велик, но остается в большинстве случаев недоступен, хотя представляет собой огромный научный интерес.

Данные, имеющиеся на месторождениях, можно использовать в качестве дополнения при ведении карстомониторинга на урбанизированных территориях, применяя метод аналогии для прогноза активизации карстовых процессов, что более подробно будет рассмотрено в настоящей работе на примере Соколино-Саркаевского месторождения гипса и ангидрита и территории г. Кунгура, расположенных в Пермском крае.

## **Сравнительный анализ изучения карстовых процессов на урбанизированных территориях и месторождениях строительного гипса**

### ***Изучение карстовых процессов на урбанизированных территориях***

Изначально изучение закарстованности на любых территориях сводилось к фиксации поверхностных карстопроявлений

(карстовые провалы, воронки и другие отрицательные формы на земной поверхности) и подземных (полости), выявленных при бурении скважин. Однако на современном этапе оценки карстоопасности этого совершенно недостаточно. В наши дни необходимо проводить полный анализ, учитывающий особенности пространственного распределения, морфологию и морфометрию поверхностных и подземных форм карста под влиянием особенностей геолого-гидрогеологического строения карстующегося массива (Катаев, Ковалева, 2013).

Основное внимание при этом уделяется следующим позициям:

- типам геологического разреза;
- литологии и мощности отложений, перекрывающих карстующиеся породы;
- глубине залегания и минерализация подземных вод;
- интенсивности техногенного воздействия.

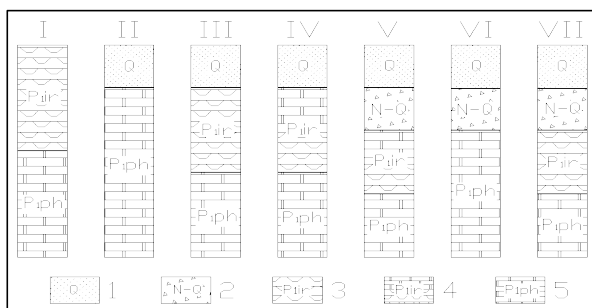
### *Типы геологического разреза*

Для территории г. Кунгура выделено семь основных типов геологического разреза (рис. 1).

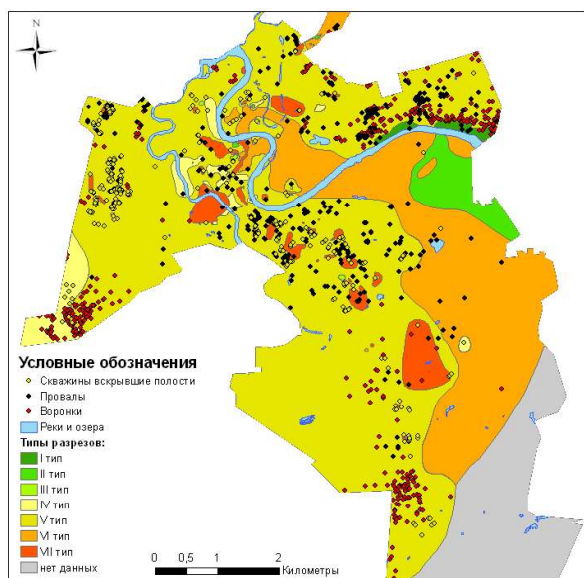
Анализ приуроченности поверхностных и подземных карстовых форм к участкам, характеризующимся определенным типом геологического разреза в пределах территории г. Кунгура, свидетельствует о том, что максимальное количество как подземных, так и поверхностных карстовых форм приурочено к V типу геологического разреза (318 провалов, 336 воронок и 416 полостей) (рис. 2).

### *Литология и мощность перекрывающих карстующиеся породы отложений*

В геологическом разрезе г. Кунгура покровные отложения представлены четвертичными аллювиально-делювиальными отложениями и карстообвальными отложениями неоген-четвертичного возраста (Катаев, 2010).



**Рис. 1.** Типы геологических разрезов территории г. Кунгура. Условные обозначения: 1 – аллювиально-делювиальные отложения четвертичного возраста; 2 – карстово-обвальные отложения неоген-четвертичного возраста; 3 – сульфатные отложения иренского горизонта; 4 – сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта; 5 – карбонатные отложения филипповского горизонта (Катаев, 2010)



**Рис. 2.** Распространение типов геологического разреза и карстовых форм северной части территории г. Кунгура (Катаев, Ковалева, 2013; Катаев, 2010)

Аллювиально-делювиальные отложения представлены гравийно-галечниковым материалом, глинами, суглинками, песками, при этом аллювиальные отложения имеют сплошное распространение на всей территории г. Кунгура, а делювиальные распространены на крутых склонах речных долин. Карстообвальные отложения характеризуются уплотненными, сцементированными обломками сульфатного и карбонатного состава широкого фракционного спектра (от дресвы до глыб), часто с примесью песчано-глинистого

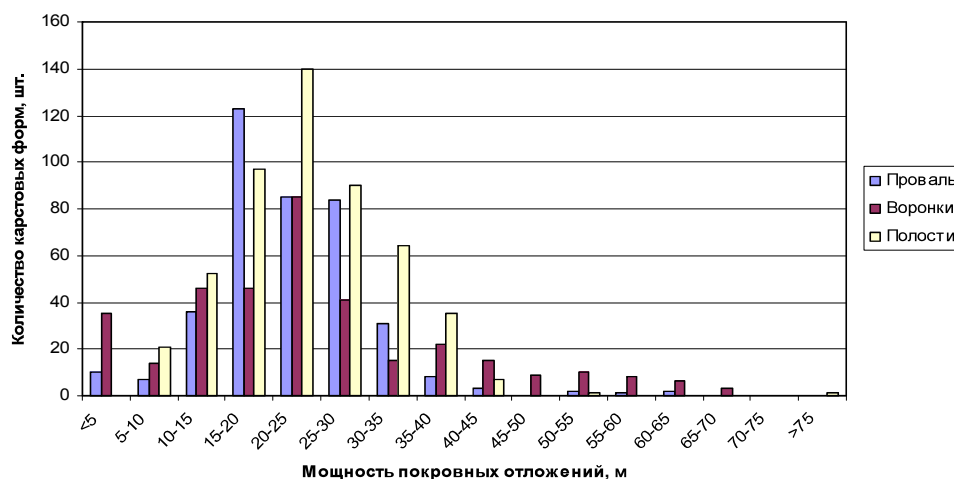
и гравийного материала в подошве толщи. Особенностью данной толщи является то, что эта покровная толща сама является объектом развития карстового процесса.

Мощность перекрывающих отложений на территории г. Кунгура может достигать более 75 м. Однако наибольшее количество подземных и поверхностных карстопроявлений приурочено к интервалу от 5,0 до 25,0 м (рис. 3).

