

**УДК 550.8.053**

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА  
НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО ОПОРНОГО УЧАСТКА  
(ПЕРМСКИЙ КРАЙ)**

***Ерофеев Е. А., Катаев В. Н.***

*Пермский университет (ПГНИУ), Пермь, Россия*

*E-mail: erofeev-ea@yandex.ru, kataev@psu.ru*

В работе представлены результаты исследований по применению дистанционных и геофизических методов с целью выявления и изучения геологических закономерностей развития карста. Территорией исследований является Нижнеиренско-Ординский опорный участок развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста. Авторами рассмотрены практические аспекты расширения возможности применения дистанционных методов при инженерно-геологических изысканиях на закарстованных территориях, раскрыты и проиллюстрированы выявленные закономерности площадного распределения карстовых форм. Анализ и интерпретация материалов исследований выполнены при помощи пространственного анализа и математических методов.

**Ключевые слова:** карстовые формы, распределение, частота, структурный план, мощность отложений, кровля карстующихся отложений.

**ВВЕДЕНИЕ**

Принимая во внимание нормативные требования к проведению инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях (СП 11-1057-П) [11] в части выполнения предварительного дешифрирования аэрокосмоснимков (АКС) и его комплексирования с различными общегеологическими методами, авторами, на основе карстологического дешифрирования и радарной съемки земной поверхности в комплексе с материалами структурно-поискового бурения, дана математическая оценка влияния различных природно-геологических факторов на интенсивность проявления и морфометрические показатели карстовых воронок на территории Нижнеиренско-Ординского опорного участка. Выполненные исследования соответствуют предпроектной стадии инженерно-геологических исследований на закарстованных территориях.

Приоритетными задачами исследований являются оценка и расширение возможности применения дистанционных методов в составе комплекса инженерно-геологических изысканий, комплексирование дистанционных методов исследований с общегеологическими при решении конкретных практических задач, установление общих закономерностей влияния различных природных факторов на интенсивность и параметры поверхностных карстовых форм, их анализ и математическое обоснование.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО УЧАСТКА**

В региональном отношении территория участка расположена на площади активного развития карста в Пермском крае, где растворимые горные породы выходят на дневную поверхность, или залегают в приповерхностной части

геологического разреза под дисперсными покровами различной мощности. В тектоническом отношении площадь активного развития карста соответствует районам восточной окраины Восточно-Европейской платформы и прилегающих частей Предуральяского прогиба [4]. В схеме карстологического районирования территория участка расположена в Иренском районе преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста, занимающая правобережную часть нижнего течения р. Ирень до долготы с. Орда (рис. 1).

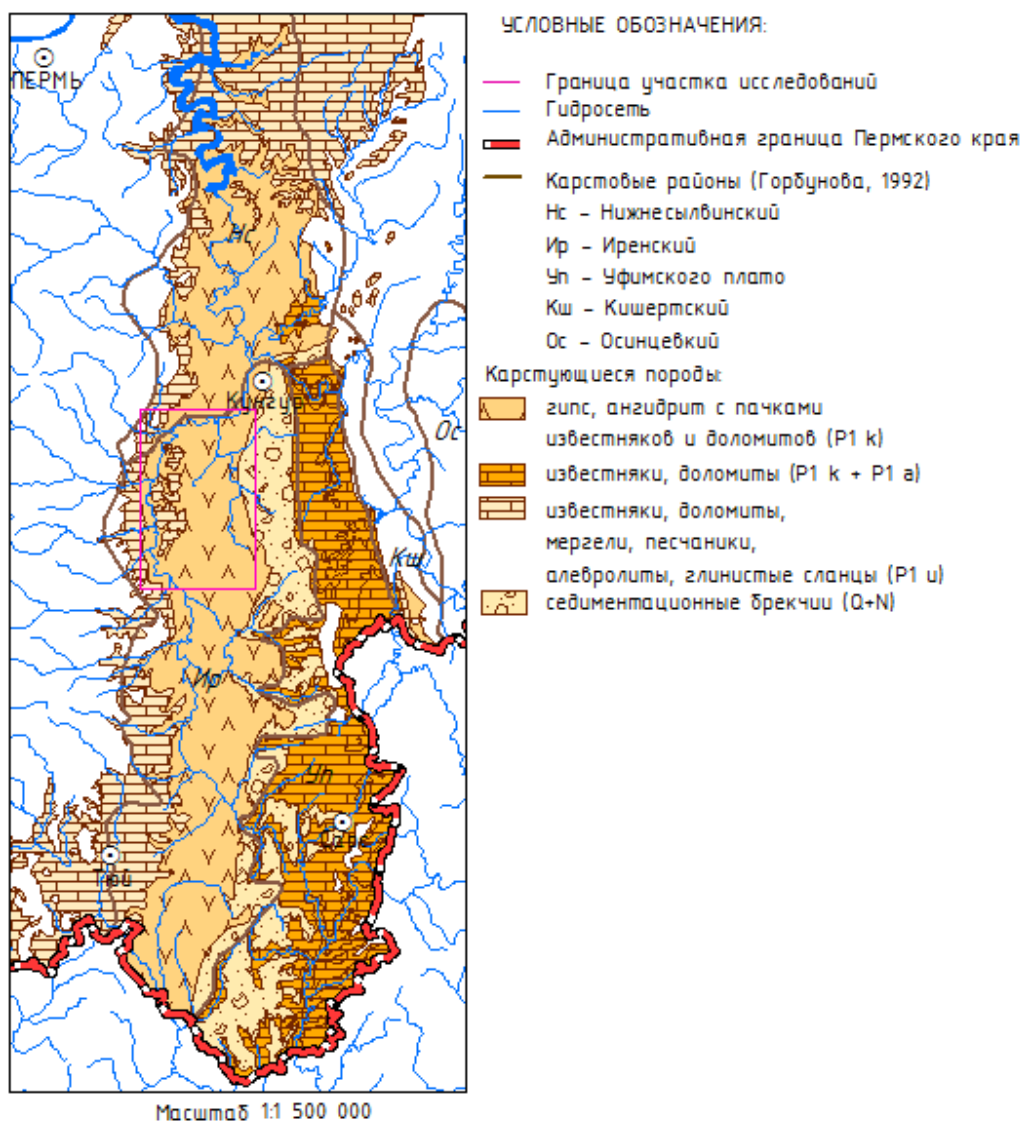
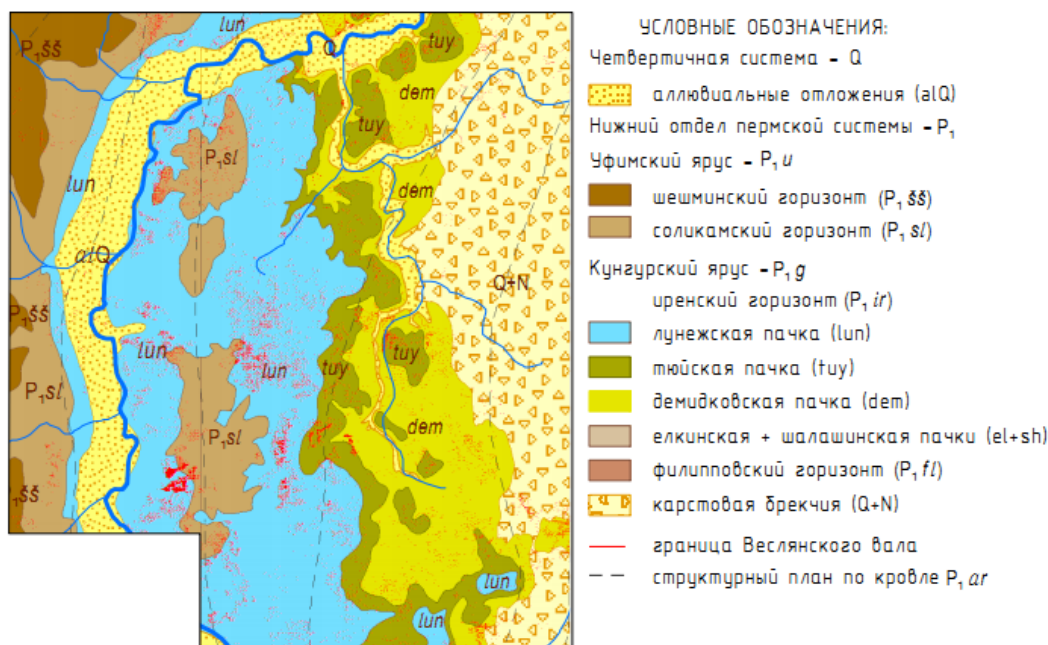


