

Оценка карстовой опасности с применением геофизических методов в условиях складчатой зоны (на примере окрестностей г. Кентау, Казахстан)

Елена Викторовна ДРОБИНИНА^{1,2*}
Сергей Владимирович ЩЕРБАКОВ^{1,2}
Денис Рафаилович ЗОЛОТАРЕВ^{1,2}
Олег Николаевич КОВИН¹
Герман Васильевич ФЕДОРОВ³
Дмитрий Анатольевич ИНКИН⁴

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Пермский филиал ООО «Противокарстовая и береговая защита», Москва, Россия

³ТОО «ЭКОСЕРВИС-С», Алматы, Казахстан

⁴ТОО «Азимут геология», Караганда, Казахстан

Аннотация

Актуальность. В районах развития растворимых пород весьма актуальным является вопрос адекватной оценки опасности карстового процесса, развитие которого зачастую связано с внезапным формированием провалов, что весьма осложняет хозяйственное освоение территории.

Целью исследования является оценка карстоопасности территории развития преимущественно карбонатного карста с применением геофизических методов.

Результаты. В статье детально рассмотрены природные условия изучаемой территории, описаны показатели поверхностной и подземной закарстованности, проведен анализ распределения карстовых форм на изучаемой территории в зависимости от природных и техногенных факторов. Для изучаемой территории в качестве базовых методов исследования были приняты: на первом этапе – электропрофилирование (ЭП) с применением дипольной осевой установки (ДОЗ) с пятью разносами, на втором – вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Полученные разрезы кажущегося сопротивления (КС) на втором этапе производства работ по методике ВЭЗ в основном повторяют и дополняют разрезы ЭП при их обработке по технологии электротомографии. С учетом природных факторов и геофизических данных отмечены особенности развития карста: деформирование земной поверхности и инженерных сооружений связано преимущественно с участками пониженных сопротивлений.

Выводы. На территории г. Кентау основными факторами, влияющими на опасность развития карста, являются концентрация процессов выноса вещества в зонах сопряжения разломов разной ориентации и небольшая мощность рыхлых отложений, а также подработка территории. По результатам геофизических исследований выделены участки различной мощности покровной толщи, приподнятые блоки, которые отличаются повышенной вероятностью развития карста, так как здесь сокращается мощность перекрывающей толщи. В результате совместного анализа распространения карстовых проявлений и их сопоставления с зонами развития рыхлых отложений различной мощности и тектоническими разломными нарушениями составлена карта карстоопасности г. Кентау и его окрестностей. Данная карта может быть использована при актуализации генплана и разработке общей стратегии дальнейшего развития города.

Ключевые слова: карстовая опасность, карбонатный карст, карстовый массив, вертикальное электрическое зондирование, электропрофилирование.

Введение

В районах развития растворимых горных пород одним из факторов, осложняющих освоение территории, является карстовый процесс, специфика которого в условиях, когда растворимые породы погребены под толщей нерастворимых, заключается во внезапном провалообразовании. Главной задачей в таких условиях является проведение адекватного карстологического прогноза, направленного на поиск участков, в пределах которых возможно образование провальных карстовых форм.

Проведение карстологического прогноза всегда сопровождается определением граничных условий объекта исследования. Поэтому целесообразно дать пояснение такому понятию, как карстовый массив, так как развитие карстового процесса и проявления его на земной поверхности происходит в пределах определенного геологического пространства, составные элементы которого взаимосвязаны, и изменения, происходящие в пределах одного элемента, могут влиять на изменения, происходящие в сопредельных элементах.

✉ alenadrobinina@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6756-7947>

Любой геологический объект можно рассматривать как сложный, обладающий теми или иными структурными взаимоотношениями между составными элементами, иными словами, как систему или геологическое тело. Г. К. Бондарик [1] под геологическим телом понимает занятую горной породой область пространства, внутри которой остаются непрерывными, по крайней мере, те геологические параметры, на основе которых выделена геологическая граница этой области пространства. Им отмечено, что геологическое тело представляет собой существующую в природе область пространства, выделенную по некоторым критериям и представляющую собой геометрическое место точек, каждой из которых в зависимости от исследуемого геологического параметра поставлено в соответствие его значение. Границы геологических тел являются комбинаторными – выделяемыми по совокупности нескольких разнородных наборов признаков. К такому геологическому телу можно отнести карстовый массив.

Карстовый массив, являясь частью геологической среды, характеризуется ее фундаментальными свойствами: изменчивостью, выражающейся в его пространственно-временном развитии; неоднородностью, обусловленной отличием физико-механических, водных и других свойств в разных точках массива; дискретностью, проявляющейся в наличии некоторых элементов ослабления массива: пористости, трещиноватости, тектонической нарушенности; организационности.

Таким образом, «карстовый массив – это геологическое тело, имеющее границы различной геологической природы или различного типа, состояние и развитие которого определяется степенью реализации основного свойства части слагающих его горных пород; при контакте с природными или природно-техногенными водами относительно активно, закономерно во времени и пространстве, преобразовываться через комплекс процессов, явлений и форм растворения, эрозии, аккумуляции и гравитационного обрушения». Под карстовым массивом следует понимать не только толщу пород, подверженных растворению, а всю часть геологической среды, вплоть до земной поверхности, элементы которой испытывают или могут испытать на себе влияние карстового процесса.

Понятие «карстологический прогноз» ввиду отсутствия единого подхода к его осуществлению в нормативных документах не закреплено, однако в научной литературе широко обсуждаются методы его проведения, что продиктовано необходимостью безопасного освоения закарстованных территорий. В. Н. Катаевым под карстологическим прогнозом понимается научно обоснованное предсказание условий и факторов состояния, последовательности и механизма развития карстового массива в целом или его отдельных элементов, включая карстовые формы. Принятие прогнозных решений невозможно без должного понимания механизма реализации карстового процесса в целом и механизма реализации карстовых деформаций в частности [2].