При анализе литологии покровных отложений особое значение имеет наличие в их составе локальных водоупоров, препятствующих инфильтрации атмосферных осадков в карстующийся массив.

*Глубина залегания и минерализация подземных вод.* При анализе гидрогеологических аспектов карстопроявлений важно понять, какие подземные воды оказывают наибольшее влияние на интенсивность развития карстовых процессов. На территории г. Кунгура присутствуют подземные воды четвертичного аллювиально-делювиального водоносного комплекса, неоген-четвертичного комплекса и воды иренской сульфатно-карбонатной серии, приуроченные к иренскому горизонту.

Подземные воды аллювиально-делювиального водоносного комплекса развиты на глубинах от 2,0 до 20,0 м с минерализацией от 1,5 до 2,6 г/дм<sup>3</sup>, глубина залегания подземных вод карстово-обвальных отложений колеблется от 10,0 до 70,0 м при минерализации от 1,9 до 2,3 г/дм<sup>3</sup>. Подземные воды иренской сульфатно-карбонатной серии залегают на глубинах от 25,0 до 40,0 м и имеют минерализацию до 16 г/дм<sup>3</sup>. Но основной особенностью всех водоносных горизонтов является то, что они интенсивно подпитываются поверхностными водами за счет инфильтрационных вод в период снеготаяния, а также за счет паводковых вод рек Сылвы и Ирени. В основном питание паводковыми водами происходит в отношении вод иренской сульфатно-карбонатной серии, поэтому они играют наиболее значительную роль в формировании закономерностей развития и распределения пространственных особенностей залегания поверхностных и подземных карстовых форм.



**Рис. 3.** Частота встречаемости карстовых форм в зависимости от мощности покровных отложений (Катаев, 2010)

*Интенсивность техногенного воздействия.* Изучение техногенной нагрузки на территорию г. Кунгура заключалось в следующем. Территория города была разбита на квадраты площадью  $1 \text{ км}^2$ . В пределах выделенных территориальных единиц рассчитывалась суммарная длина водопроводящих систем (тепло- и водоснабжение, канализация), а также количество поверхностных и подземных карстопроявлений. На основании расчетов определялись участки территории города, где интенсивность проявления карстовых процессов совпала с интенсивностью техногенной нагрузки (рис. 4), что, в свою очередь, свидетельствует о значимости данной оценки. В подтверждение этому можно привести тот факт, что в квадрате с максимальной техногенной нагрузкой в декабре 2003 г. образовался весьма крупный карстовый провал, о чем уже было сказано во введении (Худеньких, 2010).

### **Изучение карстовых процессов на месторождениях строительного гипса**

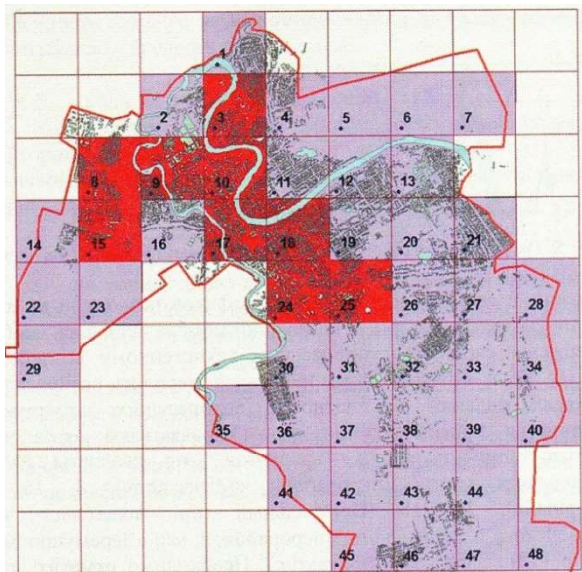
Применительно к месторождениям, где полезные ископаемые представлены карстующимися породами (в частности гипсом), в настоящее время не созданы документы, рекомендуемые или устанавливающие комплекс методов, направленный на цели непосредственно мониторинга карстовых процессов, а не масштабных геологических изысканий. В сложившейся практике проведения

мониторинга карстовых процессов в основном происходит лишь только фиксация новых карстовых образований, так как службы мониторинга не располагают необходимыми ресурсами для проведения полноценного мониторинга карстовых процессов. Таким образом, для обеспечения регулярных наблюдений и прогноза развития карстовых процессов при освоении недр, системного использования накопленных знаний, повышения эффективности мониторинга необходимы исследования, направленные на совершенствование карстовой составляющей горно-геологического мониторинга (Хотченков, Батугин, 2013). Тем не менее на Соколино-Саркаевском месторождении гипса и ангидрита такой мониторинг был организован (Худеньких, 2021b).

Соколино-Саркаевское месторождение гипса и ангидрита расположено в Кунгурском муниципальном округе Пермского края. Полезная толща месторождения представлена сульфатными породами лунежской пачки иренского горизонта кунгурского яруса нижнего отдела пермской системы. Геологическое строение сульфатной толщи следующее. Верхняя часть представлена гипсами, которые через переходную гипсоангидритовую зону сменяют ангидриты в нижней части разреза. Мощность сульфатной лунежской пачки 40–45 м. Полезную толщу перекрывают вскрышные породы, представленные терригенными отложениями соликамского горизонта уфимского яруса нижнего отдела



пермской системы и четвертичными породами. Мощность вскрышных пород до 35 м.



**Рис. 4.** Участки в пределах северной части г. Кунгура наиболее подверженные техногенной нагрузке и карстовым процессам (Худеньких, 2010)

Так как геологическое строение месторождения ограничено полезной толщей, которая представляет собой сульфатный массив, то и изучение карстовых процессов сводится именно к нему. Исходя из этого, карстологическое изучение полезной толщи сводится к следующему:

- фиксация незаполненных карстовых пустот (их вертикальных размеров), положение в разрезе;
- литология и мощность перекрывающих пород;
- наличие/отсутствие источников поступления воды.

*Фиксация незаполненных карстовых пустот (их вертикальных размеров), положение в разрезе.* В данном контексте рассматриваются только незаполненные карстовые полости, так как именно они представляют собой реальную угрозу при открытой разработке месторождений строительного гипса. Заполненные обвално-карстовыми отложениями полости не берутся во внимание, поскольку не влияют на безопасность ведения горных работ. Формы поверхностного карста уничтожаются при снятии вскрышных пород, поэтому опасности также не представляют.

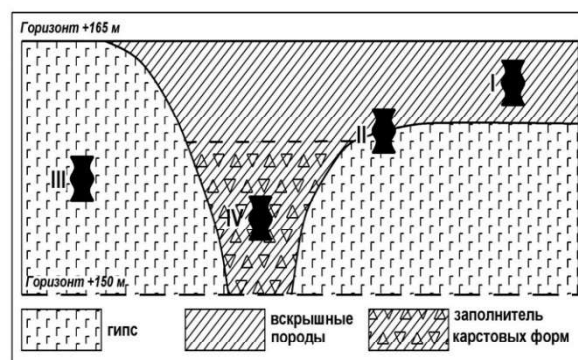
Так как разработка месторождений строительного гипса процесс весьма динамичный,

на первый план выносятся именно фиксации незаполненных карстовых форм, которые в значительной степени оказывают влияние на безопасность ведения горных работ. Наличие таких форм, как правило, выявляется в процессе бурения разведочных и взрывных скважин.