Рис. 1. Фрагмент карты развития активного карста на территории Пермского края [4] с границами исследуемого участка.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО ОПОРНОГО ...

Участок в геолого-структурном отношении приурочен к платформе, а в тектоническом расположен в пределах Веслянского вала, осложняющего Бымско-Кунгурскую впадину. Верхняя часть разреза (200–400 м) сложена отложениями уфимского, кунгурского и артинского ярусов приуральского отдела пермской системы, покрытых чехлом рыхлых элювиально-делювиальных и аллювиальных осадков четвертичного возраста. Покровные отложения представлены глинами, суглинками, песками и галечниками, выполняющими водораздельные пространства, а также пойменные и надпойменные террасы рек.

Уфимский ярус сложен песчано-глинистыми отложениями шешминского горизонта и карбонатно-терригенными отложениями соликамского горизонта, залегающими на левобережье р. Ирень и фрагментарно в центральной части участка (рис. 2).



Масштаб 1:500 000

Рис. 2. Геологическая карта Ординско-Уинской площади [2, 5, 14].

Характер распространения некарстующихся отложений предопределил и условия развития карста. Карст относится к голому, задернованному, на значительных площадях к подэлювиальному типам, в долинах рек к подаллювиальному и к закрытому типу — под соликамскими породами [4]. Карстовые формы — самые разнообразные: воронки, в том числе провального типа, поноры, пещеры, карстовые лога, локальные понижения и т.п.

На участке наиболее интенсивно закарстованы сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта кунгурского яруса и в меньшей степени карбонаты филипповского горизонта кунгурского яруса и артинского яруса. В восточной части

участка иренский горизонт разрушен на различную глубину и преобразован в карстовую брекчию, сложенную сцементированными обломками ангидритов и доломитов. Полный сульфатно-карбонатный разрез иренского горизонта, встречается только в центральной части участка. Отложения филипповского горизонта представлены светлыми кристаллическими доломитами с подчиненными прослоями известняков. Граница по артинскому ярусу проводится фаунистически. Артинский ярус сложен толщей известняков серых, органогенных, органогенно-детритовых и окремнелых.

### **ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ УЧАСТКА**

Территория участка исследований и сопредельных площадей характеризуется высокой степенью геолого-геофизической изученности (рис. 3). Основу текущих исследований составили материалы структурно-поискового бурения перспективных на нефть площадей [1, 6, 13, 14], результаты комплексной ГГС [2], материалы по изучению карста Уфимского плато [16] и мониторингу закарстованных территорий [12]. Для картографических построений были использованы данные литолого-стратиграфических разбивок по 298 структурно-поисковым, а также различным гидрогеологическим и инженерно-геологическим скважинам (450 шт.), вскрывшим кровлю иренского горизонта. Всего в работе использованы результаты бурения 698 скважин. Литолого-стратиграфическое расчленение разреза основано на материалах интерпретации ГИС скважин.

Сведения о поверхностной закарстованности получены по материалам оценочного карстологического дешифрирования КФС карстовых районов Пермского края. Методика и результаты дешифрирования подробно изложены в работах [7–9]. Топографическая основа построена с привлечением материалов космической радарной съемки (SRTM).

### **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Комплектование, анализ и интерпретация исходных геолого-геофизических данных, материалов карстологического дешифрирования, радарной съемки и непосредственная математическая оценка, выявленных закономерностей развития карста, выполнены при помощи *анализа пространственных данных*. Техническим инструментом анализа послужил программно-аналитический ресурс геоинформационной платформы ARC GIS. Основу анализа составил комплект элементарных карт, построенных по материалам бурения структурно-поисковых и гидрогеологических скважин.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО ОПОРНОГО ...

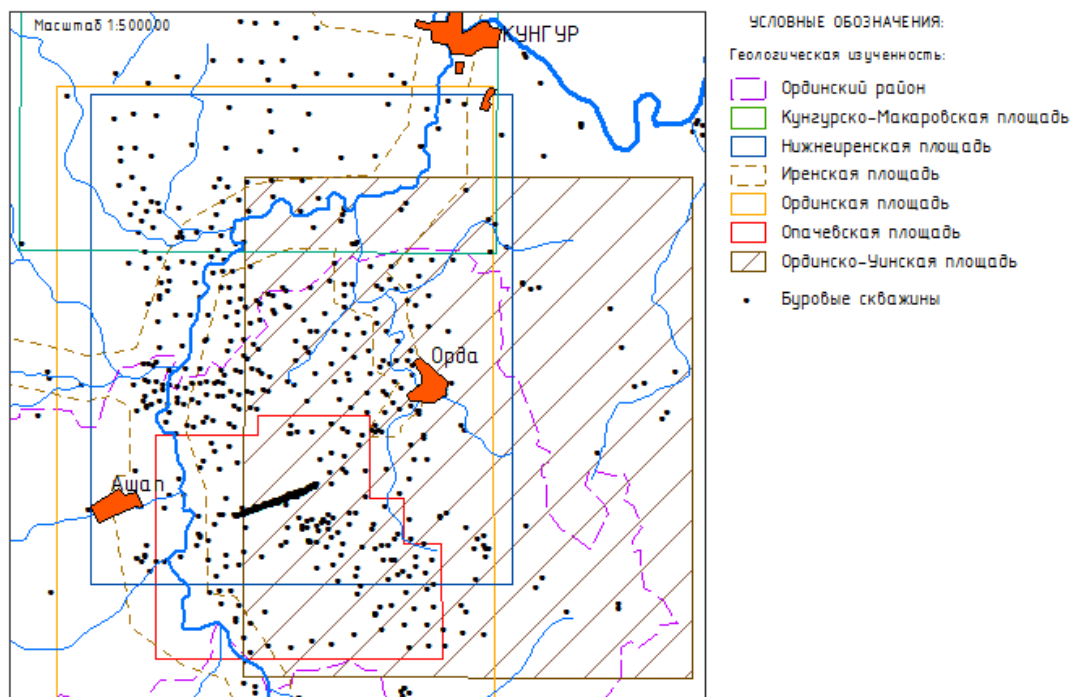
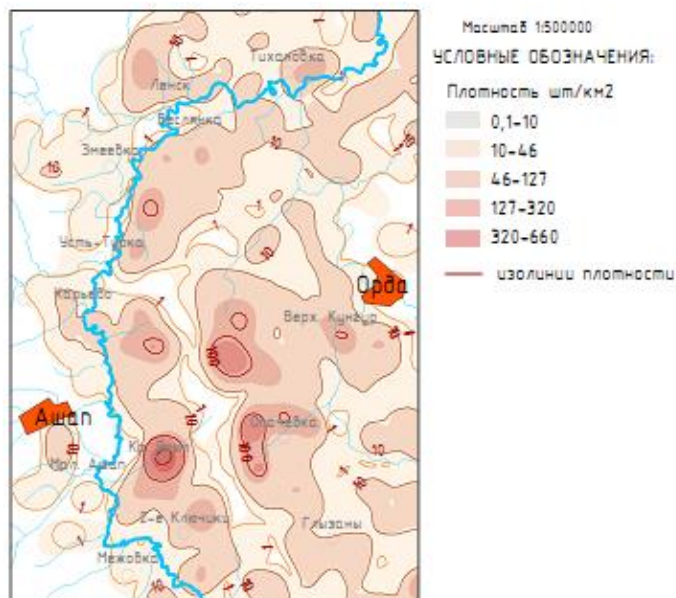