Понятием «карстологический прогноз», по сути, определяется конкретный метод оценки карстоопасности территории, результатом применения которого служит заключение о перспективах ее хозяйственного освоения.

Все методы карстологического прогноза можно разделить на качественные – некоторое вероятностное суждение о последствиях развития карстового процесса, которое не несет числовой нагрузки – и количественные, в результате которых карстовая опасность определяется количественным показателем или набором таковых (интенсивность провалообразования, средний диаметр провала).

В отличие от общей прогностики, где отсутствует дифференциация методов качественного прогнозирования, в инженерной геологии выделены две его группы: методы индикаторов (геологических, физико-географических и техногенных) и методы аналогий (инженерно-геологических) [3–5].

Методы индикаторов нашли достаточно широкое применение в практике карстологического прогноза. Карстоопасность территории определяется распространением поверхностных и (или) подземных проявлений или места сосредоточения природных или техногенных воздействий, инициирующих карстовый процесс и провалообразование [5]. Эффективный карстологический прогноз возможен при понимании условий и факторов развития карстового процесса и характера его проявлений как на глубине, так и на поверхности карстового массива. В рамках данного исследования предлагается осуществление качественного карстологического прогноза с применением геофизических методов для территории г. Кентау (Казахстан) и его окрестностей. Данное исследование посвящено оценке карстоопасности территории развития преимущественно карбонатного карста, что обусловлено литологическим составом палеозойских пород (известняки и доломиты верхнего девона и карбона).

Краткая характеристика природных условий изучаемой территории. Город Кентау расположен в Туркестанской области Республики Казахстан, в 24 км северо-восточнее города Туркестана, в 190 км от Шымкента (рис. 1).

Рельеф, геоморфология и гидрография. Изучаемая территория находится у южного подножия хребта Каратау, являющегося северо-западным отрогом Западного Тянь-Шаня. Общая протяженность хребта Каратау составляет около 420 км. Делится на Восточный, или Малый Каратау, и Юго-Западный Каратау. Юго-Западный Каратау, к которому относится изучаемая территория, прорезан многочисленными долинами и разделен на ряд массивов, сложенных известняками, песчаниками, конгломератами карбона и вулканогенными породами девона. Характерной чертой является неглубокое залегание пород скального фундамента. Склоны расчленены большими и малыми ущельями и сухими руслами рек. Вершины водоразделов плоские, выровненные.

Гипсометрическое положение изучаемой территории характеризуется большими амплитудами колебания абсолютных высот поверхности рельефа: в южной части участка от 330 м в долинах рек до 430 м на водоразделах, в северной части – от 490 м в долинах рек до 750–800 м и выше на водоразделах. На территории г. Кентау абсолютные отметки изменяются от 380 до 480 м. Уклон рельефа местности изучаемой территории в среднем составляет 0°–5°, увеличиваясь на склонах возвышенностей в северной части исследуемой территории до 9°–15°.

Максимальные уклоны характерны для территории, расположенной к северо-востоку от изучаемого участка. Там, в предгорьях хребта Каратау, уклоны местности могут достигать 25°–38°. Экспозиция склонов в пределах изучаемой территории характеризуется преимущественно северо-западным, юго-западным и юго-восточным румбами, в которых ориентированы 75 % склонов (рис. 2).

Исследуемая территория по своему положению занимает промежуточную ступень между горными массивами и аккумулятивными равнинами и находится на границе областей с денудационным и аккумулятивным рельефом: северо-восточная часть приурочена к области эрозионно-денудационных низкогорий, юго-западная – аллювиально-пролювиальных наклонных равнин. Эрозионно-денудационные низкогорья – это преимущественно плоские, пологоволнистые, реже увалистые поверхности с абсолютными высотами до 600 м. Для предгорий хребта Каратау характерна хорошая расчлененность денудационных поверхностей долинами рек и временных водотоков. Выровненные пространства междуречий, часто покрытые щебенистыми отложениями и лессовидными суглинками, местами приобретают вид ориентированных в направлении главного речного стока увалов с мягкими контурами вершин и склонов.

Поверхность аллювиально-пролювиальных равнин обычно плоская, пересеченная многочисленными долинами горных рек. Глубина вреза долин разнообразная и уменьшается по мере удаления от предгорий хребта. Долины такого типа являются хорошими дренами, препятствующими накоплению подземных вод в верхних слоях аллювиально-пролювиальных отложений. Чередование продольных долин с водораздельными пространствами создает в предгорьях увалистый рельеф.

Исследуемая территория характеризуется густой речной сетью. Водный режим рек – питание, нормы стока и модули стока – тесно связан с высотой и экспозицией склонов гор, с которых стекают реки. Плотность речной и овражно-балочной сетей на исследуемой территории может достигать 3 км на 1 км² и уменьшается по мере удаления от речных долин. На рис. 2 представлена карта линейной плотности русел постоянных и временных водотоков, выделенных на исследуемой территории с использованием материалов радарной топографической съемки (SRTM). Линейная плотность рассчитана как отношение суммарной длины водотоков к единице площади.

Техногенная нагрузка и общее описание экологических условий. Город Кентау был образован в августе 1955 г. на базе пос. Миргалимсай для разработки полиметаллического месторождения. Разработка Миргалимсайского месторождения свинцово-серебряных и баритовых руд обусловила специфику социально-экономического развития г. Кентау как моногорода. Освоение данного месторождения является причиной подработки территории, которая, в свою очередь, в данных природных условиях благоприятствует развитию карстового процесса и провалообразования.

На территории города Кентау располагаются трансформаторный завод, цех резинотехнических изделий и рудники «Глубокий», «Западный», «Миргалимсай» и Байалдырское хвостохранилище, что приводит к загрязнению атмосферного воздуха. Экологические исследования, проводимые в 2019 г., показали превышение предельно допустимого уровня загрязнения по среднесуточным показателям в 116 случаях, зафиксировано 58 замеров с превышением максимальных разовых концентраций¹.

