

# ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГИДРАТАЦИИ АНГИДРИТОВ И ЭРОЗИИ СУЛЬФАТНЫХ ПОРОД В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ СУЛЬФАТНОГО КАРСТА РЕЧНЫХ ДОЛИН

## ENGINEERING-GEOLOGICAL ASSESSMENT OF ANHYDRITES HYDRATION AND SULPHATE ROCKS EROSION IN SULPHATE KARST REGIONS OF RIVER VALLEYS

НЕЩЕТКИН М.О.

Заместитель директора ООО НПЦ «КАРСТ», г. Дзержинск, karst@sinn.ru

NESHCHETKIN M.O.

Deputy director of the «KARST» SPC LLC, Dzerzhinsk, karst@sinn.ru

### Ключевые слова:

карст; эрозия сульфатных пород; гидратация ангидритов.

### Key words:

karst; erosion of sulphate rocks; hydration of anhydrites.

### Аннотация

В статье рассматривается инженерно-геологическая оценка гидратации ангидритов и эрозии сульфатных пород как основных критериев, отражающих глубину и активность сульфатного карста речных долин, на примере Окско-Волжского междуречья (Нижегородская область) и долины реки Бабка (Кунгурский район Пермского края). Автор считает, что целесообразно при обновлении нормативной базы пересмотреть требования к инженерно-геологическим изысканиям на закарстованных территориях.

### Введение

В соответствии с действующими нормативными документами (СП 47.13330.2012, СП 116.13330.2012) категория устойчивости территории по интенсивности провалообразования и средним диаметрам провалов считается основным параметром для выбора вида противокарстовой защиты.

Проблема оценки карстовой опасности для объектов, расположенных на застроенных территориях, заключается в том, что природный рельеф в результате хозяйственной деятельности человека сильно нарушен, а поверхностные карстопоявления уничтожены (распаханы, засыпаны). При этом планы топографических съемок прошлых лет, отражающие природный рельеф, на протяжении многих лет уничтожались. В этих условиях исследователь (изыскатель) зачастую не имеет никаких данных для оценки поверхностной закарстованности и определения категории устойчивости территории по интенсивности провалообразования и средним диаметрам провалов.

В таких случаях единственной информацией о карсте являются данные региональных буровых работ или результаты буровых работ на площадке проектируемого строительства, от правильной интерпретации которых зависит достоверность оценки карстовой опасности.

Очевидно, что карстовая опасность для проектируемых сооружений заключается в их возможных деформациях или разрушениях в результате карстовых провалов. Источником провала обычно является опасная карстовая полость в основании сооружения, поэтому основной задачей изысканий является обнаружение таких полостей и/или выявление мест их вероятного нахождения.

Результаты инженерных изысканий и научные исследования свидетельствуют о том, что сульфатный карст в современных и древних (погребенных) речных долинах тесно связан с историей образования и развития этих долин, а опасные карстовые полости сосредоточены в эрозионных элементах кровли сульфатной толщи.

Формирование речных долин происходило в несколько эрозионных циклов, а обусловленность такой цикличности тектоническим режимом для Русской равнины сформулирована Г.В. Обедиентовой [13].

### Abstract

The article considers engineering-geological assessment of anhydrites hydration and sulphate rocks erosion as the main criteria reflecting the depth and activity of sulphate karst in river valleys by the example of Oka-Volga interfluvium (Nizhny Novgorod Region) and the Babka River valley (Kungur region, Perm Krai). The author thinks that for updating of the normative base it is advisable to review the requirements for engineering-geological surveys in karst areas.



Сульфатные породы характеризуются высокой растворимостью и низкой прочностью, поэтому в течение эрозионного цикла происходит интенсивное расчленение сульфатной толщи с образованием специфического эрозионно-карстового рельефа, представленного эрозионными останцами и локальными врезами, в бортах которых формируются карстовые полости разнообразной морфологии.

Сульфатные породы нередко имеют сложный минеральный состав. Кроме гипса и ангидрита они включают карбонаты, хлориды, а также обломочный материал. Условия кристаллизации основных минералов и особенности поступления обломочного материала обуславливают многообразие текстур сульфатных пород.

Целью исследований автора является изучение особенностей строения закарстованных сульфатных толщ в речных долинах для выявления условий нахождения и развития опасных карстовых полостей.

### **Условия осадконакопления сульфатных пород и гидратация ангидритов**

Образование первичных гипсов и ангидритов происходит при деградации мелководного лагунно-морского седиментационного бассейна в условиях аридного климата, что подтверждается литолого-палеогеографическими построениями бассейнов пермского времени в пределах центральных и восточных районов Русской платформы, выполненными В.И. Игнатьевым [8].

Нормальная последовательность выпадения в осадок солей из морской воды представлена следующим рядом: карбонат кальция → сульфат кальция → хлористый натрий → сульфаты и хлориды магния → бромистый натрий и хлористый калий [19]. Присутствие в растворе NaCl и MgCl<sub>2</sub> смещает температурную границу кристаллизации ангидрита с 63,0–63,5 °С до 25–30 °С. При этом избыток NaCl, связывая воду, препятствует образованию гипса, что приводит к первичному осаждению ангидрита. Ангидрит в условиях поступления агрессивных вод гидратируется, превращаясь в гипс. До сих пор нет единого мнения относительно механизма гидратации ангидрита.

В таблице 1 отражено мнение ряда исследователей об условиях образования, гидратации и дегидратации сульфатных пород.

Л.М. Бирина [2], изучая структуры и текстуры сульфатных отложений на больших глубинах, пришла к мнению, что гипсы и ангидриты имеют метасоматическое происхождение.

К.А. Горбунова [4] со ссылкой на М. Гольдмана (M. Goldman, 1952) приводит сведения о том, что признаков увеличения объема при гидратации ангидритов не наблюдается в связи с удалением части сульфатов кальция (возможно, путем растворения).