Рис. 3. Схема изученности опорного участка.

**Общая характеристика закарстованности.** Территория опорного участка характеризуется высокой степенью поверхностной закарстованности. По литературным данным [4] средняя плотность карстовых форм по отдельным полям (Ключевское, Павловское, Красноясыльское) достигала 133–221 ф/км<sup>2</sup>. Согласно же материалам оценочного карстологического дешифрирования [8,10] современная закарстованность участка чрезвычайно неравномерная и варьирует в широких пределах, от 0,1–10 ф/км<sup>2</sup> достигая местами до 320–660 ф/км<sup>2</sup>. (рис. 4).

Всего на территории опорного участка выявлено порядка 18 тыс. поверхностных карстовых форм, из которых для 7 384 оценен поперечный размер. Большой разброс плотности обусловлен сочетанием различных геологических и геоморфологических факторов. Наибольшее число карстовых воронок — 10 469 шт., сформировалось на площади развития верхней в иренском горизонте гипсо-ангидритовой лунежской пачки, 2 039 шт. — на площади развития известняково-доломитовой туюнской пачки, 2 432 шт. на площади развития — гипсо-ангидритовой демидковской пачки и 20 шт. в пределах стратиграфически нерасчлененных елкинско-шалашнинских отложений. Значительная доля воронок — 2 255 штук зафиксирована в пределах распространения карбонатно-терригенных отложений соликамского горизонта уфимского яруса. На площади развития карстовой брекчии выявлено 818 форм, а на площади развития аллювиальных отложений — 617 форм.



Масштаб 1:500 000

Рис. 4. Схема плотности поверхностных карстовых форм на участке исследований.

Максимальные показатели плотности (порядка 600–660 ф/км<sup>2</sup>) выявлены на границе иренских и соликамских отложений (рис. 2, 4), там, где карстующиеся породы прикрыты тонким чехлом рыхлых покровных отложений или выходят на поверхность. В геоморфологическом отношении наиболее закарстованными являются склоны речных долины и водораздельное пространство между реками Ирень и Кунгур, осложненное овражно-балочной сетью.

Пространственная связь поверхностной закарстованности с эрозионной расчлененностью (глубина врезов, плотность современной гидросети) оценивалась при помощи графика распределения числа карстовых форм в зависимости от расстояния до ближайших дрен (рис. 5).

Анализируя характер снижения поверхностной закарстованности по мере удаления от магистральных дрен и рек мелких порядков, можно отметить, что эрозионная расчлененность рельефа, выступает, как один из факторов локализации развития карста. Например, 80% выявленных форм сосредоточены в пределах узкой полосы шириной 2 километра, оконтуривающей русла рек, ручьев и овражно-балочной сети.

С удалением от рек и оврагов прослеживается устойчивая тенденция увеличения среднего диаметра карстовых форм с 15 до 23 м. За пределами двухкилометровой зоны, наоборот отмечается резкое снижение максимальных размеров воронок в среднем с 96 до 33 м.

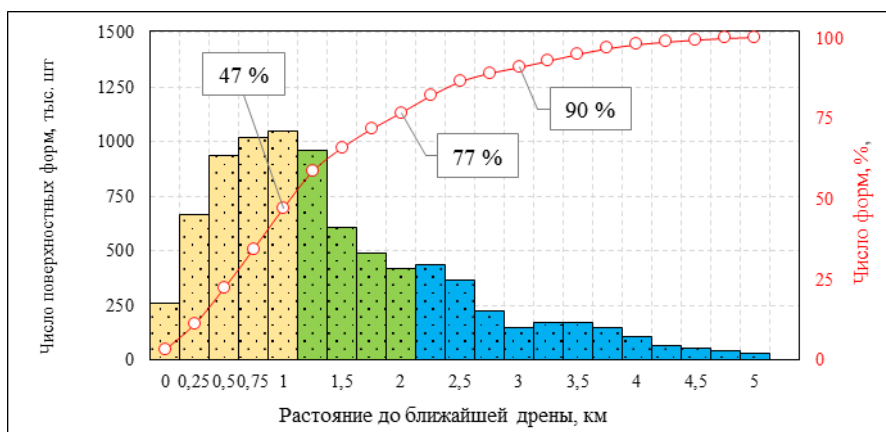


Рис. 5. Распределение количества зафиксированных карстовых воронок в зависимости от расстояния до ближайших дрен.

Как было указано ранее, при дешифрировании для 7 384 поверхностных карстовых форм удалось оценить поперечный размер. Характер распределения диаметров проиллюстрирован на гистограмме (рис. 6). Статистическая оценка параметров карстовых форм показывает, на территории участка, преобладают формы с поперечным размером 10–15 м, общее число которых составляет 50%, а среднестатистический диаметр (по медиане) равен 14,7 м.

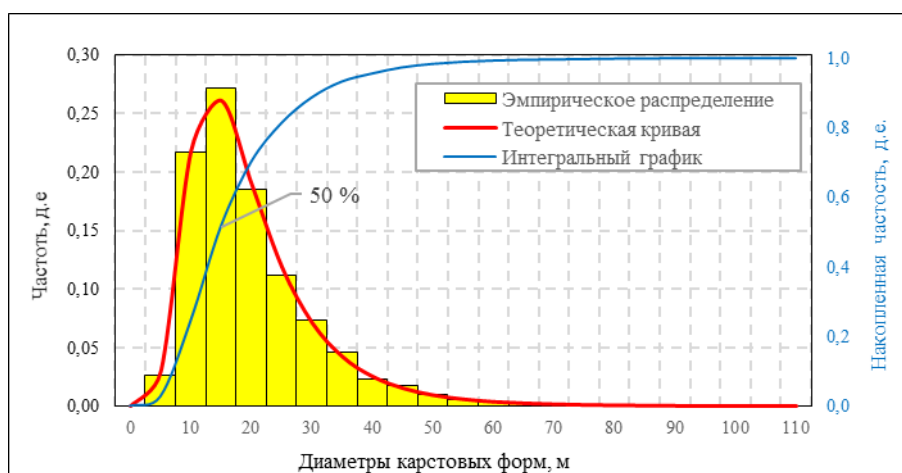


Рис. 6. Гистограмма распределения поперечных размеров карстовых форм.