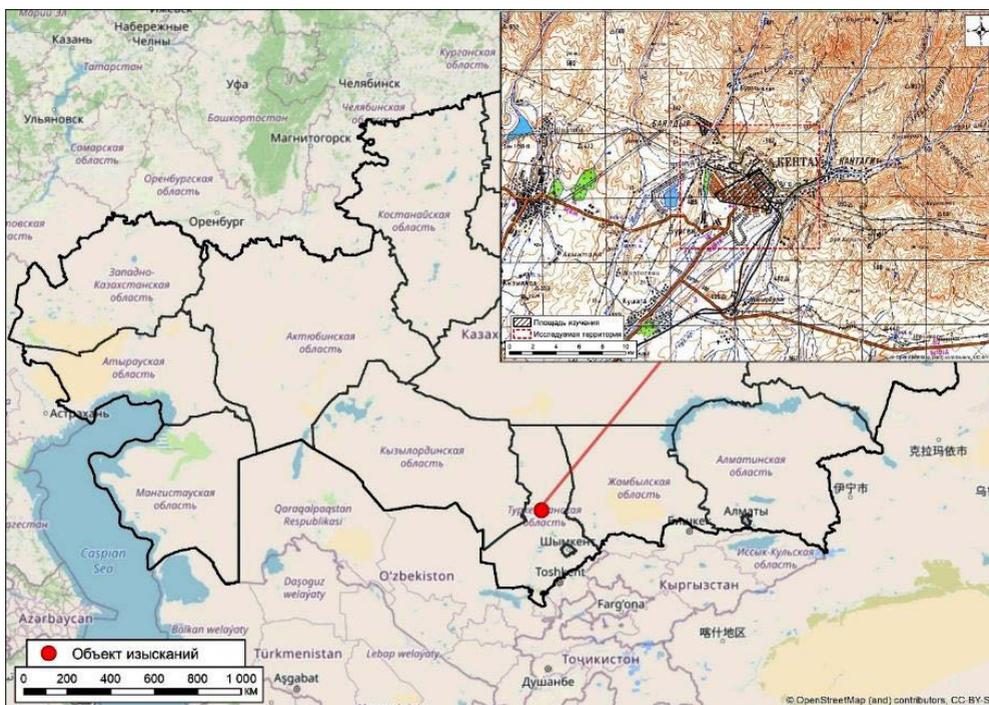


Рисунок 1. Расположение объекта изысканий на территории Республики Казахстан
Figure 1. Location of the survey object on the territory of the Republic of Kazakhstan

¹ Экология Кентау: оценка рисков и безопасности. URL: <https://yujanka.kz/ekologiya-kentau-otsenka-riskov-i-bezopasnosti/>

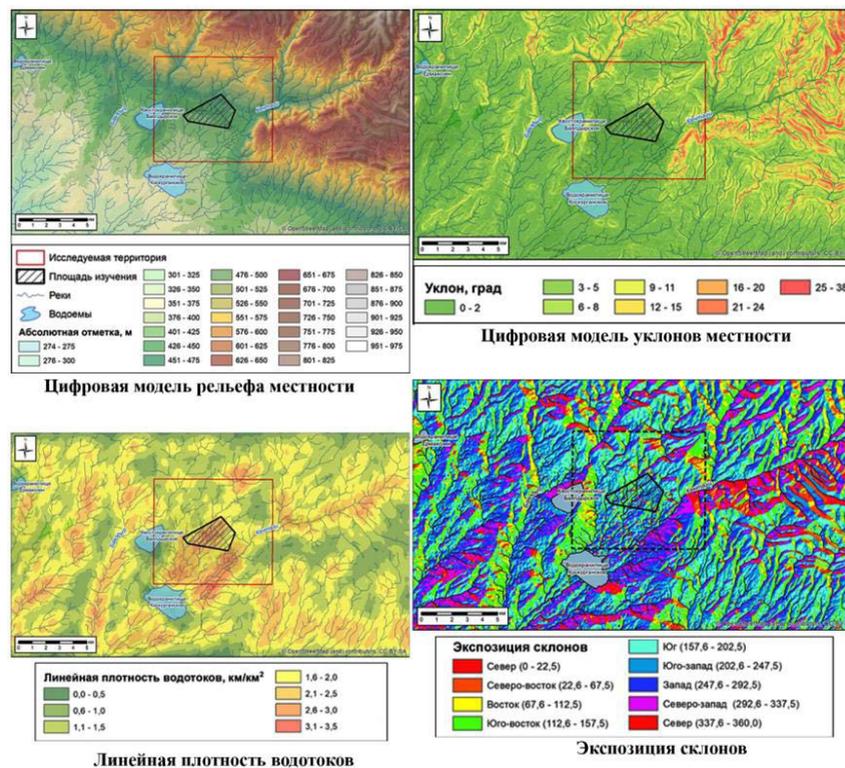


Рисунок 2. Цифровые модели рельефа местности
Figure 2. Digital terrain models

Особого внимания заслуживает вопрос качества подземных вод. Согласно результатам ряда исследований, шахтные воды, выходящие на поверхность и разгружающиеся в отложения мелового водоносного горизонта, несут еще и экологическую опасность в качестве источника загрязнения природных сред. Это связано с тем, что в подземные горные выработки месторождения Миргалимсай до затопления вместе с отходами было заложено 15 637 т токсичных веществ и 14,8 млн т промышленных отходов обогатительных фабрик, содержащих флотационные компоненты. Поднимающиеся на поверхность шахтные воды могут растворять элементы-загрязнители и служить самостоятельным источником загрязнения¹.

Структурно-тектоническое и геологическое строение. В геологическом строении приповерхностной части исследуемой территории, по региональным данным [6], принимают участие отложения девонской, каменноугольной, меловой и четвертичной систем (рис. 3).