Автор настоящей статьи, изучая с коллегами особенности геологического строения районов развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (в Окско-Волжском междуречье Нижегородской области, в долине реки Бабка в Кунгурском районе Пермского края), пришел к выводу, что ангидрит этих районов является первично осажденным. В пользу такого утверждения свидетельствует геологическое строение исследованных районов, которое отражено в таблицах 2 и 3.

Сульфатные породы Окско-Волжского междуречья и долины реки Бабка (левого притока реки Сылва) формировались при деградации остаточного морского бассейна сакмарского и кунгурского времени соответственно.

В сакмарское время для Окско-Волжского междуречья существовали относительно спокойные тектонические условия. Удаленность этой территории от областей сноса продуктов разрушения Уральских гор привела к формированию сульфатных пород с незначительным включением механических примесей. В геологическом разрезе междуречья на доломитах, гипсо-доломитах, гипсах тагубского горизонта залегают ангидриты стерлитамакского горизонта нижней перми мощностью 50–101 м. Этот разрез свидетельствует о нормальной последовательности выпадения осадков: доломиты → гипсо-доломиты → гипсы → ангидриты. Постепенная смена гипсов ангидритами обусловлена нарастающей концентрацией хлоридов. Следует допустить, что на последней стадии деградации лагуны в осадок выпадали хлориды, которые и завершили разрез сакмарского яруса [8].

В разрезах Окско-Волжского междуречья выдержанные отложения хлоридов отсутствуют, однако линзы и вкрапления NaCl нередко отмечаются в ангидритах Балахинской низины, занимающей центральную часть Окско-Волжского междуречья, где на протяжении 19-го — начала 20-го веков в районе города Балахна осуществлялась промышленная добыча каменной соли. Наличие NaCl в ангидритах отмечается практически в каждой разведочной скважине, определяется визуально или «на вкус» и подтверждается химическими анализами трещинно-карстовых вод. По результатам анализа водных вытяжек из ангидритов Дзержинского района С.И. Парфенов [14] рассчитал, что содержание хлора в поровых водах достигает 80 г/дм<sup>3</sup>.

Локальные месторождения каменной соли с мощностью пластов NaCl до 7–8 м расположены значительно севернее исследуемой территории. По мнению автора, наличие NaCl в ангидритах убедительно свидетельствует о первичности ангидритов и невозможности их образования в результате «дегидратации» гипса.

В долине реки Бабка карстованию подвержены сульфатные и карбонатные отложения иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми. На исследуемой территории иренский горизонт представлен в полном объеме и состоит из семи сменяющих друг друга пачек сульфатных и карбонатных пород [11]. В аккумулятивной части долины в нижнем течении Бабки, сложенной неоген-четвертичными отложениями, верхние 3–4 пачки иренского горизонта размыты частично или полностью.

Близость к Уралу и беспокойный тектонический режим обусловили периодическое (циклическое) поступление в кунгурский бассейн морской воды и продуктов разрушения Уральских гор герцинского орогенеза. Такая обстановка вызвала чередование в разрезе карбонатных и сульфатных пачек и формирование пестрых текстур сульфатных пород. Здесь в каждом цикле осадкообразования отмечается нормальная последовательность выпадения осадков: сначала известняки и доломиты, затем гипсы и ангидриты. В долине Бабки отложения хлоридов также отсутствуют, но в ангидритах отмечаются рассеянные включения NaCl.

Гидратация ангидритов долины реки Бабка и Окско-Волжского междуречья, начавшаяся с послекунгурского

и послесакмарского времени, соответственно, обусловила образование вторичных гипсов различной мощности.

Структурно-текстурные характеристики вторичных гипсов зоны гидратации, изученные А.А. Сафроновой и О.Б. Нещеткиным, отличаются большим разнообразием [12], что связано как с условиями образования сульфатных пород, наличием в них сопутствующих минералов и примесей, так и со степенью их преобразования при гидратации и перекристаллизации.

Процесс гидратации ангидритов способствует проявлению первичных текстурных признаков сульфатных

пород. Так, слабообразимые (неясные) первичные прожилковые и гнездово-прожилковые текстуры плотных монолитных мелкозернистых ангидритов в зоне гидратации при переходе ангидритов в гипс становятся более отчетливыми (ясными), сохраняя при этом рисунок первичной текстуры ангидрита, а структура гипса изменяется от мелкозернистой до крупнозернистой.

Нередко в интенсивно закарстованных зонах гипсы характеризуются брекчиевидными текстурами, формирование которых, по мнению автора, связано с заполнением гнезд, трещин, каналов в интенсивно закарстованной по-