Эмпирическое распределение поперечных размеров карстовых воронок соответствует логарифмически нормальному закону. Проверка гипотезы основана на выполнении условий (1–2), при известном допущении, что распределение логарифма параметров карстовых форм в плане подчиняется нормальному закону [17]:

$$\left| \frac{As}{\delta_a} \right| < 3; \quad (1) \quad \left| \frac{Ek}{\delta_e} \right| < 3 \quad (2)$$

где,  $E_k$  — эксцесс,  $As$  — асимметричность,  $\delta_e$  и  $\delta_a$  стандартные отклонения оценок асимметрии и эксцесса.

Все указанные параметры вычислены при помощи встроенного пакета анализа Microsoft Office Excel.

$$\left| \frac{As}{\delta_a} \right| = \left| \frac{-0,005}{0,029} \right| = 0,16 \quad \left| \frac{Ek}{\delta_e} \right| = \left| \frac{0,004}{0,057} \right| = 0,67$$

Структурно-поисковое бурение, при проходке трещиноватых высокопроницаемых зон и карстовых полостей сопровождалось массовыми поглощениями бурового раствора. Общее представление о характере размещения подземных карстовых полостей и зон трещиноватости в плане и разрезе дают схема расположения скважин, в которых зафиксированы поглощения бурового раствора по различным стратиграфическим подразделениям нижней перми и гистограммы распределения объемов и глубин поглощений по Ординской и Опачевской площадям (рис. 7–8).

Интенсивность и количество зафиксированных поглощений в целом преобладают по Ординской площади, однако при равных абсолютных отметках залегания кровли артинского яруса, глубина поглощений по Опачевской площади существенно больше. Здесь нижние интервалы ухода промывочной жидкости фиксируются по артинско-ассельским отложениям, в то время как по Ординской, они в большинстве случаев, ограничены артинско-филипповскими.

Максимальное количество поглощений выявлено в интервалах залегания покровных и иренских отложений, соответствующих глубинам от 5–25 до 60–80 м. В интервале залегания филипповского горизонта (80–100 м) их количество резко снижается и возрастает после вскрытия кровли артинского яруса (> 100–120 м).

Объемы и глубины поглощений (рис. 8) систематизированы по двум показателям: нижней границе интервала ухода промывочной жидкости и объему, который рассчитан оценочно, через диаметр скважины и глубину поглощения. Малые поглощения (до 1–3 м<sup>3</sup>/сут) встречаются массово и соответствуют главным образом верхней части разреза, представленной покровными рыхлыми и кровле сульфатных отложений иренского горизонта. Небольшие, объемом до 5–6 м<sup>3</sup>/сут, интенсивно проявляются по всей иренско-филипповской толще. С глубиной, как правило после проходки кровли артинского или сакмарского ярусов широко проявляются «полные» и «катастрофические» поглощения.



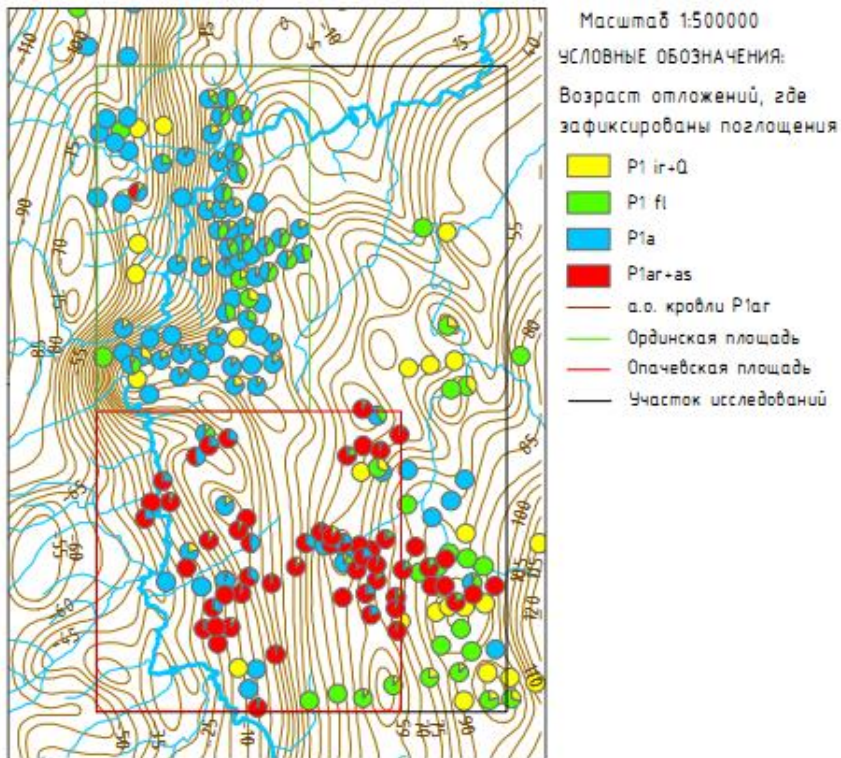


Рис. 7. Схема расположения скважин, в которых зафиксированы поглощения бурового раствора.

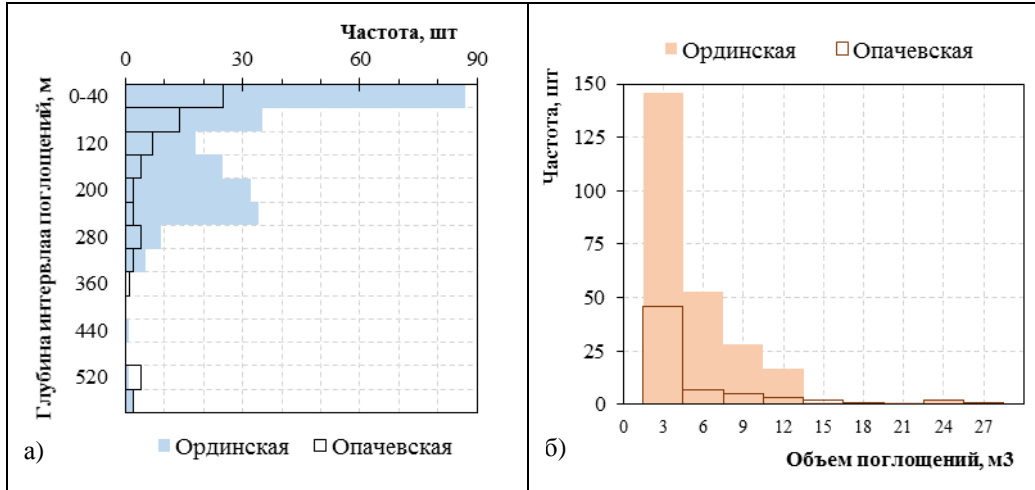


Рис. 8. Гистограммы распределения глубин (а) и объемов поглощения бурового раствора на Ординской и Опачевской площадях.