Верхнедевонские отложения представлены фаменскими (D_3fm) карбонатными породами: известняками, доломитами, карбонатными брекчиями, залегающими трансгрессивно на франских (D_3fr) песчаниках и алевролитах. Выше залегают нерасчлененный комплекс аккальпинской свиты D_3-C_1ak , имеющей схожее литологическое строение. Известняки и доломиты здесь часто битуминозные, слоистые, плитчатого или массивного строения.

Отложения каменноугольной системы представлены турнейскими (C_1t) и визейскими (C_1v) известняками, доломитами и мергелями. От подстилающих отложений отличаются наличием подчиненного количества прослоев терригенных образований: аргиллитов, алевролитов,

песчаников и конгломератов. В визейских осадках среди известняков встречаются пласты гипса. Мощность верхнедевонских и нижнекаменноугольных карбонатных пород достигает 0,5–1,6 км. Карбонатные породы среднего палеозоя (D_3-C_1) характеризуются трещиноватостью и закарстованностью, что несколько снижает их прочностные характеристики.

Меловые отложения в силу структурно-тектонических условий территории отличаются спорадическим распространением и малой мощностью, не превышающей, по архивным данным бурения, 22,5 м. Отложения представлены глинами красными и зеленовато-серыми, аргиллитоподобными, иногда гипсоносными. По региональным данным, в строении системы могут принимать участие пески, песчаники и конгломераты с прослоями алевролитов. Иногда могут встречаться прослои карбонатов.

Отложения четвертичной системы связаны на изучаемой территории преимущественно с денудацией, происходящей на фоне периодически проявляющихся дифференцированных, преимущественно вертикальных движений земной коры. На исследуемой территории четвертичные отложения относятся, главным образом, к делювиально-пролювиальному генетическому типу и представлены песчано-суглинистыми образованиями с высоким содержанием гравия, щебня и дресвы. В долинах рек встречаются аллювиальные отложения, накопление которых связано с продолжающейся эрозией в горных районах, где в результате сейсмоструктурных проявлений вертикальные восходящие движения преобладали и сохраняются до наших дней. В речных долинах на равнинных частях территории аллювий представлен

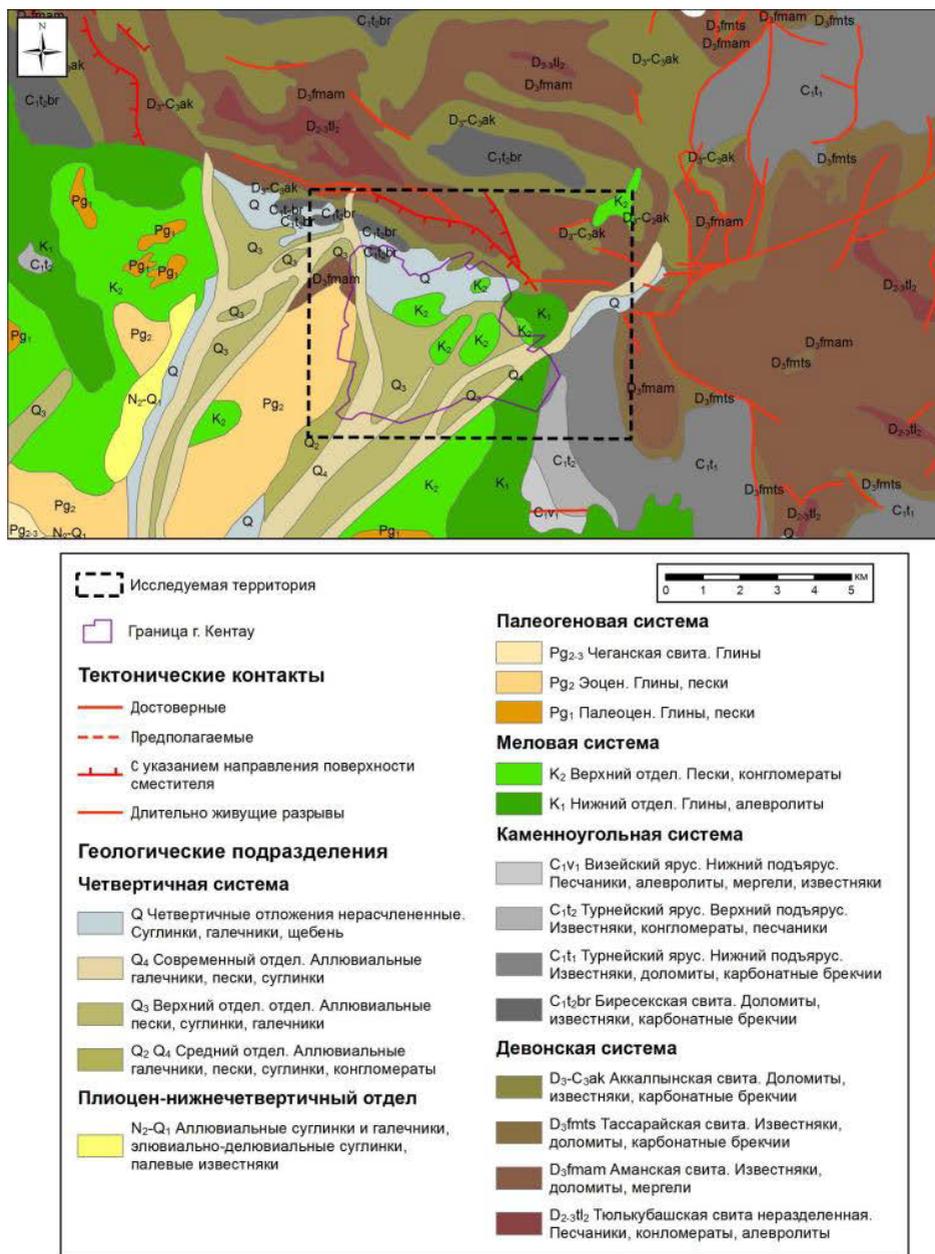


Рисунок 3. Фрагмент Геологической карты СССР масштаба 1 : 2 000 000. Лист К-42-III [8]
Figure 3. Fragment of the Geological Map of the USSR, scale 1 : 2,000,000. Sheet K-42-III [8]

более мелкими гранулометрическими фракциями, чем в предгорьях. Он состоит из песков, супесей и суглинков, слагающих пойменные террасы. Пески обычно занимают нижние части разрезов. Крупность их и количество гравия и галек резко уменьшаются по мере удаления от гор. Мощность отложений составляет от 2,5 до 8–12 м.