Таблица 1

Основные представления об условиях образования сульфатных пород		
Автор(ы), лит. источник	Условия образования сульфатных пород	Условия гидратации ангидрита и дегидратации гипса
М.С. Швецов [19]	<ul style="list-style-type: none"> <li>засушливый климат;</li> <li>изолированное от океана море-лагуна;</li> <li>при температуре менее 66 °С выпадает в осадок гипс, более 66 °С — ангидрит;</li> <li>в присутствии NaCl ангидрит выпадает при 30 °С, а в присутствии MgCl<sub>2</sub> — при 25 °С</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>первоначально преимущественно образуется ангидрит, в результате гидратации которого образуется гипс;</li> <li>гидратация ангидрита на глубине около 150 м сопровождается увеличением объема на 60% и формированием текстур смятия;</li> <li>при погружении на значительные глубины гипс дегидратируется и образуется ангидрит</li> </ul>
А.Г. Бетехтин [1]	<ul style="list-style-type: none"> <li>гипс и ангидрит образуются в лагунных и отмирающих морских бассейнах;</li> <li>гипс образуется на начальных стадиях испарения, а при достижении определенных концентраций NaCl и MgCl<sub>2</sub> начинается осаждение ангидрита</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>гипс может образовываться при гидратации ангидрита на глубине около 100–150 м;</li> <li>ангидрит в присутствии воды при атмосферном давлении постепенно переходит в гипс, увеличиваясь в объеме на величину до 30%, что сопровождается местными нарушениями залегания толщ;</li> <li>большие толщии ангидрита, вероятно, могли образоваться путем дегидратации гипса на больших глубинах;</li> <li>в лабораторных условиях обезвоживание гипса начинается при 80–90 °С, а при температурах 120–140 °С образуется полугидрат CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O, именуемый алебастром</li> </ul>
У.А. Дир, Р.А. Хауи, Дж. Зусман [6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>при температуре ниже 42 °С из чистого раствора при испарении осаждается гипс, а при более высокой температуре — ангидрит;</li> <li>присутствие NaCl понижает температуру начала образования ангидрита</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>дегидратация гипса при температуре 60–90 °С приводит к образованию ангидрита с уменьшением объема породы;</li> <li>давление, равное весу пород мощностью около 5 500 м, не приводит к дегидратации гипса;</li> <li>образование гипса путем гидратации ангидрита происходит в присутствии воды в объеме, равном 50% от объема ангидрита, при этом образовавшийся гипс занимает на 9% меньший объем, чем ангидрит + вода</li> </ul>
С.И. Парфенов [14]	<ul style="list-style-type: none"> <li>гипс образуется в результате хомогенной седиментации, является первично осажденной породой;</li> <li>гипсы Дзержинского района подверглись ангидритизации вследствие воздействия хлоридно-кальциевых рассолов на глубине 200–500 м</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>«гипсотизация» ангидрита сопровождается выносом до 40% сульфата кальция исходной породы;</li> <li>увеличение объема породы при гидратации не происходит;</li> <li>для образования значительных масс перекристаллизованных гипсов требуется весьма длительное время (в районе Дзержинска эти гипсы образовались еще до наступления четвертичного времени)</li> </ul>
Е.К. Лазаренко [10]	<ul style="list-style-type: none"> <li>гипс и ангидрит — типичные осадки морского происхождения, образующиеся при «отпнуровывании» участка моря;</li> <li>выпадение гипса в осадок из чистого раствора происходит при температуре ниже 63 °С;</li> <li>выпадение ангидрита из чистого раствора происходит при температуре выше 63,5 °С, а в присутствии NaCl и MgCl<sub>2</sub> — при температуре выше 25–30 °С</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>обезвоживание гипса — образование «метаморфического» ангидрита;</li> <li>гидратация ангидрита сопровождается увеличением объема на 30%, с чем связана складчатость и трещиноватость</li> </ul>
Н.А. Смольянинов [16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>при усыхании обособленных участков моря;</li> <li>из чистых водных растворов при температуре выше 63 °С выпадает ангидрит, при более низких температурах (11–36 °С) — гипс</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>гидратация ангидрита сопровождается увеличением объема более чем на 30%</li> </ul>
Геологический словарь [3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>ангидрит осаждается из растворов при температуре выше 63,5 °С, в присутствии NaCl — при температуре выше 30 °С;</li> <li>гипс осаждается из растворов при температуре 63,5 °С, в присутствии NaCl — при 30 °С</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>гидратация ангидрита приводит к образованию вторичного гипса</li> </ul>
Ю.В. Сементовский, А.В. Шишкин [15]	<ul style="list-style-type: none"> <li>гипс и ангидрит образуются в осолоненных бассейнах на начальных стадиях галогенеза</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>во влажной среде ангидрит медленно поглощает воду и переходит в гипс с увеличением объема на величину до 30%</li> </ul>
О.Б. Нещеткин, А.А. Сафронова [12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>ангидрит является первично осажденной породой лагунно-морского происхождения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>гидратация ангидрита не сопровождается увеличением объема породы</li> </ul>



Таблица 2

роде обломочным глинисто-карбонатным заполнителем с последующим связыванием его сульфатным цементом.

Исследования образцов керна разведочных скважин в рассматриваемых районах, характеризующихся принципиально различными условиями осадконакопления, не выявили геологических, минералогических и текстурных признаков дегидратации гипса, а наличие рассеянного NaCl в ангидритах убедительно свидетельствует о его первичности.

Распространенное мнение об увеличении объема породы при гидратации ангидритов не имеет подтверждения достоверными данными наблюдений. Не подтвердилось оно и при детальном исследовании образцов керна сульфатных пород, выполненном автором и его коллегами. Например, на рисунке 1 представлена фотография зоны гидратации сакмарских ангидритов, в которой отсутствуют признаки деформаций пород, а переход от гипса к ангидриту резкий.

На рисунке 2 представлена фотография зоны гидратации кунгурских ангидритов: в толще вторичного молочно-белого гипса отмечается реликт синего ангидрита, признаки деформаций пород отсутствуют, граница между гипсом и ангидритом резкая.

Если допустить, что при гидратации ангидрита происходит увеличение объема породы на 30–60%, то ее результатом должно быть полное разрушение породы, а не «увеличение» в объеме. В исследованных автором зонах гидратации не было обнаружено ни одного признака, указывающего на изменение объема породы. Отсутствие деформаций в зоне гидратации свидетельствует об «объемном балансе», т.е. образование вторичного гипса, имеющего больший размер структурной ячейки по сравнению с ангидритом [10], компенсируется удалением части вещества при растворении, что обуславливает сохранение объема породы.

Расчеты, выполненные автором, показывают, что объем элементарной ячейки гипса в 1,62 раза больше объема элементарной ячейки ангидрита. Такая существенная разница, вероятно, и привела многих исследователей к выводу об увеличении объема сульфатной породы при гидратации ангидритов. В таблице 4 приведены соотношения некоторых параметров ангидрита и гипса. Теоретические значения плотности гипса ( $2,31 \text{ г/см}^3$ ) и ангидрита ( $2,96 \text{ г/см}^3$ ) получены расчетным путем. Природная плотность гипсов и ангидритов в изученных образцах колеблется в широких пределах, что связано с особенностями сложения породы, количеством минералов-примесей, степенью гидратации, пористостью и др.