**Математическая оценка влияния природных факторов на интенсивность образования карстовых форм.** Методической базой, определяющей подходы к градации выделяемых факторов, последовательности математических расчетов и картографических построений, стала вероятностно-статистическая теория В. В. Толмачева [15], методические положения которой подробно рассмотрены в работе [7]. Выделение природных факторов, оценка степени и характера влияния на интенсивность и параметры карстовых форм важны при районировании территорий по условиям развития карста. Обоснование числа факторов и анализ их возможного влияния на карст в целом, ввиду их различного сочетания в природных условиях, может быть выполнено методами математической статистики [15].

Картографические построения (*анализ пространственных данных*) основаны на следующих методических принципах: вероятность образования провальных поверхностных форм контролируется влиянием многочисленных природных факторов, где роль каждого отдельно взятого фактора может проявляться в виде определенной тенденции, которая может быть выражена количественно (графически и аналитически) системой коэффициентов связи  $Q_i$  по соотношению (3), исходные данные для которой получены с элементарных карт-схем градаций признаков различных природных факторов (рис. 9).

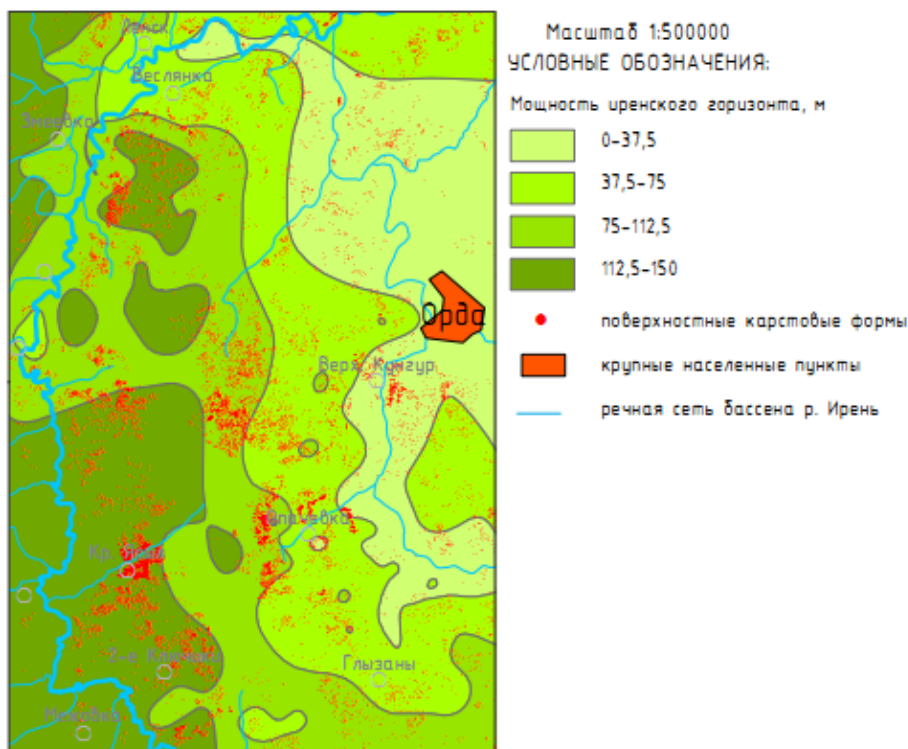


Рис. 9. Пример построения элементарной карты-схемы градации признаков природных факторов.

$$Q_i = \frac{n_i(A - A_i) - (n - n_i) \times A_i}{n_i(A - A_i) + (n - n_i) \times A_i} \quad (3)$$

где  $A$  — общая площадь территории распространения данного фактора;  $A_i$  — площадь  $i$ -го признака фактора;  $n_i$  — количество карстовых провалов на площади  $A_i$ ;  $n$  — общее количество воронок на площади.

Градации  $Q_i$  (-1...+1), отражает вероятность возникновения провалов: от — 1, когда образование провалов при  $i$ -м признаке исследуемого фактора невозможно и до +1, когда наоборот, возникновение провальных форм возможно только при  $i$ -м признаке. Вид и характер полученных графиков  $Q_i$  (рис. 10) дает представление о некоторых выявленных тенденциях развития карста на территории изучаемого участка. Природные факторы, рассматриваемые в настоящей работе, условно поделены на две группы: геоморфологические (связанные с особенностями строения рельефа) и геологические. В виду значительно количества факторов (27 шт), выявленные закономерности, проиллюстрированы только по наиболее показательным. Их **ранжирование и оценка степени влияния** на интенсивность образования карстовых форм в целом, выполнена при помощи понятия *энтропии* ( $E$ ) из теории информации [15], определяемая как сумма (со знаком «-») всех произведений относительных частот появления события  $i$ , умноженных на их двоичные логарифмы (4):

$$E = - \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i) \quad (4)$$

где  $p(i)$  — вероятность  $i$ -го события,  $n$  — число несовместимых событий, составляющих полную группу событий.

Энтропия системы событий равна нулю, когда вероятность одного какого-либо компонента этой системы равняется единице (5), а значит, вероятность остальных событий равна нулю. Такая информация предсказуема и не несёт ничего нового. Энтропия принимает максимальное значение для равновероятного распределения, когда вероятности всех событий ( $p_1, p_2, \dots, p_m$ ) одинаковы, и неопределённость исхода события максимальна.