Основной чертой складчатого комплекса, в пределах которого расположена исследуемая территория, является развитие линейно вытянутых горстантиклинорий и располагающихся между ними впадин. В горстантиклинориях складчатый фундамент выведен на поверхность, и выступы его морфологически выражены горными хребтами (хр. Каратау), во впадинах фундамент находится на различных глубинах под чехлом мезокайнозойских отложений.

Период переработки складчатого фундамента в позднем девоне – раннем карбоне связан с процессом форми-

рования пликативных и дизъюнктивных нарушений в толще красноцветных терригенных отложений, перекрытых карбонатными породами, интенсивное осадконакопление которых началось в позднем девоне. К концу герцинского времени вследствие региональных восходящих движений и регрессии моря на изучаемой территории установился континентальный режим, способствовавший выветриванию пород.

В меловое время на западе и юго-западе хребта Каратау вследствие относительно мелководной трансгрессии сформировались глинистые, известково-глинистые и песчано-глинистые толщи отложений. Многократные дислокации, которые испытывала территория, привели к формированию густой сети разрывных нарушений и образованию повышенной трещиноватости палеозойских пород. Согласно данным региональных исследований [8],

крупные тектонические контакты имеют юго-восточное простирание (рис. 3).

Гидрогеологические условия. В гидрогеологическом отношении территория города Кентау относится к Тяньшанской горноскладчатой гидрогеологической области. В структурном отношении, как сказано ранее, область характеризуется рядом перемежающихся антиклинорий и синклинорий, осложненных складками второго и третьего порядка, а также зонами тектонических разломов. Породы, слагающие территорию этой области, представлены разновозрастными метаморфическими, магматогенными и осадочными образованиями, сильнотрещиноватыми, особенно вблизи зон тектонических нарушений. В карбонатных породах развит карст.

Исследуемая территория приурочена к Каратауской системе бассейнов трещинных вод, в пределах которой следует выделить водоносный горизонт средневерхнечетвертичных аллювиально-пролювиальных отложений и водоносный комплекс верхнедевонских и нижнекаменноугольных отложений.

Водоносный горизонт средневерхнечетвертичных аллювиально-пролювиальных отложений. Горизонт приурочен к толщам конусов выноса и отложениям речных террас, сложенным гравийно-галечниковыми и валунными отложениями с песчаным и супесчаным заполнителем, с прослоями водоупорных глинистых отложений. В зависимости от литологического строения пород и условий их залегания воды горизонта грунтовые или напорные. Мощность горизонта определяется геоморфологическими, структурно-тектоническими и геологическими условиями. Воды пресные, гидрокарбонатно-кальциевые. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод водотоков, за счет перетока из нижележащих горизонтов.

Водоносный комплекс верхнедевонских и нижнекаменноугольных отложений. Значительные по площади воды карбонатных пород прослеживаются вдоль всего юго-западного склона Большого Каратау, на северо-восточном склоне Малого Каратау, а также вдоль Главного каратауского разлома. Литологически это сложный комплекс конгломератовидных и сажистых известняков, песчаников, доломитов, мергелей, аргиллитов и глинистых сланцев. Все эти породы смяты в складки, разбиты густой сетью трещин выветривания и крупными тектоническими разломами с широкими зонами дробления, достигающими 200–300 м и более. Глубина трещиноватой зоны, обуславливающей водопроницаемость карбонатных пород, колеблется в пределах 75–100 м; в зонах тектонических разломов она наблюдается на значительно больших глубинах. В других литологических разностях пород трещины проникают до глубин 35–60 м. Вдоль линий тектонических разломов и на контактах карбонатных пород с некарбонатными интенсивно развит карст. Все это здесь обусловило сильную обводненность пород описываемой карбонатной толщи. Циркулирующие в ней трещинно-карстовые воды обычно имеют свободную поверхность, но иногда обладают напором. Последние приурочены к синклиналим структурам и некоторым зонам тектонических нарушений.

Воды описываемого комплекса ультрапресные и пресные, с минерализацией от 0,1 до 0,7 г/дм³. По составу

они преимущественно гидрокарбонатные кальциевые и натриевые. Основную роль в питании комплекса играют инфильтрующиеся воды атмосферных осадков и поверхностного стока, а также воды, поступающие подземным путем из других водоносных горизонтов.

Геофизические исследования. Карстовые структуры могут быть проанализированы различными геофизическими методами, в частности методами электротомографии [7], которые в настоящее время широко используются для поиска зон дробления и карстовых полостей, заполненных дисперсным и (или) обломочным материалом, водой [8]. Например, для поиска карстовых полостей и пещер на территории Апулии (юго-восток Италии) рядом исследователей были применены георадар (GPR) в качестве наиболее представительного метода, метод отраженных волн (SR) и электрическая томография (ERT) [9].

Дж. Кауфманом [10] с использованием гравиметрических данных была получена трехмерная модель карстового массива, отражающая характер подземной закарстованности в окрестностях гор Гарц на севере Германии. С помощью геофизических методов определены форма и характер простирания подземных карстопоявлений под толщей неогеновых и четвертичных отложений на территории распространения карстовых полей в Югославии [11]. Ю. В. Патрушевым предложен метод поиска дискретных структур, под которыми понимаются элементы ослабления карстового массива, посредством регистрации сейсмических сигналов отраженных волн и последующего установления возможного положения зон развития подземной закарстованности [12].