Выявленные при бурении незаполненные карстовые полости классифицируются по следующим показателям. По вертикальному размеру незаполненные полости можно разделить на три группы: (1) до 1 м; (2) 1–3 м; (3) более 3 м.

По положению в разрезе незаполненные карстовые полости можно разделить на четыре типа. К первому (I) типу относятся полости, выявленные в толще перекрывающих гипс вскрышных пород, ко второму (II) – полости, вскрытые на границе вскрышных пород и гипсовой толщи, третий (III) тип представляют полости, образовавшиеся непосредственно в гипсовой толще, к четвертому (IV) типу отнесены полости, образование которых произошло в заполнителе погребенных карстовых воронок (рис. 5).

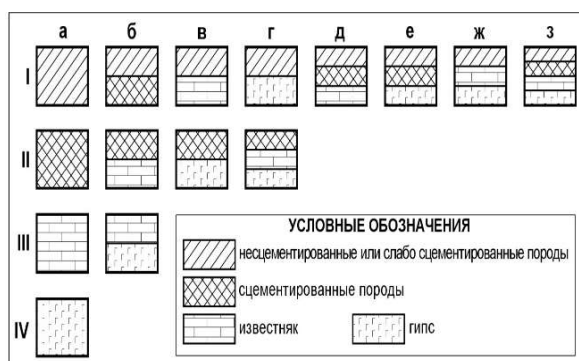
Наибольшее распространение на Соколино-Саркаевском месторождении получили полости II и III типов. Во вертикальном разрезе преобладают полости более 3 м.



**Рис. 5.** Положение в разрезе незаполненных карстовых полостей (Худеньких, Катаев, 2021)

*Литология и мощность перекрывающих пород* характеризуют степень возможности образования провальных явлений на поверхности добычных уступов.

Основные типы перекрытия представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Типы перекрытия незаполненных карстовых полостей (Khudenkikh, Kataev, 2021)

Мощности перекрытия ранжируются следующим образом: (1) до 1 м; (2) 1–3 м; (3) более 3 м.

На Соколино-Саркаевском месторождении наибольшее распространение имеют перекрытия I типа мощностью от 2,0 до 4,0 м.

*Наличие/отсутствие источников поступления воды.* Полезная толща Соколино-Саркаевского месторождения гипса и ангидрита не обводнена. В редких случаях скважинами вскрываются подземные локальные участки скопления подземных вод, которые, как правило, приурочены ко дну незаполненных карстовых полостей. Однако особое внимание заслуживают инфильтрационные воды, поступающие в сульфатный массив с поверхности во время весеннего снеготаяния, а также в дождливые осенние периоды. В результате наблюдений на Соколино-Саркаевском месторождении было выяснено, что сток происходит хаотично на всей площади месторождения. Было принято решение, согласно которому в указанные периоды в карьере организовывалась дренажная система для целенаправленного стока поверхностных дождевых и талых вод. Результатом стало то, что в осенний и весенний период провальное явление стали происходить гораздо реже, чем при хаотичном стоке (Худеньких, 2021b).

В принципе, изучение карстовых процессов как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса схожи. Но их сущность различна для оценки карстоопасности. Рассмотрим все аспекты изучения по порядку.

*Типы геологического разреза.* На урбанизированных территориях этот фактор изучается в целом: карстовые формы приурочены к сульфатным, карбонатным породам или их переслаиванию. На месторождениях строительного гипса изучение карстовых процессов привязано конкретно к одной карстующейся породе: к гипсу, как на Соколино-Саркаевском, или, например, к известняку (Чаньвинское месторождение), где изучение этих процессов также осложняет горные работы (Кудряшов и др., 1999). Причем при исследованиях в условиях города, как правило, редко делается привязка к положению незаполненной полости в геологическом разрезе: в самом массиве карстующихся пород (в сульфатах, карбонатах, в перекрывающих отложениях, на их контактах), в то время как на месторождениях строительного гипса этому аспекту уделяется значительное внимание. Хотя данные скважин, пройденных на урбанизированных территориях, позволяют это сделать.

Что касается фиксации поверхностных и подземных карстопроявлений, то здесь ситуация аналогична. Разница представляется только в доступности и своевременности информации. Многие изыскательские отчеты хранятся в архивах теперь частных организаций, которые не всегда предоставляют к ним доступ (это касается как городской территории, так и площадей месторождений строительного гипса). Поэтому фиксируются (особенно в условиях агломерации) далеко не все подземные карстопроявления. В отношении фиксации поверхностных карстопроявлений ситуация тоже складывается не лучшим образом для населенных пунктов. Многие граждане, на чьей частной территории произошел провал, не спешат об этом сообщать в соответствующие органы, дабы «избежать проблем». На месторождениях строительного гипса все поверхностные формы фиксируются в обязательном порядке, данные о них заносятся в специальный журнал.

Основная и весомая разница в фиксации подземных карстопроявлений заключается в количестве скважин, которые пройдены на застроенных территориях и площадях месторождений. Как уже отмечалось во введении, в пределах населенных пунктов скважины



бурятся по мере строительных изысканий, на месторождениях строительного гипса при разведочных работах скважины бурятся по определенной сетке: для разведки запасов категории С<sub>1</sub> – 100×100 м, при эксплуатационной разведке 25×25 м, а при взрывных работах по сетке 3,5×3,5 м. Это является существенным преимуществом в детальном изучении массива карстующихся пород.

Литология и мощность перекрывающих отложений. Данный этап исследований аналогичен для всех территорий. Следует только сделать ремарку о том, что мощность и литология перекрытия в пределах урбанизированных территорий рассматривается в полном варианте (на всю мощность разреза), а на месторождениях строительного гипса она анализируется в пределах первого вскрываемого уступа полезной толщи. Например, этот параметр на Соколино-Саркаеском месторождении крайне важен при отработке горизонта +165 м, где после проведения вскрышных работ вскрывается кровля гипсового пласта. Его поверхность далека от горизонтальной, поэтому мощность и литология вскрышных пород приобретает весьма важное значение при карстологической оценке.

*Глубина залегания и минерализация подземных вод.* Безусловно, это важный фактор в условиях застроенных территорий. Однако, месторождения строительного гипса Пермского края не обводнены (Худеньких, 2018). Тем не менее месторождения, где сульфатная толща залегает ниже уровня рек и водохранилищ, из-за повышенной закарстованности и сильной обводненности признаны непригодными для эксплуатации (Гвоздецкий, 1972). Особое внимание на месторождениях строительного гипса уделяется инфильтрационным водам и, в частности, их организованному стоку. В условиях городской застройки этому параметру вообще не уделяется никакого внимания.