$$\sum_{i=1}^n p(i) = 1 \quad (5)$$

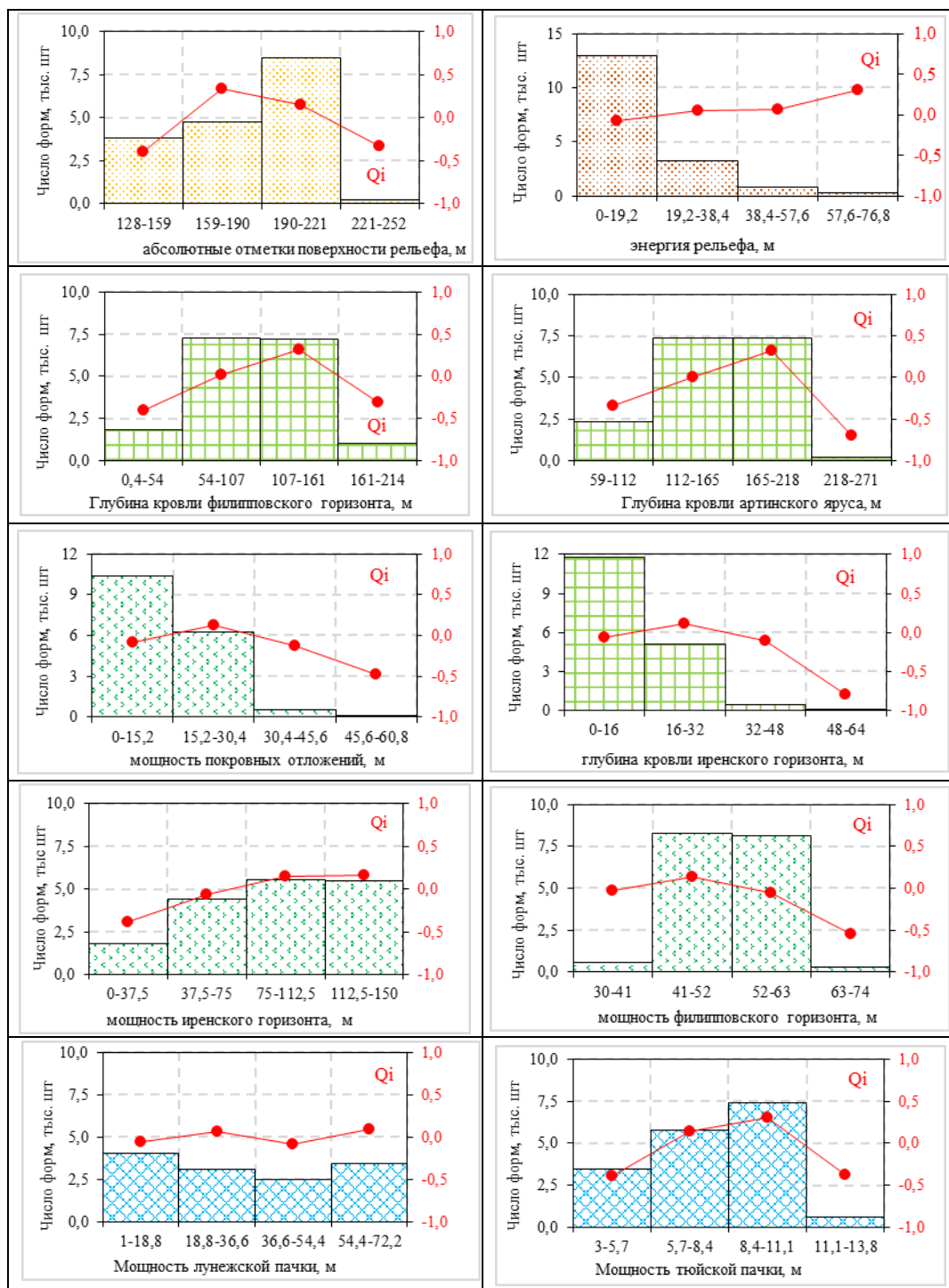


Рис. 10. Графики коэффициентов связи Qi.

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА НА  
ПРИМЕРЕ НИЖНЕИРЕНСКО-ОРДИНСКОГО ОПОРНОГО ...**

Применив понятие энтропии, можно утверждать: а) если оцениваемый фактор не влияет на образование карстового провала (т.е. условные вероятности возникновения провальной формы для различных признаков фактора равны между собой), то энтропия максимальна  $E_{\max}$ ; б) если образование провала определяется только одним природным фактором, то энтропия равна нулю; в) промежуточными значениями энтропии (от нуля до  $E_{\max}$ ) можно оценить влияние различных природных факторов в целом на образование провалов. Сравнивая соотношения  $E_{\max}/E$  разных факторов (табл. 1), можно определить степень их значимости в отношении влияния на образование провалов (поверхностных форм).

Таблица 1.

Сводная таблица показателей  $E_{\max}/E$  природных факторов

Геоморфологические факторы			
1) абсолютные отметки рельефа	1,0982	3) уклоны рельефа	1,0118
2) энергия рельефа	1,0270	4) экспозиция склонов	1,0131
Геологические факторы подгруппы <i>глубин залегания</i>			
1) иренского горизонта	1,1487	6) елкинской пачки	1,1215
2) филипповского горизонта	1,0858	7) шалашнинской пачки	1,0705
3) артинского яруса	1,1762	8) неволинской пачки	1,0226
4) тюйской пачки	1,1543	9) ледяно-пещерской пачки	1,0313
5) демидковской пачки	1,1469		
Геологические факторы подгруппы <i>мощность отложений</i>			
1) покровных отложений	1,0565	6) демидковской пачки	1,0886
2) иренского горизонта	1,0399	7) елкинской пачки	1,0229
3) филипповского горизонта	1,0677	8) шалашнинской пачки	1,0493
4) лунежской пачки	1,0044	9) неволинской пачки	1,0449
5) тюйской пачки	1,0849	10) ледяно-пещерской пачки	1,0094
Геологические факторы подгруппы <i>абсолютные отметки кровли</i>			
1) карстующиеся отложения	1,0995	3) филипповского горизонта	1,0421
2) неволинской пачки	1,1376	4) артинского яруса	1,1872

Анализируя результаты графико-аналитических построений (рис. 10) и математических расчетов (табл. 1), можно сформулировать следующие выводы:

1. *Группа геоморфологических факторов.* Основные тенденции развития карста, связанные с морфологическими особенностями рельефа (абсолютные отметки или превышение над уровнем дрены, уклон и энергия), являются интегральными показателями эрозионной расчлененности рельефа и контролируют особенности распределения поверхностного стока и глубины дренирования карстовых вод. Показательной с данных позиций (как на локальном, так и в региональном уровне) является тенденция изменения поверхностной закарстованности в зависимости от увеличения абсолютных отметок рельефа. Например, общее количество поверхностных форм, зафиксированных в интервале высот 128–190 м (соответствующих в плане склонам речных долин), резко возрастает по мере

увеличения высоты рельефа. С превышением абсолютных отметок более 190 м — закарстованность плавно снижается. Схожий характер выявлен и для фактора «уклон рельефа»: на пологих склонах речных долин и водоразделах, где уклоны рельефа плавно увеличиваются с 1 до 6°, поверхностная закарстованность повышается; на участках, где углы поверхности рельефа достигают 7–8° и более число карстовых форм падает. Рост «энергетического потенциала территории» с 1–5 м до 50–76 м (в рамках оцениваемых величин) практически по всех случаях связан с ростом поверхностной закарстованности. Показательна и роль экспозиции, определяющая характер и интенсивность распределения величины суточной солнечной радиации (тепла), а именно — максимальная закарстованность присуща для склонов западной и южной экспозиций, а минимальная — для восточной.

Из всей группы геоморфологических факторов (табл. 1), наибольшее влияние на процесс развития поверхностной закарстованности, выявлено у фактора «абсолютные отметкам поверхности рельефа».

2. *Группа геологических факторов* отражает особенности геологического строения участка исследований. Входящие в ее состав факторы, условно можно разделить на три подгруппы, связанные с мощностью, глубиной залегания и характером поверхности оцениваемого литолого-стратиграфического подразделения. При этом, внутри каждой подгруппы может проявляется своя характерная тенденция.

а) Факторы *мощности* по мере увеличения глубины залегания анализируемых литолого-стратиграфических элементов, теряют свою роль и силу влияния на поверхностную закарстованность. Доминирующая роль в карстообразовании принадлежит верхним пачкам иренского горизонта — карбонатной тюйской и сульфатной демидковской. Например, увеличение числа карстовых форм связано с увеличением мощности тюйских известняков с 3 до 11 м, однако дальнейшее повышения мощности более 11 м, приводит к их резкому снижению (рис. 10). Аналогичная ситуация прослеживается и для демидковской сульфатной пачки, повышение мощности которой с 3 до 30 м повсеместно сопровождается ростом поверхностной закарстованности. Сходная тенденция выявлена для фактора «суммарная мощность иренского горизонта», с той разницей, что при ярко выраженной закономерности, сила фактора очень незначительна (табл. 1). Минимальная величина  $E_{\max}/E$  в геологическом разрезе участка установлена для самой верхней и самой разрушенной гипсо-ангидритовой лунежской пачки.

Вторыми по силе влияния — являются факторы *мощность филипповского горизонта и рыхлых покровных отложений*. В обоих случаях увеличение мощности отложений сопровождается снижением закарстованности. Если роль покровной толщи очевидна (при превышении мощности более 30 м, закарстованность плавно снижается), то влияние мощности карбонатов филипповского горизонта, подстилающего отложения иренского (при равных абсолютных отметках кровли артинского яруса), видится в формировании устойчивых приподнятых гипсово-ангидритовых массивов.