Учеными Горного института Уральского отделения РАН (г. Пермь, Россия) проведены гравиметрические исследования территории Верхнекамского месторождения с целью определения мест локализации зон дробления в карстующихся породах по плотностным изменениям карстующихся и перекрывающих их пород, связанным с их разуплотнением за счет трещин. Наличие зон трещиноватости в дальнейшем подтверждалось результатами прямого наблюдения – бурением и гидрогеологическими исследованиями [13].

Для изучаемой территории в качестве базовых методов исследования были приняты методы электроразведки – вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электропрофилеирование (ЭП ДОЗ). При этом электропрофилеирование выполнялось на первом этапе проведения работ, а вертикальные электрические зондирования – на втором.

На первом этапе наблюдения выполнены методом электропрофилеирования с применением дипольной осевой установки (ДОЗ) и проведены только с пятью разносами: 50, 100, 150, 200, 250 м, что ограничивает детальность полученной информации, особенно в верхней части разреза. Эти данные были обработаны по методике электротомографии. На втором этапе для детализации и параметрического обеспечения полученных ранее данных были проведены наблюдения ВЭЗ установкой Шлюмберже на 17 точках, расположенных в основном вблизи скважин с использованием полуразносов от 2 до 200 м. Для обеспечения совместной обработки и интерпретации данных первого и второго этапов данные профилирования ДОЗ

были пересортированы в точки зондирования и обработаны в программе «Зонд» по методике классических ВЭЗ. Сравнение кривых зондирования, зарегистрированных с дипольной установкой и установкой Шлюмберже в точках одинакового местоположения, показало их совпадение в пределах точности наблюдений.

Качественная интерпретация. На этапе качественной интерпретации решались вопросы изучения пространственного изменения электрических свойств среды. Для этой цели были получены карты кажущихся сопротивлений для различных разностей, характеризующие изменение электрических свойств пород как по площади, так и с глубиной. В качестве эффективной глубины зондирования $Z_{эф}$ при визуализации поля использовано значение глубины, равное $1/4 AB$.

В поле кажущихся сопротивлений (КС) отмечается вертикальная и горизонтальная дифференциация сопротивлений. Это свидетельствует о значительных изменениях структуры и состояния грунтов. С глубиной сопротивление, как правило, уменьшается, но на уровне кровли коренных пород снова возрастает. Породы верхней части разреза характеризуются повышенными сопротивлениями, что связано с низким содержанием влаги. Повышенные сопротивления также встречаются на участках выхода на поверхность коренных пород. Исключение составляют точки ВЭЗ пониженного сопротивления на северо-востоке города, вблизи районов Шанхай и Шахстрой, которые находятся в зоне предполагаемого разлома.

Самые низкие значения КС (20–50 Ом·м) наблюдаются в интервале эффективных глубин до 10–20 м на участке

скважин 7, 8, 28, 30 и 31 (рис. 4), которые попадают в зону повышенной геодинамической активности, выделенную по данным линеamentного анализа.

Далее, с глубиной, на этом участке происходит постепенное повышение кажущегося сопротивления. Это объясняется появлением в разрезе толщи коренных пород и зоны их выветривания. По характеру изменения кажущегося сопротивления с глубиной на участке скважин 28, 30, 31 фиксируется выступ коренных пород. Наиболее высокие значения КС 80–300 Ом·м наблюдаются на эффективных глубинах выше 100 м.

На участке скважины 27 фиксируется особенно яркое поднятие в кровле коренных пород, что отмечается повышением КС (рис. 5). На участке скважин 1, 2, 16, 25 наблюдается иное распределение КС по глубине. Здесь отмечается устойчивое понижение сопротивления с глубиной (рис. 5). Такой характер распределения КС по площади и глубине может свидетельствовать о понижении отметок рельефа кровли коренных пород на этом участке и высоком содержании воды в грунтах разреза.

В северной части города на территории шахтных полей высокие значения КС (100 Ом·м и более) отмечаются на относительно небольших эффективных глубинах (менее 10 м), что связано с общим поднятием и выходом в приповерхностную часть разреза коренных карстующихся пород (рис. 5).

Выделение двух типов разреза на смежных участках позволяет сделать предположение о наличии блоков пород, разделенных разломами северо-восточного–юго-восточного (СВ–ЮЗ) простирания,