*Интенсивность техногенного воздействия.* На урбанизированных территориях этот фактор подчас оказывается решающим. Утечки из водопроводящих систем напрямую активизируют карстовые процессы, что в результате приводит к катастрофическим последствиям.

На месторождениях строительного гипса основным фактором техногенного воздействия следует отнести вскрышные работы. После удаления вскрышных пород поверхность сульфатного массива обнажается, обеспечивая практически беспрепятственный доступ поверхностных вод в карстующийся массив. Это, в свою очередь, способствует активизации карстовых процессов, следствием чего являются провалы на поверхности уступов (рис. 7).

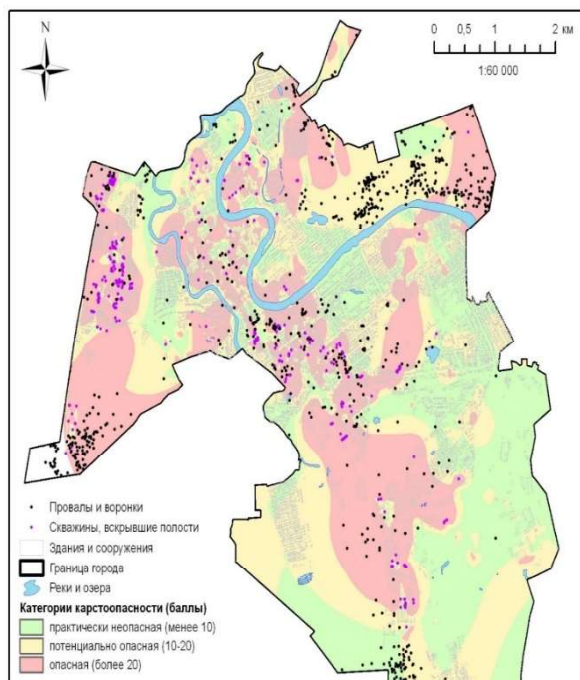


**Рис. 7.** Карстовый провал на горизонте +165 м, образовавшийся после снятия вскрышных пород в период весеннего снеготаяния (Соколино-Саркаевское месторождение гипса и ангидрита, фото К.О. Худеньких)

Разнятся также и техногенные воздействия, которые в условиях населенных пунктов сводятся к утечкам из водопроводящих конструкций, а на месторождениях – к ведению вскрышных пород.

### **Обсуждение результатов. Возможность применения результатов изучения карстовых процессов на месторождениях строительного гипса на урбанизированных территориях**

Карстологические исследования, проведенные на территории г. Кунгура, позволили выделить опасные интервалы прогнозных показателей для каждого типа разреза, представленные в табл. 1.



**Рис. 8.** Интегральная карта карстоопасности территории г. Кунгура, построенная с применением экспертного подхода по результатам балльной оценки (Щербаков, Катаев, 2011)

Для графического отображения результатов используется балльная система оценки тех или иных параметров. Суть ее в следующем. Территории, относящиеся к опасному интервалу, кодируются баллом 2, к неопасному – 1. Суммирование баллов по разным

показателям дает некоторую обобщенную числовую характеристику опасности. Следовательно, подобная оценка обеспечивает относительно целостное представление о степени карстовой опасности: чем больше суммарный балл по всем анализируемым показателям, тем выше степень карстоопасности, и наоборот. Результатом является интегральная карта карстоопасности, построенная с применением экспертного подхода по результатам балльной оценки (рис. 8).

Исследования карста, выполненные на Соколино-Саркаевском месторождении гипса и ангидрита, также позволили сформулировать категории и критерии степени опасности карстопроявлений (табл. 2). Однако критерии, приведенные в табл. 2, на месторождениях строительного гипса могут применяться лишь к тем участкам, на которых полностью проведены вскрышные работы. Для Соколино-Саркаевского месторождения – это горизонт +165 м, который принят как кровля разработки гипсового пласта полезной сульфатной толщи.

Источником данных для карстологического прогноза в основном являются разведочные скважины. Результатом анализа бурения в графическом варианте становятся карты карстоопасности, аналогичные представленной на рис. 8.

**Таблица 1.** Фрагмент перечня опасных интервалов значений прогнозных показателей для территории г. Кунгур (Катаев, Ковалева, 2013)

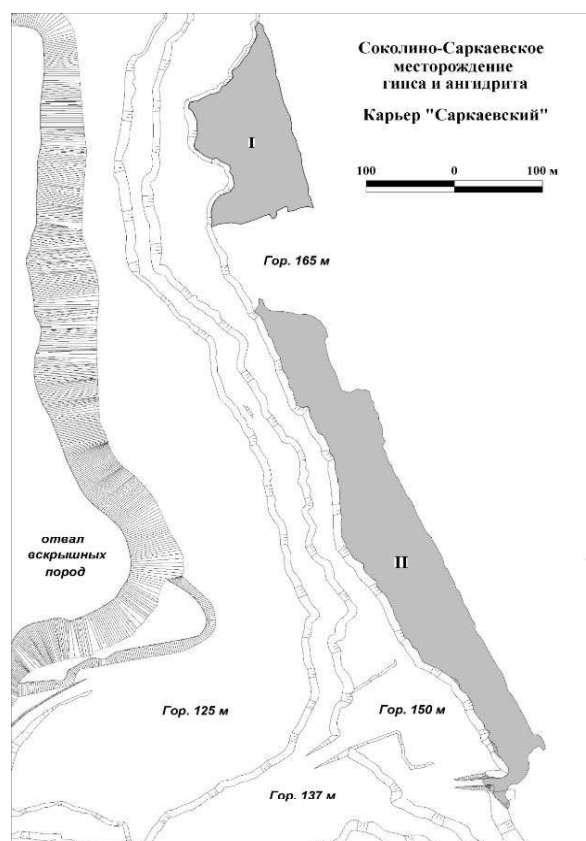
Показатель	Обобщенные показатели	Показатели по типам геологического разреза					
		I	III	IV	V	VI	VII
Мощность четвертичных отложений, м	5–25	<5	10–15	20–25	10–15	10–15	5–15
Мощность неоген-четвертичных отложений, м	<20	<5	<5	-	до 20	до 15	5–10
Мощность перекрывающих отложений, м	10–35	<5	10–15	15–30	15–25	до 35	15–35
Глубина залегания вод четвертичного аллювиально-делювиального комплекса, м	2–8	6–8	4–6; 8–10	2–4	2–8	6–8	2–8
Глубина залегания вод неоген-четвертичных обвальнокарстовых отложений, м	10–40	-	-	-	10–30	10–20	20–30
Глубина залегания подземных вод иренских отложений, м	20–40, >70	-	20–40	>70	20–40	-	20–40