Исходя из условия неизменности объема породы при гидратации ангидрита и с учетом приведенных результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

1. При гидратации  $1 \text{ м}^3$  ангидрита, содержащего  $3,27 \cdot 10^{27}$  его элементарных ячеек, образуется  $1 \text{ м}^3$  гипса, содержащий  $2,02 \cdot 10^{27}$  элементарных ячеек гипса. Это свидетельствует об удалении из  $1 \text{ м}^3$  породы  $1,25 \cdot 10^{27}$  элементарных ячеек ангидрита, что в пересчете на массу ангидрита составляет 1,13 т, т.е. 38,17% от исходной массы ангидрита.

2. Поскольку молекула гипса имеет больший размер и иную форму кристаллической решетки по сравнению с ангидритом, процесс гидратации ангидрита и образования гипса протекает через жидкую фазу: растворение ангидрита → частичный вынос сульфата

Схематическое геологическое строение Окско-Волжского междуречья		
Геол. индекс	Характеристика отложений	Мощность, м
Q	Верхняя часть четвертичной аллювиальной толщи сложена кварцевыми песками различной крупности и суглинками, нижняя часть — разномерными и крупными кварцевыми песками, в подошве — с включением гравия и гальки	20÷50 и более
P <sub>2t</sub>	Глины, алевролиты, алевролиты	0÷20
P <sub>2kz</sub>	Известняки и доломиты, участками разрушенные до щебня, дресвы и муки или полностью размытые	0÷15
P <sub>1s</sub>	Стерлитамакский горизонт: гипсы, ангидриты	50÷101
	Тастубский горизонт: доломиты, гипсо-доломиты, гипсы	17÷48

кальция и других легко растворимых солей → кристаллизация гипса.

Результаты исследований сульфатных пород и выполненных расчетов позволяют сформулировать общие закономерности механизма гидратации ангидритов. Ангидриты как плотные слабопроницаемые поро-

Таблица 3

Схематическое геологическое строение долины реки Бабка (Кунгурский район Пермского края)		
Геол. индекс	Характеристика отложений	Мощность, м
Q	В пойме и на низких террасах — аллювий (суглинки, пески, гравийно-галечниковый горизонт), на высоких террасах — элювиально-делювиальные суглинки с включением щебня карбонатных и сульфатных пород	12÷30
N-Q	«Карстово-обвальные» отложения, представленные продуктами разрушения коренных пород: дресва, щебень, мука карбонатных и сульфатных пород с примесью песчано-глинистого материала	
P <sub>1k</sub> (иренский горизонт, включающий 7 пачек)	1. Луневская сульфатная пачка сложена гипсами и ангидритами	до 50÷60
	2. Тюйская карбонатная пачка представлена известняками и доломитами	5÷15
	3. Демидковская сульфатная пачка сложена в основном ангидритами, в кровле — гипсами и гипсо-ангидритами с линзами доломитов	15÷27
	4. Елкинская карбонатная пачка представлена обычно оолитовыми доломитами, сильно огипсованными	3÷7
	5. Шалашнинская сульфатная пачка сложена ангидритами и гипсами, встречаются линзы доломитов, часто огипсованных	до 12÷30
	6. Неволинская карбонатная пачка представлена светло-серыми и серыми доломитами, известняками, глинами. В кровле и подошве карбонатные породы сильно огипсованы	3÷15
	7. Ледяно-пещерская сульфатная пачка, в составе которой преобладают голубовато-серые мелкозернистые ангидриты, меньше распространены белые и серые гипсы, отмечаются линзы доломитов, прожилки селенита до 1–5 см, включения галита	12÷18



Рис. 1. Образцы керна из зоны гидратации сакмарских ангидритов Окско-Волжского междуречья (фото М.О. Нещеткина). Длина масштабной линейки — 10 см



Рис. 2. Образцы керна из зоны гидратации кунгурских ангидритов Пермского края (фото М.О. Нещеткина). Длина масштабной линейки — 10 см

ды в региональном плане являются водоупорами. Однако в любой породе имеется система пор, прожилков, редких трещин, которые обеспечивают наличие микроскопического пространства для нахождения в нем свободной воды. Слабая трещиноватость и малая пористость ангидритов обуславливают низкую скорость фильтрации, поэтому вода быстро насыщается ионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , при этом  $\text{NaCl}$  увеличивает сульфатную емкость раствора. Если учесть, что в межагрегатном пространстве ангидритов и по прожилкам ак-

тивная циркуляция воды невозможна, то вынос растворенного вещества из породы происходит диффузионным путем (по градиенту концентрации), что определяет крайне низкую скорость гидратации. В результате такого растворения ангидритов увеличивается их пористость. Преобладающий вынос ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  из порового раствора уменьшает его сульфатную емкость, что способствует началу вторичной кристаллизации сульфата кальция в форме гипса (вторичного гипса).

В изученных автором и его коллегами образцах керна зоны гидратации вторичный гипс нередко сохраняет облик первичной текстуры ангидрита, что свидетельствует о медленном (молекула за молекулой) «замещении» ангидрита гипсом. По мнению А.Н. Заварицкого [7], медленная скорость гидратации ангидритов обусловлена нарастающим кристаллизационным давлением.

### Типы гидратации ангидритов в условиях эрозии сульфатных пород

Процесс гидратации ангидритов в речных долинах зависит от глубины эрозии сульфатных пород, поэтому по условиям и по времени, в которых агрессивные воды воздействуют на толщу ангидритов, можно выделить два основных типа их гидратации — вертикальную и боковую в бортах эрозионных врезов и останцов.

*Вертикальная гидратация ангидритов* происходит при взаимодействии агрессивных вод с относительно выровненной поверхностью ангидритов или при контакте поверхности ангидритов с влажной воздушной средой в континентальных условиях. Процесс гидратации идет одновременно по всей поверхности пород сверху вниз, поэтому в кровле ангидритов формируется слой вторичных гипсов приблизительно одной мощности. Кроме того, вертикальная гидратация отмечается на контактах сульфатных пород с карбонатными прослоями (к ней приводит циркуляция вод в этих прослоях).