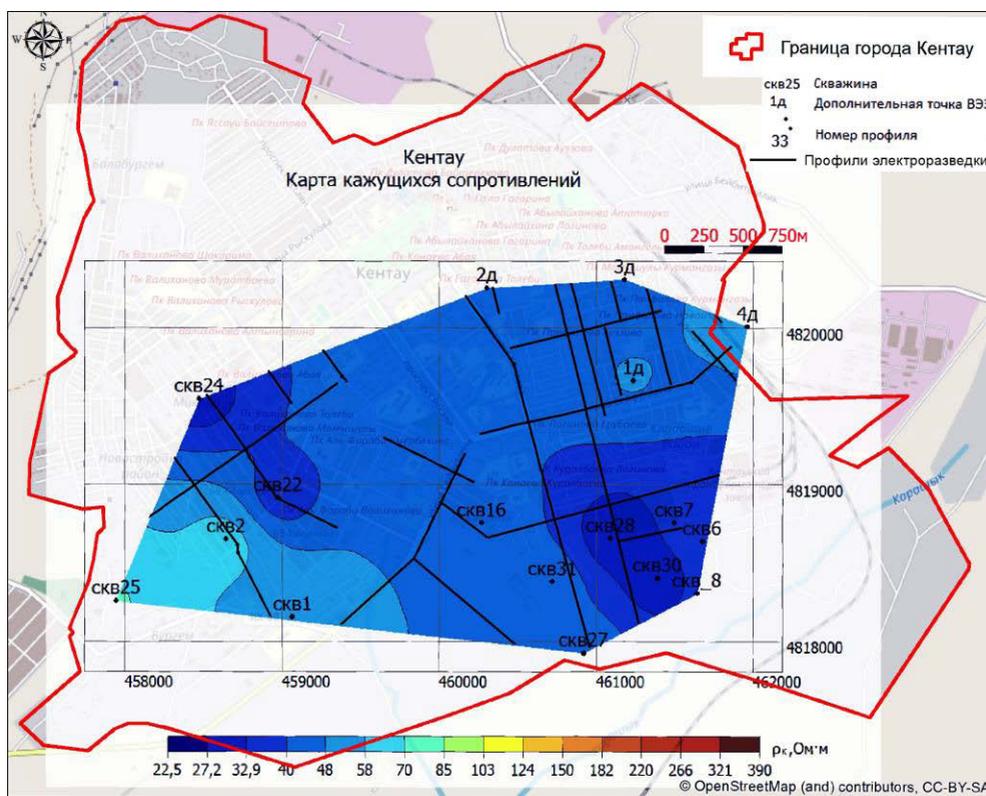


Рисунок 4. Карта кажущихся сопротивлений на эффективной глубине 10 м
Figure 4. Map of apparent resistivity at an effective depth of 10 m

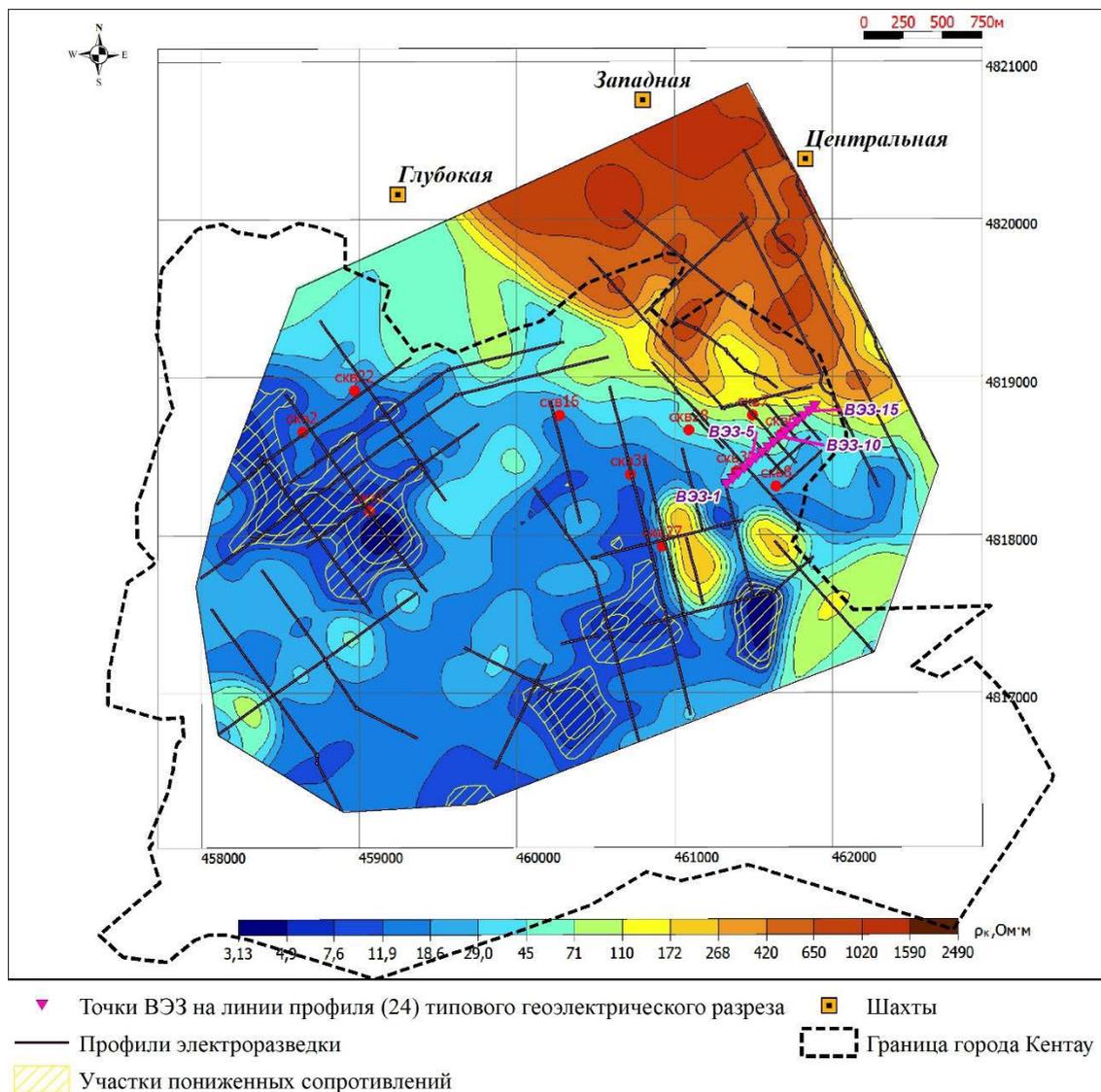


Рисунок 5. Карта кажущихся сопротивлений на эффективной глубине 25 м
 Figure 5. Map of apparent resistivity at an effective depth of 25 m

которые пространственно совпадают с крупными линеamentами того же направления, выделенными на основе анализа космоснимков и карт (рис. 6). В связи с разными гипсометрическими уровнями водоносных горизонтов на этих участках в результате поступления грунтовых вод из затопленного рудника и их дренажа возможно образование зоны активного водообмена, способствующего ускоренному развитию карстового процесса и суффозии.