**Таблица 2.** Категории и критерии степени опасности карстопроявлений, выявленных на Соколино-Саркаевском месторождении (Khudenkikh, Kataev, 2021)

Категория опасности	Типы карста по положению в разрезе	Типы карстовых полостей по наличию и положению заполнителя	Типы положения в разрезе незаполненных карстовых полостей	Вертикальный размер незаполненных полостей	Типы перекрывающих пород	Мощность перекрывающих пород, м
наиболее опасные	подземный	незаполненные и смешанные, где заполнитель расположен в нижней части полости	полости, расположенные на границе вскрышных пород и гипсовой толщи, в толще перекрывающих гипс вскрышных пород, в гипсе	более 3 м	рыхлые нецементированные, слабо цементированные	менее 1 м
опасные	подземный	незаполненные и смешанные, где заполнитель расположен в нижней части полости	полости, расположенные на границе вскрышных пород и гипсовой толщи, в толще перекрывающих гипс вскрышных пород, в гипсе	1–3 м	цементированные; гипс	1–3 м
наименее опасные	поверхностный открытый и закрытый, подземный	заполненные и смешанные, заполнитель расположен в верхней части полости	полости в заполнителе погребенных карстовых воронок	менее 1 м	известняк	более 3 м

Но наиболее полную информацию о подземных карстопроявлениях на месторождениях строительного гипса содержат данные сопровождающей эксплуатационной разведки, к которой относится бурение взрывных скважин. Такие скважины в пределах взрывных блоков бурятся по сетке 3,5×3,5 м, что позволяет в полной мере оценить особенности геологического строения гипсовой толщи, связанных с карстовыми процессами (Худеньких К.О., 2020; Худеньких К.О., 2021а).

На Соколино-Саркаевском месторождении гипса и ангидрита геологическое сопровождение бурения взрывных скважин внедрено с 2018 г. В период с 2018 г. по 2021 г. включительно (за 4 года) было отработано 2 участка гипсовой толщи в карьере «Саркаевский» общей площадью 58345 м<sup>2</sup> (0,058345 км<sup>2</sup>) (рис. 9). При бурении скважин фиксировались провалы бурового инструмента, которые интерпретировались как незаполненные карстовые полости (далее – НКП). Всего за указанный период было зафиксировано 1855 НКП. Таким образом, на отработанном пространстве плотность незаполненных подземных карстопроявлений составила 31793 шт./км<sup>2</sup>. Эта цифра ошеломляет, тем не менее это факт. При этом преобладающий вертикальный размер полостей более 3 м.



**Рис. 9.** Отработанные участки по гипсовой толще в карьере «Саркаевский» Соколино-Саркаевского месторождения (обозначены римскими цифрами)

В данном случае следует сделать поправку на морфологию НКП. На Соколино-Саркаевском месторождении в гипсовой толще

широко развиты вертикальные карстовые каналы, размеры поперечников которых варьируются от нескольких сантиметров до 2 м. Можно предположить, что провалы бурового инструмента связаны с наличием таких каналов, а также с широкими устьями незаполненных субвертикальных трещин, которые, по сути, не являются карстовыми полостями. Но даже если (чисто гипотетически, таких данных пока еще нет, т.к. их трудно получить) причислить 2/3 выявленных провалов бурового инструмента к вертикальным карстовым каналам и трещинам, то плотность карстовых форм составит более 10000 шт./км<sup>2</sup>, что тоже является весьма значительным показателем.

Таким образом, на месторождениях строительного гипса имеется весьма обширный массив геолого-карстологических данных, который может быть применен для урбанизированных территорий методом аналогии.

В качестве примера приведем следующее. Геологическое строение Соколино-

Саркаевского месторождения гипса и ангидрита соответствует III и VII типам геологического разреза территории г. Кунгура (рис. 1). Несмотря на то, что на Соколино-Саркаевском месторождении первая от поверхности земли сульфатная толща приурочена к лунежской пачке иренского горизонта кунгурского яруса, а на территории г. Кунгура к демидковской пачке того же горизонта, это не является принципиальным, т.к. обе пачки имеют одинаковое строение: сверху гипс, который сменяется ангидритом в нижней части разреза (Худеньких К.О., 2019). Перекрыты эти пачки также породами примерно одинакового состава четвертичного и неоген-четвертичного возраста.

Следовательно, мы можем предположить, что на территории г. Кунгура в контурах распространения III и VII типов разреза закарстованность залегающей первой от поверхности демидковской сульфатной пачки будет гораздо больше, чем рассчитанная по имеющимся данным (табл. 3).

**Таблица 3.** Распределение типов разреза по площади и плотности карстопроявлений на территории г. Кунгур (Катаев и др., 2009)

Тип геологического разреза	Площадь		Плотность провалов, шт./км <sup>2</sup>	Плотность воронок, шт./км <sup>2</sup>	Плотность полостей, шт./км <sup>2</sup>	Суммарная плотность всех карстопроявлений, шт./км <sup>2</sup>
	км <sup>2</sup>	%				
I	0,23	0,60	30,43	65,22	-	95,65
II	1,14	2,99	-	-	-	-
III	0,02	0,05	-	-	-	-
IV	1,29	3,38	7,75	26,36	24,81	58,91
V	24,31	63,74	13,08	13,82	17,11	44,01
VI	9,55	25,04	2,30	1,47	0,21	3,98
VII	1,60	4,20	21,88	1,25	35,00	58,13

В пределах территорий, сложенных по I, II и III типу геологического разреза, подземные карстовые полости не зафиксированы. На территории распространения VII типа геологического разреза скважинами при инженерно-геологических изысканиях вскрыто 56 карстовых полостей из них 16 полостей (28,6%) без заполнителя. Также можно предположить, что большая часть подземных незаполненных карстопроявлений имеет вертикальные размеры более 3 м. При этом нельзя забывать то, что большинство НКП могут представлять собой вертикальные карстовые каналы и незаполненные вертикальные трещины. Это пока открытый вопрос, который требует свое решение в будущем.

С другой стороны, исследования карста, проводимые на урбанизированных территориях, несомненно, могут быть применимы на месторождениях строительного гипса. В этом аспекте карстологические исследования наиболее целесообразно приурочить к различным этапам и стадиям геологоразведочных работ, которые регламентирует соответствующее Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям. Согласно этому документу, в зависимости от целей процесс геологического изучения недр подразделяется на 3 этапа и 5 стадий.

Этап I. Работы общегеологического и минералогического назначения

*Стадия 1. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых.* На данной стадии карстологические исследования сводятся к анализу различной информации о региональных геологических исследованиях различной направленности, картографического материала, которые позволяют районировать крупные территориальные единицы (например, Пермский край) по степени карстоопасности и риску хозяйственного освоения. При этом определяются не только ареалы распространения строительного (и не только) гипса, но и оценивается степень закарстованности гипсовой толщи в первом приближении. Масштаб исследований на этом этапе от 1:1500000 до 1:50000. Так, для территории Пермского края в рамках госбюджетных программ был создан целый комплекс карт карстологической направленности.