*Боковая гидратация ангидритов* начинается после эрозионного расчленения сульфатной толщи. Эрозионное расчленение поверхности ангидритов сопровождается формированием специфического эрозионно-карстового рельефа, в пределах которого сосредоточивается сток карстовых вод. Мощность зоны боковой гидратации в бортах врезов, как правило, значительно превышает толщину зоны вертикальной гидратации, что связано с большей проницаемостью толщи ангидритов вдоль напластования за счет чередования чистых ангидритов и ангидритов с прослоями и прожилками других минералов.

На рисунке 3 приведен геологический разрез, характерный для эрозионного типа карста Окско-Волжского

Таблица 4

Соотношения некоторых параметров ангидрита и гипса		
Показатель*	Расчет	Вывод
Отношение объемов элементарных ячеек гипса и ангидрита $V_g/V_a$	$495,15 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3 : (305,48 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3) = 1,62$	Элементарная ячейка гипса в 1,62 раза крупнее элементарной ячейки ангидрита
Отношение значений плотности ангидрита и гипса $\rho_a/\rho_g$	$2,96 \text{ г/см}^3 : 2,31 \text{ г/см}^3 = 1,28$	Плотность гипса в 1,28 раза меньше плотности ангидрита
Разница в количестве элементарных ячеек в $1 \text{ м}^3$ ангидрита и гипса ( $n_a - n_g$ )	$3,27 \cdot 10^{27} \text{ шт./м}^3 - 2,02 \cdot 10^{27} \text{ шт./м}^3 = 1,25 \cdot 10^{27} \text{ шт./м}^3$	Количество элементарных ячеек гипса в $1 \text{ м}^3$ на $1,25 \cdot 10^{27}$ меньше, чем ячеек ангидрита

\* Нижний индекс «а» — для ангидрита, нижний индекс «г» — для гипса



междуречья. При буровых работах был обнаружен глубокий погребенный эрозионно-карстовый врез, в бортах которого отмечались карстовые полости. В толще покровных четвертичных отложений были обнаружены погребенные карстовые формы, а на земной поверхности в проекции эрозионно-карстового вреза — карстовые воронки, заполненные техногенными грунтами.

Анализ распределения высотных отметок кровли гипсов (эрозионной поверхности) и глубин залегания ангидритов (глубин гидратации) на данном участке дал следующие результаты (рис. 4). Наблюдается двугорбое распределение отметок кровли гипсов, характерное для условий влияния одного выраженного фактора — эрозионного вреза в поверхности сульфатных пород. Область отметок 2,2–6,5 м в Балтийской системе высот (БС) соответствует глубокому эрозионному врезу, область 11,0–15,5 м БС — склонам глубоких врезов, 15,5–24,5 м БС — эрозионному склону сульфатных пород, 24,5–33,2 м БС — возвышенным останцам суль-

фатных пород. На кровле ангидритов отмечается аналогичное двугорбое распределение, что наглядно отражается и в разрезе: граница зоны гидратации закономерно изменяется, повторяя очертания эрозионного вреза (см. рис. 3).

Объемы карстовых полостей на этом участке (по данным тампонажа) составили 322–875 м<sup>3</sup> в области глубокого вреза и 16 м<sup>3</sup> на участке развития полостей в разрушенных казанских отложениях в пределах относительно выровненной поверхности сульфатных пород.

Геологический разрез по 2–3 скважинам (например, скважинам № 5, 14, 35) практически не отражает истинной закарстованности, и лишь характерные особенности зоны гидратации (увеличение глубины ее залегания и мощности, чередование ангидритов и зон гидратации) в правой части разреза «сигнализируют» о наличии неоднородности типа локального вреза.

На рисунке 5 представлен геологический разрез закарстованного участка в долине реки Бабка (Кунгурский