б) Показатели *глубин залегания кровли* карстующихся отложений имеют более высокие коэффициенты  $E_{\max}/E$ , чем факторы мощности первой группы. Выявленная

ранее закономерность — падение влияния на поверхностную закарстованность с глубиной залегания литологических пачек иренского горизонта, подтверждается.

Максимальные показатели  $E_{\max}/E$  выявлены для факторов *глубина залегания кровли карстующихся отложений* (в частности, для туйской и демидковской пачек иренского горизонта) и *кровли артинского яруса*. Во всех случаях прослеживается ожидаемая тенденция — погружение карстующихся отложений ниже определенных глубин, сопровождается снижением общей закарстованности. Для туйской и демидковской пачек по разным полям эта глубина достигает в среднем 86–90 м. В таком случае пристальное внимание следует обратить на роль «*глубины залегания кровли артинского яруса*», имеющего статус регионального водоупора и обладающего самым высоким коэффициентом (табл. 1). Максимальная закарстованность соответствует абсолютным отметкам глубин артинского яруса (признакам фактора) интервала 112–218 м, выше и ниже которых, число форм существенно ниже (рис. 10).

в) Зависимости, связанные с характером строения структурных поверхностей литолого-стратиграфических подразделений, отчасти тождественны глубинам залегания. Максимальные коэффициенты  $E_{\max}/E$  принадлежат таким факторам, как структурный план кровли артинского яруса и неволинской пачки. Следует отметить, что объективный анализ положения в разрезе структурных поверхностей только по одному опорному участку практически невозможен, по причине сильной разрушенности иренского горизонта в плане и соответственно разным техническим аспектам к построению структурных планов.

**Оценка влияния природных факторов на размеры карстовых форм в плане.** Используя материалы карстологического дешифрирования и методы математической статистики, представляется возможным, выявить характер и степень влияния природных факторов на поперечные размеры поверхностных форм.

Оценка и обоснование выбора перечня природных факторов, имеющих влияние на размер карстовых форм, осуществляется в следующей последовательности: задается статистическая выборка распределения частот размеров форм, расположенных на площадях, соответствующих определенным их признакам. Далее проверяется гипотеза об однородности выборок каждого фактора между собой, на предмет их принадлежности к одной генеральной совокупности.

Если все выборки фактора принадлежат к одной генеральной совокупности, то можно считать, что этот фактор практически не влияет на размер провала (формы). Для проверки использован  $\chi'$  критерий Колмогорова-Смирнова [15, 17]:

$$\chi' = \sqrt{\frac{n_1 \times n_2}{n_1 + n_2}} \times \max |Fn_1(x) - Fn_2(x)|, \quad (6)$$

где  $Fn_1(x)$  и  $Fn_2(x)$  — эмпирические функции распределения, построенные по двум статистически распределенным выборкам  $n_1$   $n_2$ .

Гипотеза отвергается, если фактическое значение  $\chi' > \chi'_{\text{кр}}$ . (при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ). Результаты расчета  $\chi'$  по некоторым выборочным природным факторам приведены в табл. 2. Как видим, для всех вариантов, гипотеза об однородности выборок по каждому оцениваемому фактору не подтверждается.

Таблица значений критерия Колмогорова-Смирнова

Природный фактор	Критерий Колмогорова-Смирнова ( $\chi' > 0,05 \chi'$ )	
	$\chi'$	0,05 $\chi'$
Мощность покровных отложений	60,7	12,6
Мощность туюйской пачки	26,2	12,6
Мощность демидковской пачки	9,24	7,82
Глубина залегания артинского яруса	44,59	12,6
Глубина залегания иренского горизонта	39,6	12,6
Глубина залегания туюйской пачки	88,0	12,6
Глубина залегания демидковской пачки	111,6	12,6
Абсолютные отметки рельефа	72,7	12,6
А.О. кровли артинского яруса	42,7	12,6
А.О. кровли иренского горизонта	41,9	12,6

Для определения степени значимости рассматриваемых факторов по силе их влияния на величину воронки (провала) рекомендуется вычислять коэффициент взаимной сопряженности А. А. Чупрова [15,17]:

$$T = \sqrt{\frac{1}{(m_f - 1) \times (m_d - 1)} \sum_1^{m_d} \sum_1^{m_f} \frac{\delta_{ij}^2}{n_i n_j}} \quad (7)$$

где  $m_d$  число рассматриваемых интервалов диаметров;  $m_f$  — число признаков, на которое разбит рассматриваемый фактор;  $\delta_{ij}^2 = n n_{ij} - n_i n_j$ ;  $n$  — общее количество провалов, участвующих в статистической обработке;  $n_i$  — число провалов, принадлежащих  $i$ -му признаку диаметров;  $n_j$  — число провалов, принадлежащих  $j$ -му значению признака.

Коэффициент сопряженности Чупрова связан с коэффициентом сопряженности Пирсона через коэффициент  $\phi^2$  (среднюю квадратичную сопряженность) соотношениями (8–10). Результаты статистических расчетов для наиболее содержательных с точки зрения механизма формирования провалов, факторов представлены в табл. 3.

$$\phi^2 = \frac{\chi^2}{n} \quad (8)$$

$$c = \sqrt{\frac{\chi^2}{n + \chi^2}} = \sqrt{\frac{\phi^2}{1 + \phi^2}} \quad (9)$$



$$T^2 = \frac{\phi^2}{\sqrt{(m_f - 1) \times (m_d - 1)}} \quad (10)$$

Таблица 3

Сводная таблица значений коэффициентов сопряженности С и Т

Природный фактор	Коэффициент сопряженности	
	Пирсона — С	Чупрова — Т
Мощность покровных отложений	0,1480	0,0560
Мощность иренского горизонта	0,1517	0,0534
Мощность филипповского горизонта	0,1705	<b>0,0647</b>
Мощность туюйской пачки	0,1412	0,0497
Мощность демидковской пачки	0,1330	0,0467
Глубина артинского яруса	0,1505	0,0570
Глубина иренского горизонта	0,1557	<b>0,0653</b>
Глубина филипповского горизонта	0,1365	0,0516
Глубина туюйской пачки	0,1574	0,0596
Глубина демидковской пачки	0,1569	0,0594
Абсолютные отметки рельефа	0,1827	<b>0,0695</b>
Кровля артинского яруса	0,1629	<b>0,0684</b>
Кровля филипповского горизонта	0,1665	<b>0,0632</b>
Кровля иренского горизонта	0,1668	<b>0,0633</b>

Ранжирование природных факторов Нижнеиренско-Ординского опорного участка по коэффициенту сопряженности Чупрова, позволяет наметить некий перечень конкретных факторов, оказывающих (теоретически) наиболее сильное влияние на поперечный размер, образующихся карстовых форм. К таковым в первую очередь следует отнести факторы «поверхность рельефа» и «структурный план по кровле артинского яруса», проявившихся и по критерию  $E_{\max}/E$ . На второе место по своему влиянию на диаметры форм можно поставить такие факторы, как «глубина кровли иренского горизонта», «мощность филипповского горизонта», а также характер строения их структурных поверхностей. Минимальные значения характерны для литологических пачек иренского горизонта, остальные факторы имеют промежуточное значение.