Этап II. Поиски и оценка месторождений

*Стадия 2. Поисковые работы.* На данной стадии на основании полученной на I этапе информации выделяются перспективные участки, в границах которых бурятся разведочные скважины. Здесь применимы также методы фиксации поверхностной закарстованности, которые активно используются на урбанизированных территориях. Масштаб картирования увеличивается до 1:10000 и даже 1:5000.

*Стадия 3. Оценочные работы.* В рамках этой стадии производится оценка всех данных, полученных на предыдущей стадии, результатом чего является оконтуривание полезной сульфатной толщи в виде прогнозных ресурсов. Закарстованность гипсоносных отложений на данной стадии можно охарактеризовать по плотности поверхностных и подземных карстопроявлений, наличием тектонических аномалий, трещиноватости, гидрогеологических условий, что активно применяется в условиях агломерации. Масштаб исследований аналогичен стадии 2.

Этап III. Разведка и освоение месторождений

*Стадия 4. Разведка месторождений.*  
*Стадия 5. Эксплуатационная разведка.* Карстологические исследования, проводимые на месторождениях строительного гипса на данных стадиях, весьма подробно охарактеризованы выше. Как уже было отмечено, изучение карста на месторождениях в целом совпадает с методами, применяемыми на урбанизированных территориях, различия лишь в объеме получаемых фактических данных о карстопроявлениях, который на гипсовых месторождениях значительно выше.

Таким образом, методы исследования карста, проводимые на урбанизированных территориях и на месторождениях строительного гипса, способны значительно дополнять друг друга, что важно для прогнозирования опасных явлений, связанных с карстовыми процессами.

### Заключение

Изучение карстовых процессов как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса преследует единые цели – прогнозирование карстоопасных участков и оценку их опасности. Построение прогнозной территориальной модели должно базироваться на углубленном анализе пространственного распределения карстовых форм в зависимости от строения массива горных пород. Именно состояние закарстованного массива в первую очередь определяет интенсивность и направленность протекания карстового процесса.

Для достижения этой цели организуются системы карстологического мониторинга, которые включают в себя различные базы данных, синхронизированные с картографическими материалами, что реализуется в виде ГИС-проектов. Суть мониторинговых исследований как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса сводится к единому: создание мощной информационной основы о состоянии геологической среды, в которую включены сведения, объединенные в единую систему и предназначенные для обоснования опорной наблюдательной сети, прогнозных



мероприятий и выбора конкретного инженерного или управленческого решения.

Сравнительный анализ изучения карстовых процессов на урбанизированных территориях и месторождениях строительного гипса показал, что в целом они мало отличаются друг от друга, но количество фактических данных о морфологических и морфометрических параметрах карстопроявлений (особенно подземных) отличается в разы. Это связано с тем, что на месторождениях строительного гипса весьма интенсивно проводится бурение скважин (разведочных, взрывных) в течение всего года, в то время как на урбанизированных территориях буровые работы производятся гораздо реже в основном при проведении инженерно-геологических изысканий под строительство. При этом из нескольких скважин коренные карстующиеся породы вскрывает только одна. На месторождениях разведочные и взрывные скважины вскрывают полезную закарстованную толщину на всю ее мощность.

Поверхностные формы фиксируются, но в условиях агломерации им уделяется гораздо большее внимание, нежели на месторождениях строительного гипса. В границах урбанизированных территорий оцениваются плотность отрицательных карстовых форм, интенсивность их проявления за различные периоды времени. На гипсовых месторождениях такие наблюдения ведутся, но их оценка не проводится.

Кроме фиксации различных карстопоявлений проводится изучение типов геологического разреза, литологии и мощности перекрывающих некарстующихся отложений, гидрогеологические условия. При этом выявляется приуроченность карстопоявлений к различным геолого-гидрогеологическим условиям разреза.

Особое значение на урбанизированных территориях имеет антропогенное воздействие, т.к. именно этот фактор оказывает прямое влияние на активизацию карстовых процессов, приводящих к провальным явлениям в условиях населенных пунктов. В условиях месторождений строительного гипса этот фактор является второстепенным и связан, в основном, с удалением вскрышных пород.

На месторождениях строительного гипса имеется весьма обширный массив геолого-

карстологических данных, который может быть применен для урбанизированных территорий методом аналогии. Но в большинстве случаев эти данные недоступны для ученых-карстоведов, т.к. они оседают в производственных отчетах в архивах предприятий, ведущих разработку месторождений.

С другой стороны, методы изучения, применяемые на урбанизированных территориях, широко освещены в публикуемой литературе и могут применяться на всех этапах и стадиях разведочных работ и в процессе эксплуатации месторождений строительного гипса.

Таким образом, исследования карста, проводимые как на урбанизированных территориях, так и на месторождениях строительного гипса в результате их объединения, могут способствовать прогнозной оценке еще не освоенных территорий с целью их хозяйственного освоения в различных целях в будущем.

#### Библиографический список

*Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.

*Гвоздецкий Н.А.* Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 392 с.

*Дурнаева В.Н., Смирнов А.И.* Методы ведения карстологического мониторинга на южном Урале и Предуралье // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология – 2019). Материалы XV Международной научно-технической конференции. Уфа: Издательство Уфимского государственного авиационного технического университета, 2019. С. 255–264.

*Кадебская О.И., Кадебский Ю.В., Пятунин М.С.* Создание базы данных инженерно-геологической информации и её значение для нужд города. Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий/ Материалы международного симпозиума. Екатеринбург: АКВА ПРЕСС, 2001а. Т. 2. С. 767–772.

*Кадебская О.И., Кадебский Ю.В., Пятунин М.С.* Создание компьютерного банка данных инженерно-геологической и карстологической информации в г. Кунгуре / Сергеевские чтения. Выпуск 3 / Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22–23 марта 2001). М: Геос, 2001б. С. 367–369.

Камалов В.Г., Барышников В.И., Челтанов П.Е. Анализ аварийных случаев разрушения зданий и сооружений на Уфимском «полуострове» // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг. Материалы первой Общероссийской научно-практической конференции. М.: Издательство «Геомаркетинг», 2017. С. 79–85.

Катаев В.Н. Геология и карст города Кунгура: монография / В.Н. Катаев, О.И. Кадебская; Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН. Пермь, 2010. 236 с.

Катаев В.Н. Информационное обеспечение карстомониторинга // 13-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2011» [труды конгресса]. В 2 т. Т. 1 / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т; отв. ред. Е.В. Копосов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. С. 153–155.

Катаев В.Н. Основы создания системы мониторинга закарстованных территорий (на примере Пермского края) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 1. 2013. С. 25–41.