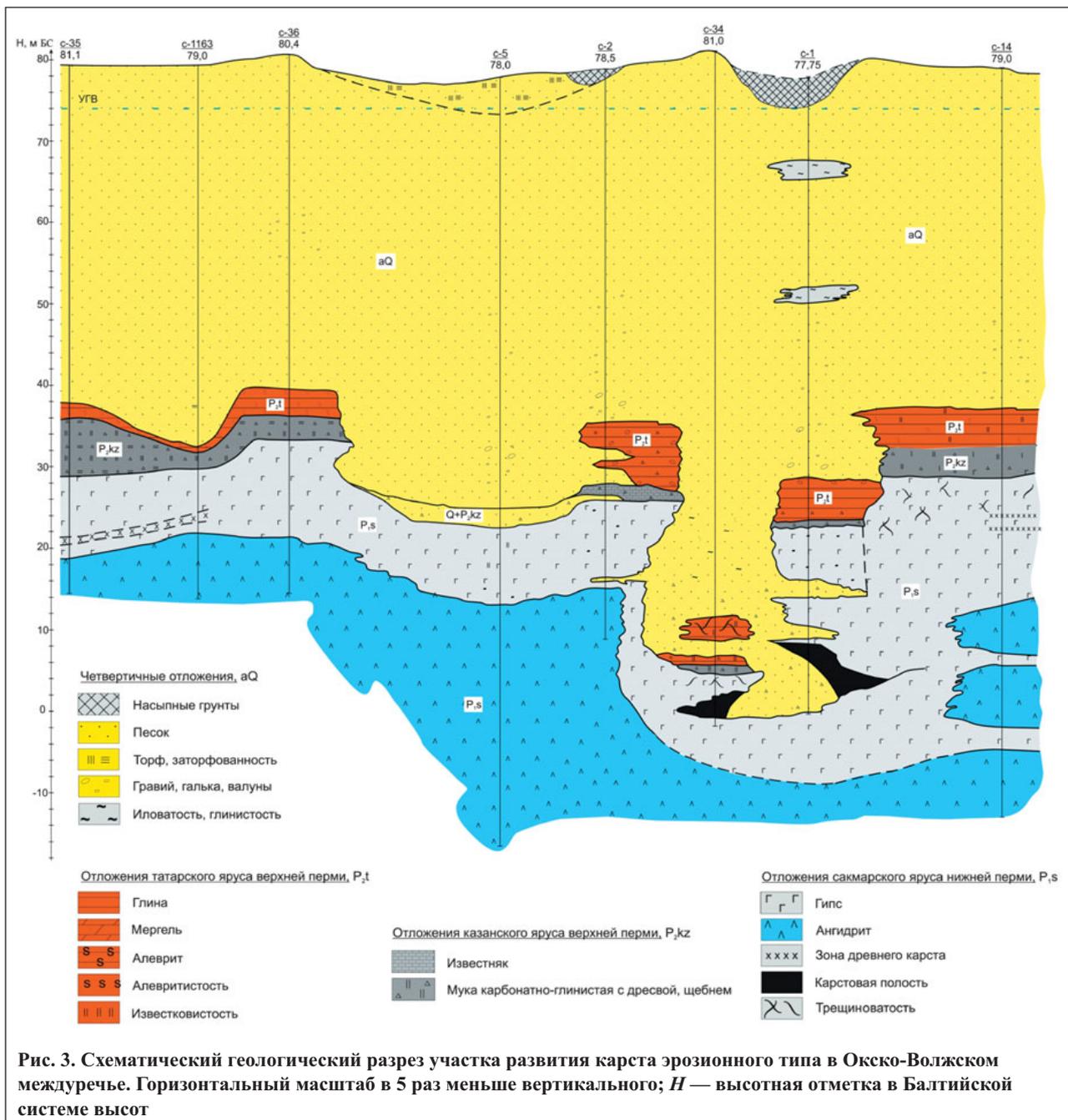
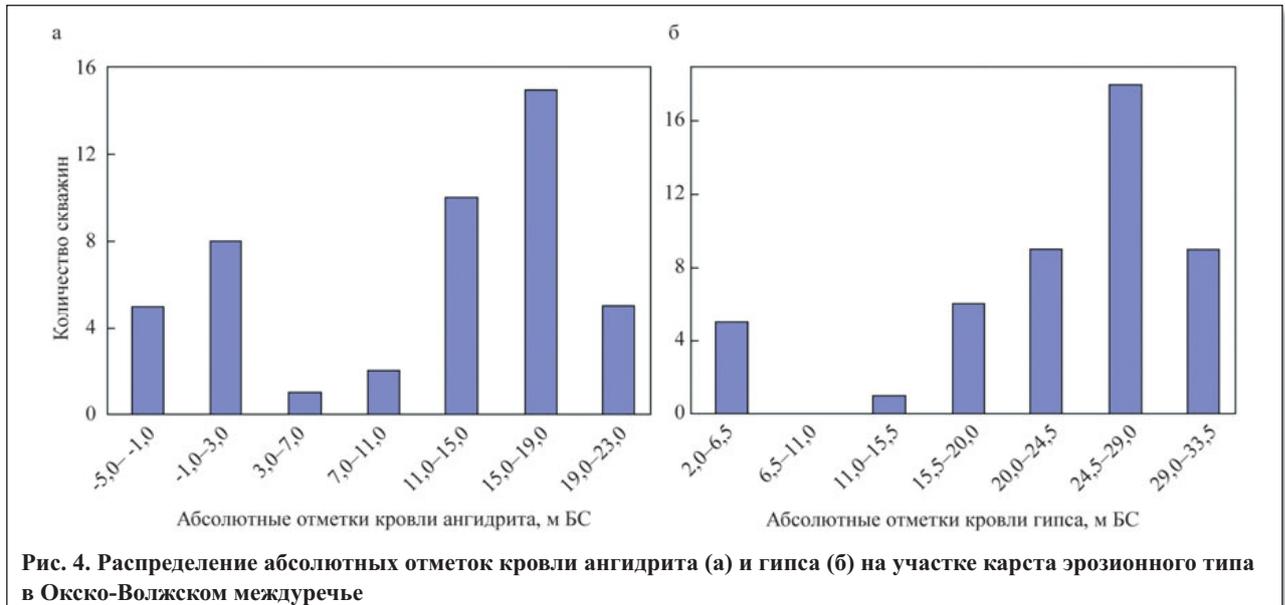


Рис. 3. Схематический геологический разрез участка развития карста эрозионного типа в Окско-Волжском междуречье. Горизонтальный масштаб в 5 раз меньше вертикального; *H* — высотная отметка в Балтийской системе высот



**Рис. 4.** Распределение абсолютных отметок кровли ангидрита (а) и гипса (б) на участке карста эрозионного типа в Окско-Волжском междуречье

район Пермского края). Указанный разрез наглядно иллюстрирует характер гидратации ангидритов в условиях переслаивания сульфатных и карбонатных отложений. Буровыми работами в борту древней карстовой котловины был выявлен древний карстовый провал, приуроченный к погребенному эрозионно-карстовому врезу. Максимальная высота карстовой полости на данном участке составила 14,7 м, а суммарный объем карстовых полостей по данным тампонажа — 2 900 м<sup>3</sup>.

Необходимо обратить особое внимание на то, что расстояние между скважинами составляет менее 10 м, а ширина опасных карстовых полостей — не более 5 м. Расстояние между крайними скважинами на разрезе равно 30 м. Эти скважины не встретили карстовых полостей, но выявили значительную неоднородность в сульфатной толще, а именно увеличение глубины гидратации в правой части разреза, в несколько раз превышающей глубину гидратации ангидритов в левой его части. Такая резкая литологическая неоднородность является надежным критерием для выявления местоположения локального вреза, который был обнаружен при буровых работах при сгущении расстояния между скважинами до 7–10 м. Кроме того, циркуляция агрессивных вод в карбонатных пачках привела к гидратации ангидритов в кровле и подошве этих пачек.

В практике инженерных изысканий автором с коллегами установлены десятки случаев обнаружения локальных врезов и опасных карстовых полостей с использованием такого параметра, как глубина гидратации ангидритов.