## ВЫВОДЫ

Анализ пространственных данных, основанный на использовании общегеологических методов и материалов дистанционного зондирования, позволил в первом приближении, получить актуальные количественные характеристики поверхностной закарстованности, охарактеризовать закономерности размещения поверхностных карстовых форм в плане и разрезе, выявить и математически

обосновать основные природно-геологические условия развития карста Нижнеиренско-Ординского опорного участка.

Подготовленные материалы будут положены в основу районирования территории по условиям развития карста и соответствуют предпроектной стадии инженерно-геологических исследований.

#### Список литературы

1. Бачурин Н. Н., Насыров А. М. Результаты структурно-поискового бурения на Ординской площади в 1966–1969 гг. Кунгур, 1969.
2. Бесчетнов Л. В. и др., Отчет по комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:50000 Иренинской площади для целей мелиорации земель долин рек Сылва, Ирень, Бабка за 1980–1984 гг.
3. Ваганов М. Н., Костогрыз Н. Я. и др., Геологический отчет Ординской и Уинской геолого-съемочных партий. Молотов, 1946.
4. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н. Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с.
5. Грайфер Б. И., Зуева Р. А. Геологическое строение бассейна верхнего и среднего течения р. Сылва. Молотов, 1954.
6. Ердяков А. С., Красильников Б. В. Результаты структурно-поискового бурения на Кунгурской площади в 1958–1959 гг. Пермь, 1959.
7. Ерофеев Е. А., Катаев В. Н. Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории. Инженерная геология. Декабрь 4/2010. С. 34–46.
8. Ерофеев Е. А., Катаев В. Н. Идентификация поверхностных карстовых форм по материалам спутниковых изображений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сборник статей 37-й Всероссийской научно-практической конференции (май 23–24 2017, Пермь) / под редакцией Р. Г. Ибраминова, Пермский Университет, 2017. С. 193–197.
9. Erofeev E. A., Kataev V. N. Estimative karst interpretation of satellite images of the south — south-eastern districts of Perm region // International Symposium KARST 2018 — Expect the Unexpected. Trebinje, 2018 pp. 143–150.
10. Ерофеев Е. А., Катаев В. Н. Методический подход к проведению оценочного карстологического дешифрирования территории карстовых районов пермского края / Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли // Материалы VI Международной научной конференции. Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. С. 96–101.
11. СП 11-105-97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
12. Катаев В. Н. Мониторинг закарстованных территорий Пермской области, 2009.
13. Куницына Л. И. Результаты структурного бурения на Опачевской площади в 1985–1989 гг. Пермь, 1990.
14. Романов П. И., Ердяков А. С. Геологическое строение бассейна нижнего течения реки Ирень. Отчет геолого-съемочной партий № 2 и № 3 за 1956 год. Молотов, 1957.
15. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / Под ред. Е. А. Сорочана М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
16. Турышев А. В. Карстовые явления и подземные воды уфимского плато. Кунгур, 1960.
17. Шарапов И. П. Применение математических методов в геологии. Изд. 2-е исправленное и дополненное. Изд-во «Недра», 1971, С. 248.

**GEOLOGICAL REGULATIONS OF KARST DEVELOPMENT  
ON THE EXAMPLE OF THE NIZHNIIRENSKY-ORDINSKY SUPPORT AREA**

**(Perm Territory)**

*Erofeev E. A., Kataev V. N.*

*Perm University (PSNIU), Perm, Russia*

The article presents the results of research on the use of remote sensing and geophysical methods in order to identify and study the geological patterns of karst development. The research area is the Nizhneirensko-Orda reference area for the development of sulfate and carbonate-sulfate karst. The authors considered the practical aspects of expanding the possibility of using remote sensing methods in engineering and geological surveys in karst areas, disclosed and illustrated the revealed patterns of areal distribution of karst forms. Analysis and interpretation of research materials was carried out using spatial analysis and mathematical methods.

**Keywords:** karst forms, distribution, frequency, structural plan, thickness of sediments, roof of karst sediments.

**Reference:**

1. .Bachurin N. N., Nasyrov A. M. Results of structural exploration drilling in the Ordinskaya area in 1966-1969 Kungur, 1969. (in Russian)
2. Beschetnov L. V. et al., Report on a comprehensive hydrogeological and engineering-geological survey at a scale of 1: 50,000 of the Irenskaya area for the purposes of land reclamation in the valleys of the Sylva, Iren, Babka rivers for 1980-1984. (in Russian)
3. Vaganov M. N., Kostogryz N. Ya. et al., Geological report of the Orda and Uinsk geological survey parties. Molotov, 1946. (in Russian)
4. Gorbunova K. A., Andreychuk V. N., Kostarev V. P., Maksimovich N. G. Karst and caves of the Perm region. Perm: Publishing house Perm. University, 1992. 200 p. (in Russian)
5. Graifer B. I., Zueva R. A. Geological structure of the basin of the upper and middle reaches of the river. Sylva. Molotov, 1954. (in Russian)
6. Erdyakov A. S. Krasilnikov B. V. Results of structural exploration drilling at the Kungurskaya area in 1958-1959 Perm, 1959. (in Russian)
7. Erofeev E. A., Kataev V. N. Application of probabilistic and statistical methods for assessing karst hazard under conditions of anthropogenic impact on karst territories. Engineering geology. December 4/2010. pp. 34-46. (in Russian)
8. Erofeev E. A., Kataev V. N. Identification of surface karst forms based on satellite images // Geology and minerals of the Western Urals: collection of articles of the 37th All-Russian scientific-practical conference (May 23-24 2017, Perm) / edited by R.G. Iblaminova, Perm University, 2017, pp. 193-197. (in Russian)
9. Erofeev E. A., Kataev V. N. Estimative karst interpretation of satellite images of the south - south-eastern districts of Perm region // International Symposium KARST 2018 - Expect the Unexpected. Trebinje, 2018 pp. 143-150.
10. Erofeev E. A., Kataev V. N. Methodological approach to carrying out an estimated karstological interpretation of the territory of karst regions of the Perm Territory / Regional problems of remote sensing of the Earth // Materials of the VI International Scientific Conference. Krasnoyarsk, September 10-13, 2019 pp. 96-101. (in Russian)

11. SP 11-105-97. Set of rules. Engineering and geological surveys for construction. Part II. Rules for the production of work in areas where hazardous geological and engineering-geological processes develop. (in Russian)
12. Kataev V. N. Monitoring of karst territories of the Perm region, 2009. (in Russian)
13. Kunitsyna L. I. Results of structural drilling at the Opachevskaya area in 1985–1989 Perm, 1990. (in Russian)
14. Romanov P.I., Erdyakov A.S. Geological structure of the basin of the lower reaches of the Iren River. Report of geological survey crews No. 2 and No. 3 for 1956. Molotov, 1957. (in Russian)
15. Tolmachev V. V., Troitsky G. M., Khomenko V. P. Engineering and construction development of karst territories / Ed. E. A. Sorochana - Moscow: Stroyizdat, 1986 . 176 p. (in Russian)
16. Turyshev A. V. Karst phenomena and underground waters of the Ufa plateau. Kungur, 1960. (in Russian)
17. Sharapov I. P. Application of mathematical methods in geology. Ed. 2nd corrected and supplemented. Publishing house "Nedra", 1971, p. 248. (in Russian)

*Поступила в редакцию 28.10.2020 г.*