Катаев В.Н., Ковалёва Т.Г. Роль экспертной оценки в карстологическом прогнозе. Фундаментальные исследования. № 8. 2013. С. 1130–1135.

Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М., Ковалева Т.Г. Влияние геологического строения территории и пространственное распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгур) // Вестник Пермского университета. Геология. Вып. 3. 2009. С. 77–93.

Кудряшов А.И., Фомин В.И., Колесников В.П. Чаньвинское месторождение известняков / Пермь: Издательский дом «Типография купца Тарасова», 1999. 81 с.

Худеньких К.О. Метод построения гипсометрических планов кровли гипса в пределах взрывных блоков // Вестник пермского университета. Геология. Т. 19. № 1. 2020. С. 73–80. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.73.

Худеньких К.О. Методические основы проведения сопровождающей эксплуатационной разведки на месторождениях гипса (на примере Соколино-Саркаевского месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 1. 2021а. С. 90–101. DOI: 10.25018/0236–1493–2021–1–0–90–101.

Худеньких К.О. Мониторинг развития карстовых процессов при разработке месторождений строительного гипса // Известия УГГУ. 4(64). 2021б. С. 116–129. DOI 10.21440/2307–2091–2021–4–116–129.

Худеньких К.О. Оценка плотности карстопоявлений и техногенной нагрузки на территорию г. Кунгура // Карстовые процессы: закономерности развития, мониторинг, инженерно-

геологические методы исследований: Материалы научно-практической конференции. Кунгур, 2010. С. 100–108.

Худеньких К.О. Характеристика месторождений гипса Кунгурского района Пермского края // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. науч. ст. / под общей редакцией П.А. Красильникова; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. Вып. 2(39). 2019. С. 318–325.

Худеньких К.О. Характеристика месторождений гипса Пермского края // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Сборник статей / 12-я Межрегиональная научно-практическая конференция, Уфа, 21–23 мая 2018 г. СПб: Свое издательство, 2018. С. 363–365.

Хотченков Е.В., Батугин А.С. Метод горно-экологического мониторинга, учитывающий влияние геодинамически опасных зон (ГОЗ) на развитие карстовых процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). № 5. 2013. 8 с.

Шаврина Е.В. Мониторинг экзогенных геологических процессов в сульфатном карсте // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 134–138.

Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгура) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. Т. 153, кн. 1. 2011. С. 203–224.

Щербаков С.В., Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ковалева Т.Г. Поверхностные деформации в условиях покрытого карста: комплексирование методов оценки морфометрических параметров в инженерных целях // Инженерная геология. Т. 13, № 6. 2018. С. 10–23. <https://doi.org/10.25296/1993–5056–2018–13–6–10–23>.

Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. 348 с.

Banks V.J. et al. 2015. Media, sinkholes, and the UK National karst database // NCKRI Symposium 5. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Multidisciplinary conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. National Cave and Karst Research Institute. Carlsbad, USA. P. 223–230. DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/9780991000951.1033>.

Berthelin R., Hartmann A. The shallow subsurface of karst systems: review and directions // Eurokarst 2018, Besançon. Advances in Karst Science.

Springer, Cham. 2020. P. 61–68. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1_7).

*Khudenkikh K.O., Kataev V.N.* Karst as dangerous engineering-geological process at field development of open-mining gypsum deposits // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, V. 021. 2021. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152013>.

*Kim Y., Nam B., Zheng Q.* An artificial neural network approach to sinkhole hazard assessment for East Central Florida // NCKRI Symposium 8. Proceedings of the 16<sup>th</sup> multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of

karst. Carlsbad, USA. 2020. P. 145–154. DOI: <https://doi.org/10.5038/9781733375313.1031>.

*Pan Z. et al.* Review of monitoring and early warning technologies for cover-collapse sinkholes // NCKRI Symposium 7. Proceedings of the 15<sup>th</sup> Multidisciplinary conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. National Cave and Karst Research Institute. Carlsbad, USA. 2018. P. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.5038/9780991000982.1072>.

*Taminskas J., Marcinkevicius V.* Karst geoindicators of environment change: The case of Lithuania // Environmental Geology. V. 42. 2002. P. 757–766. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0553-8>.

## Comparative Analysis of the Study of Karst Processes in Urbanized Areas and Gypsum Plaster Deposits

**K.O. Khudenkikh<sup>a</sup>, V.N. Kataev<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Ergach LLC, 10 Zavodskaya Str., Kungur district, Perm region, 617437, Russia  
E-mail: [ms002@ergach0.ru](mailto:ms002@ergach0.ru)

<sup>b</sup>Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm, 614900, Russia  
E-mail: [kataev@psu.ru](mailto:kataev@psu.ru)

Natural and anthropogenic factors leading to the collapse zones formation and methods of studying karst processes for urbanized territories and deposits of gypsum plaster are characterized. Comparative analysis shows that the study of karst processes both in urbanized areas and in deposits of gypsum plaster are similar, but their essence is different for the assessment of the karst hazard. The possibility of applying the results of studying karst processes in urbanized territories to deposits of gypsum plaster and vice versa is considered. Recommended karstological studies at all ages and stages of geological exploration are given.

Keywords: *comparative analysis; karst processes; urbanized territories; deposits of gypsum plaster; karstological research.*

### References

*Anikeev A.V.* 2017. Provaly i voronki osedaniya v karstvykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska [Collapse hazards and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. RUDN, Moskva, p. 328. (in Russian)

*Banks V.J. et al.* 2015. Media, sinkholes, and the UK National karst database. NCKRI Symposium 5. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Multidisciplinary conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. National Cave and Karst Research Institute. Carlsbad, USA, pp. 223–230. doi: [10.5038/9780991000951.1033](https://doi.org/10.5038/9780991000951.1033).

*Berthelin R. and Hartmann A.* 2020. The shallow subsurface of karst systems: review and directions. Eurokarst 2018, Besançon. Advances in Karst Science. Springer, Cham. 61–68. doi: [10.1007/978-3-030-14015-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1_7).