### Заключение

Причиной деформаций сооружений в карстовых районах является полная или частичная потеря несущей способности грунтов основания в результате выхода карстовой полости на земную поверхность в виде карстового провала или локального оседания, поэтому перед изысканиями должна стоять задача обнаружения таких полостей и/или обнаружение характерных признаков их наличия в геологическом разрезе.

Успешное решение этой задачи невозможно без правильной геологической модели эволюции сульфатных

пород. Основные положения модели, которой придерживается автор, таковы:

- ангидриты являются первично осажденными породами;
- гидратация ангидритов является необратимым процессом;
- сульфатный карст в речных долинах носит унаследованный характер всех эпох карстования;
- сульфатный карст в речных долинах наиболее активно развивается на участках эрозионных (эрозионно-карстовых) врезов;
- особенности строения зоны гидратации являются критериями для выявления этих врезов.

Гидратация ангидритов при формировании речных долин происходила на протяжении всех эрозионных циклов, которые обусловили глубокое расчленение поверхности карстующихся пород и создали благоприятные условия для развития карстовых полостей в останцах и бортах эрозионных врезов. Поэтому особенности залегания кровли ангидритов и изменения мощности зоны их гидратации являются универсальными индикаторами, отражающими суммарную глубину распространения карстового процесса за все эпохи развития карста. Основную роль в увеличении мощности зоны гидратации играет боковая гидратация по напластованию пород в бортах эрозионно-карстовых врезов. Следует учесть, что четвертичные эрозионные процессы на некоторых участках уничтожили, на некоторых — унаследовали, а на некоторых — затронули древнюю эрозионную сеть на поверхности карстующихся сульфатных пород. При этом дно погребенных эрозионно-карстовых врезов нередко залегает значительно ниже современного (четвертичного) базиса эрозии, что свидетельствует об их формировании в древние эпохи карстования.

Локальные врезы, формируясь в наиболее благоприятных условиях (при наличии сгущений тектонической трещиноватости, трещин бортового отпора, литологической неоднородности сульфатных пород), сосредоточивают сток трещинно-карстовых вод, что приводит к активному растворению бортов врезов и развитию в них карстовых полостей, в том числе значительных размеров.

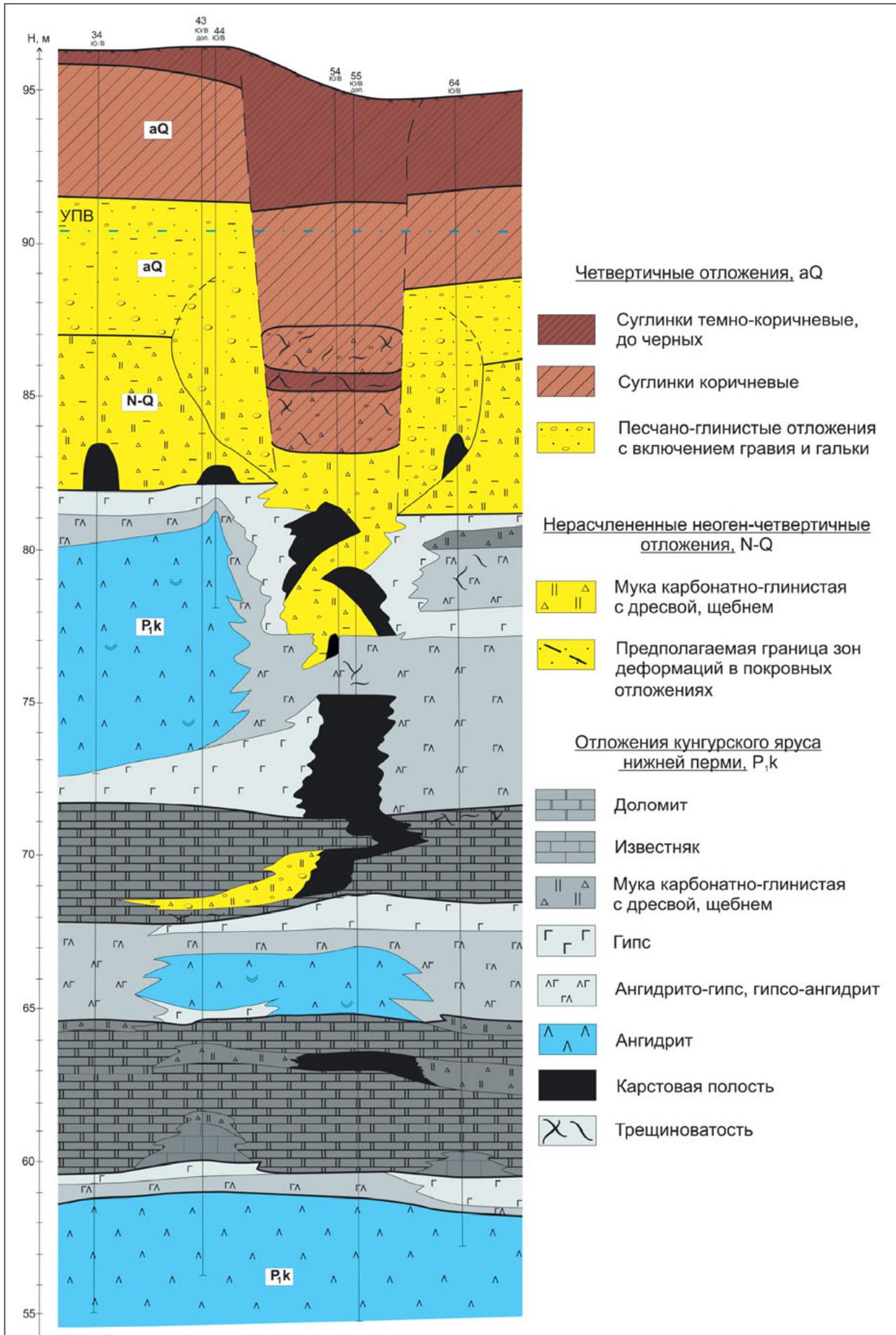


Рис. 5. Схематический геологический разрез участка развития карста эрозионного типа в долине реки Бабка в Кунгурском районе Пермского края. Горизонтальный масштаб в 2 раза меньше вертикального; Н — высотная отметка

Очевидно, что при выровненном залегании кровли карстующихся сульфатных пород практически отсутствуют условия для формирования и развития опасных карстовых полостей, а в области эрозионных врезов и останцов существуют наиболее благоприятные условия для развития опасных карстовых полостей и, следовательно, карстовых провалов, что иллюстрируется приведенными выше геологическими разрезами.