*Gvozdetsky N.A.* 1972. Probemy izucheniya karsta i praktika [Problems in study of karst and practice]. Mysl, Moskva, p. 392. (in Russian)

*Durnaeva V.N., Smirnov A.I.* 2019. Metody vedeniya karstologicheskogo monitoringa na yuzhnom Urale i Predurale [Methods of karst monitoring conduction in South Urals and pre-Urals]. USATU, Ufa, pp. 255–264. (in Russian)

*Ekzogennyye geologicheskie opasnosti* [Exogenous geological hazards]. 2002. Eds. Kutepov V.M., Sheko M. KRUK, Moskva, p. 348. (in Russian)

*Kadebskaya O.I., Kadebsky Yu.V., Pyatunin M.S.* 2001. Sozdaniye bazy dannykh inzhenerno-geologicheskoy informatsii i eyo znachenie dlya nuzhd goroda [Creation of database of engineering-geological information and its significance for city needs]. AQUA PRESS. Ekaterinburg. Vol. 2, pp. 767–772. (in Russian)

*Kadebskaya O.I., Kadebsky Yu.V., Pyatunin M.S.* 2001. Sozdanie kompyuternogo banka dannykh

inzhenerno-geologicheskoy i karstologicheskoy informatsii v g. Kungure [Creation of e-data bank of engineering-geological and carstological information in Kungur city]. Geos. Moscow, pp. 367–369. (in Russian)

*Kamalov V.G., Baryshnikov V.I., Chelpanov P.E.* 2017. Analiz avariynykh sluchaev razrusheniya zdaniy i sooruzheniy na Ufimskom “poluostrove” [Analysis of buildings and constructions failures in Ufa’s «peninsula»]. Geomarketing Publ. Moscow, pp. 79–85. (in Russian)

*Kataev V.N., Kadebskaya O.I.* 2010. Geologiya i karst goroda Kungura [Geology and karst of Kungur city]. PGU, GI UrO RAN. Perm, p. 236. (in Russian)

*Kataev V.N.* 2012. Informatsionnoe obespechenie karstomonitoringa [Information support of karst monitoring]. NNGASU. N. Novgorod, Vol. 1, pp. 153–155. (in Russian)

*Kataev V.N.* 2013. Osnovy sozdaniya sistemy monitoring zakarstovannykh territoriy (na primere Permskogo kraya) [Basics of monitoring system arrangement in karst-prone territories (on the example of Perm region)]. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 1:25–41. (in Russian)

*Kataev V.N., Kovaleva T.G.* 2013. Rol ekspertnoy otsenki v karstologicheskom prognoze [Role of the expert estimation in the karst forecast]. Fundamentalnye issledovaniya. 8:1130–1135. (in Russian)

*Kataev V.N., Scherbakov S.V., Zolotarev D.R., Likhaya O.M., Kovaleva T.G.* 2009. Vliyaniye geologicheskogo stroeniya territorii i prostranstvennoye raspredeleniye karstovykh form (na primere territorii g. Kungur) [The impact of territorial geological structure and areal development of karst forms]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 3:77–93. (in Russian)

*Khotchenkov E.V., Batugin A.S.* 2013. Metod gorno-ekologicheskogo monitoringa uchityvayushchego vliyaniye geodinamicheskoy opasnykh zon (GOZ) na razvitiye karstovykh protsessov [Method of mining and environmental monitoring taking into account the influence of the geodynamic hazard zones (GHZ) on the karst processes development]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. 5:8. (in Russian)

*Khudenkikh K.O.* 2021a. Metodicheskie osnovy provedeniya soprovozhdayushchey ekspluatatsionnoy razvedki na mestorozhdeniyakh gipsa (na primere Sokolino-Sarkaevskogo mestorozhdeniya) [Framework guideline for accompanying operational exploration in gypsum mines (a case study of the Sokolino-Sarkaevskoe deposit)]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. 1:90–101. (in Russian)

*Khudenkikh K.O.* 2019. Kharakteristika mestorozhdeniy gipsa Kungurskogo rayona Permskogo kraya [Description of gypsum deposits of Kungur district of the Perm kray]. PGNIU, Perm, pp. 318–325. (in Russian)

*Khudenkikh K.O.* 2018. Kharakteristika mestorozhdeniy gipsa Permskogo kraya [Characteristics of gypsum deposits of Perm kray]. Svoe Izdatelstvo, St. Petersburg, pp. 363–365. (in Russian)

*Khudenkikh K.O.* 2020. Metod postroeniya gipso-metricheskikh planov krovli gipsa v predelakh vzryvnykh blokov [Method of generation the gypsum top hypsometric map within blasting blocks]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 19(1):73–80. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.19.1.73

*Khudenkikh K.O.* 2021b. Monitoring razvitiya karstovykh protsessov pri razrabotke mestorozhdeniy stroitel'nogo gipsa [Monitoring of karst processes development during gypsum mining]. Izvestiya UGU. 4(64):116–129. doi: 10.21440/2307–2091–2021–4–116–129. (in Russian)

*Khudenkikh K.O.* 2010. Otsenka plotnosti karstoprovyavleniy i tekhnogennoy nagruzki na territoriyu g. Kungura [Assessment of karst forms density and technogenic load to the territory of Kungur city]. Kungur, pp. 100–108. (in Russian)

*Khudenkikh K.O., Kataev V.N.* 2021. Karst as dangerous engineering-geological process at field development of open-mining gypsum deposits. In: Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, 021:1–10. doi: 10.3997/2214–4609.202152013.

*Kim Y., Nam B., Zheng Q.* 2020. An artificial neural network approach to sinkhole hazard assessment for East Central Florida. In: NCKRI Symposium 8. Proceedings of the 16<sup>th</sup> multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Carlsbad, USA, pp. 145–154. doi: 10.5038/9781733375313.1031.

*Kudryashov A.I., Fomin V.I., Kolesnikov V.P.* 1999. Chanvinskoe mestorozhdeniye izvestnyakov [Chanvinskoe limestone deposit]. Perm, p. 81. (in Russian)

*Pan Z. et al.* 2018. Review of monitoring and early warning technologies for cover-collapse sinkholes. In: NCKRI Symposium 7. Proceedings of the 15<sup>th</sup> Multidisciplinary conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. National Cave and Karst Research Institute. Carlsbad, USA, pp. 159–165. doi: 10.5038/9780991000982.1072.

*Scherbakov S.V., Kataev V.N.* 2011. Integralnaya otsenka karstoopasnosti urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Kungura) [Integral assessment of karst hazards in urban territory (by the example of Kungur

city). Uchen. zap. Kazan. univ. Ser. Estestv. nauki. 153(1):203–224. (in Russian)

*Scherbakov S.V., Kataev V.N., Zolotarev D.R., Kovaleva T.G.* 2018. Poverkhnostnye deformatsii v usloviyakh pokrytogo karsta: kompleksirovanie metodov otsenki morfometricheskikh parametrov v inzhenernykh tselyakh [Covered karst landforms: integration of methods of morphometric parameters estimation for engineering purposes]. Inzhenernaya

geologiya. XIII(6):10–23. (in Russian)  
doi:10.25296/1993–5056–2018–13–6–10–23.

*Shavrina E.V.* 2015. Monitoring ekzogennykh geologicheskikh protsessov v sulfatnom karste [Monitoring of exogenous geological processes in sulfate karst]. PGNIU, Perm, pp. 134–138. (in Russian)

*Taminskas J., Marcinkevicius V.* 2002. Karst geoindicators of environment change: The case of Lithuania. Environmental Geology. 42:757–766. doi: 10.1007/s00254–002–0553–8.