Исследованиями установлено, что ширина и глубина зоны гидратации ангидритов всегда превышает ширину и глубину эрозионного вреза в 2–3 раза и более, а линия кровли ангидритов в целом повторяет очертания эрозионной поверхности гипсов, поэтому установление глубины и распространенности зоны гидратации является важным поисковым критерием для выявления погребенных локальных врезов.

Таким образом, сульфатный карст речных долин является карстом эрозионного типа, формирование которого связано с развитием древней и современной эрозионной сети.

Граница зоны гидратации является своеобразным *базисом развития карста*, так как контролирует глубину развития подземной закарстованности и глубину эрозионного расчленения сульфатного массива. По наблюдениям автора и его коллег, базисом развития карста для Окско-Волжского междуречья является глубина гидратации ангидритов стерлитамакского горизонта сакмарского яруса нижней перми, для исследованных участков долины реки Бабка в Пермском крае — незатронутые гидратацией монолитные ангидриты иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми, ниже которых при многочисленных буровых работах не было зафиксировано ни одной опасной карстовой полости.

Для обнаружения опасных карстовых полостей или условий и мест их вероятного нахождения необходимо выполнение достаточного объема специальных буровых работ «на карст».

Нормативная документация по инженерным изысканиям (СП 47.13330.2012) не содержит точных и обязательных указаний по определению объемов буровых работ «на карст», а предлагает лишь общие требования к количеству скважин в зависимости от категории сложности инженерно-геологических условий. При этом расстояния между скважинами должны составлять от 25 до 100 м, а проходку скважин следует осуществлять до глубины на 3–5 м ниже зоны активного развития карста. СП 11-105-97, не являющийся в настоящее время документом обязательного применения, указывает, что часть скважин из общего их количества при изысканиях «на карст» предусматривается для изучения карста на больших глубинах (более 20–30 м), нередко значительно превышающих мощность сжимаемых зон оснований проектируемых зданий и сооружений.

Количество скважин «на карст» должно, по мнению автора, определяться размерами эрозионно-карстовых врезов. Многолетние научные исследования показали, что в условиях сульфатного карста речных долин ширина погребенных эрозионно-карстовых врезов может быть не более 10–20 м, а ширина зоны гидратации превышает ширину вреза в 2–3 раза. Поэтому расстояние между скважинами должно быть не более 20–30 м.

Очевидно, что для построения объемной модели геологического строения участка проектируемого строительства необходимо как минимум три скважины, для создания плоской модели (разреза) по какой-либо оси проектируемого сооружения требуется как минимум две скважины, а для приближенной оценки геологического строения нужна хотя бы одна скважина.

На основании вышеизложенного автор считает, что при обновлении нормативной базы целесообразно пересмотреть требования к инженерно-геологическим изысканиям на закарстованных территориях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: Государственное издательство геологической литературы, 1951. 542 с.
2. Бирина Л.М. Ангидриты в палеозое центральной части Русской платформы: атлас. М.: Наука, 1979. 124 с.
3. Геологический словарь (в 2-х томах). М.: Недра, 1973.
4. Горбунова К.А. Карст гипса СССР. Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. 84 с.
5. Даровских Н.А., Кудряшов А.И. Геология и поиски месторождений поделочного гипса. Пермь: МиГ, 2001. 161 с.
6. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. М.: Мир, 1965. Т. 5. 404 с.
7. Заварицкий А.Н. Гипс и ангидрит села Охлебинина / Избранные труды. Том 1. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 58–64.
8. Игнатьев В.И. Формирование Волго-Уральской антеклизы в Пермский период. Казань: Изд-во Казанского университета, 1976. 256 с.
9. Ильин А.Н., Нецеткин О.Б., Сафронова А.А. Геодинамика сульфатного карста Окско-Волжского междуречья / Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: материалы международного симпозиума. Том 1. Екатеринбург: Аква-пресс, 2001. С. 317–324.
10. Лазаренко Е.К. Курс минералогии. М.: Высшая школа, 1971. 608 с.
11. Лукин В.С., Ежов Ю.А. Карст и строительство в районе Кунгура. Методика изысканий и опыт строительства в карстовых областях. Пермь: Пермское книжное изд-во, 1975. 119 с.
12. Нецеткин О.Б., Сафронова А.А. Эволюция сульфатных пород и их классификация / Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: материалы международного симпозиума. Том 1. Екатеринбург: Аква-пресс, 2001. С. 310–316.
13. Обедиев Г.В. Формирование речных систем Русской равнины. М.: Недра, 1975. 174 с.
14. Парфенов С.И. Некоторые эпигенетические изменения и карст в породах гипс-ангидритовой субформации в районе г. Дзержинска: автореферат дис. .... канд. геол.-минер. наук. М.: Изд-во ПНИИИС, 1966. 19 с.
15. Сементовский Ю.В., Шишкин А.В. Минералогическое сырье. Гипс и ангидрит: справочник. М.: Геоинформмарк, 1998. 23 с.
16. Смольянинов Н.А. Практическое руководство по минералогии. М.: Недра, 1972. 360 с.
17. Справочное руководство по петрографии осадочных пород (в 2-х томах). Том 2 / под ред. Л.Б. Рухина. Л.: Изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1958. 520 с.
18. Фрей К. Минералогическая энциклопедия. Л.: Недра, 1985. 512 с.
19. Швецов М.С. Петрография осадочных пород. М.: Гостеолитиздат, 1948. 416 с.