Количественная интерпретация. В качестве параметрического материала для литологической привязки геоэлектрических границ, выделяемых по данным ВЭЗ, и геологического истолкования получаемых электроразведочных материалов использованы результаты инженерно-геологического бурения рядом расположенных скважин. Пример параметрического анализа одной из кривых ВЭЗ представлен на рис. 7. В связи с недостаточной глубиной скважин интерпретация на глубинах более 20 м основывалась на имеющейся общей геологической информации и форме кривых зондирования.

При истолковании необходимо учесть тот факт, что в пределах участка исследований рельеф сложный, а толщина грунтов, слагающих верхнюю часть геологического разреза, имеет значительную изменчивость. В результате анализа *всех кривых* зондирования для всего изучаемого участка выбрана четырехслойная геоэлектрическая модель среды.

Результаты количественной интерпретации ВЭЗ представлены в виде геоэлектрических разрезов. По данным ВЭЗ выделено четыре геоэлектрических слоя. Дифференциация геоэлектрических свойств пород по глубине выражена слабо в связи с большим шагом разностей данных ДОЗ, поэтому информация по глубине имеет общий характер.

Первый слой мощностью около 25 м отождествляется с толщей глинистых пород, включающей прослойки глин, суглинков и щебня, однако имеет высокое удельное сопротивление (УЭС) в северо-восточной части, связанное с высоким сопротивлением коренных пород, выходящих на поверхность. В юго-западной части

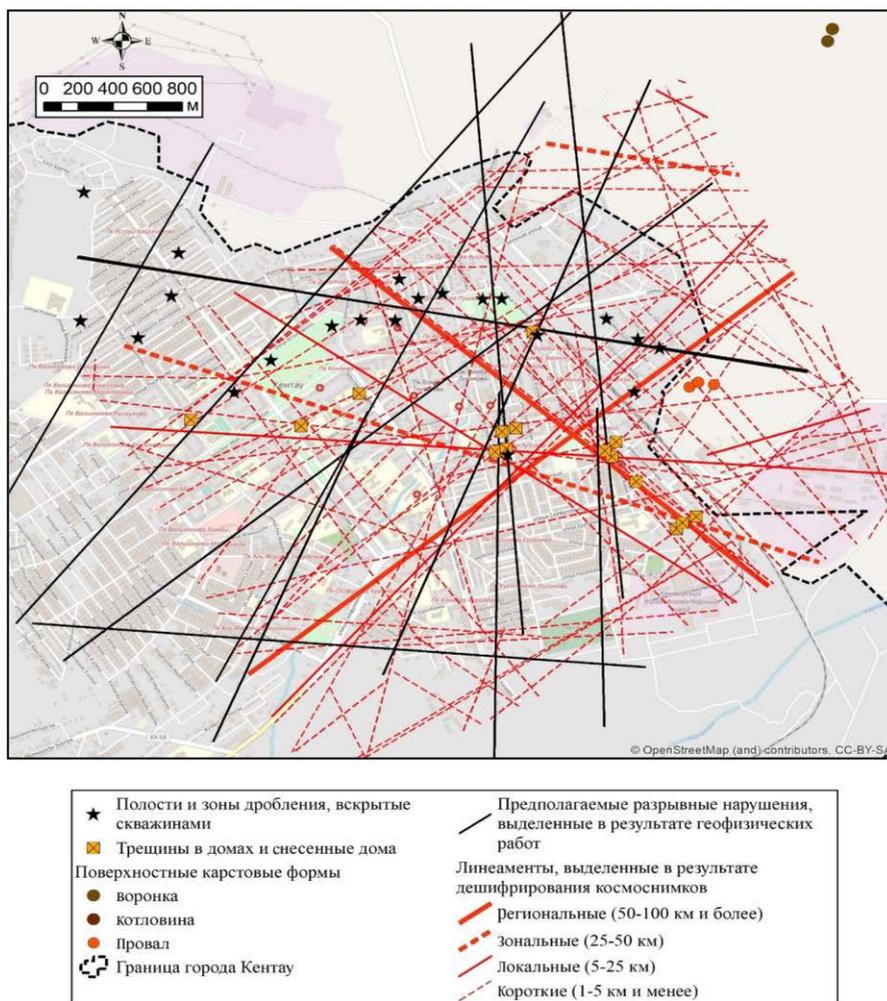


Рисунок 6. Карта тектонических разрывных нарушений, выделенных по результатам геофизических исследований, совмещенная с картой линеаментов², выделенных по результатам структурного дешифрирования
Figure 6. Map of tectonic faults identified according to the results of geophysical surveys, combined with a map of lineaments identified according to the results of structural interpretation

сопротивление понижается при увеличении содержания водонасыщенных терригенных пород.

Второй слой мощностью около 25 м сложен коренными породами и продуктами их выветривания в северо-восточной части участка и щебнистыми породами коры выветривания на остальной территории.

Третий и четвертый слои мощностью до 75 м в основном представлены коренными породами с возможным включением водонасыщенных терригенных грунтов с пониженным сопротивлением в понижениях рельефа коренных пород в юго-западной части участка. Эта толща разделена на два слоя условно из-за значительной вариации состава и водонасыщенности грунтов по площади. Кровля коренных пород в юго-западной части участка надежно выделяется только на локальных участках поднятий, отмеченных повышением УЭС. Типовой геоэлектрический разрез представлен на [рис. 8](#).

Выводы по результатам геофизических исследований. В результате проведенных геофизических работ было

установлено, что участок имеет сложное геологическое строение. По данным геофизических работ (ВЭЗ и ЭП) выделена сеть разрывных нарушений СВ–ЮЗ направления, которые могут служить путями перетока подземных вод из зоны затопленного рудника.

На участке фиксации смещений поверхности установлена зона повышенной геодинамической активности, с которой также связан ряд тектонических нарушений СВ–ЮЗ направления, выявленных по данным геофизических работ. В пределах этой зоны установлено поднятие в рельефе коренных пород, которое может быть причиной снижения мощности рыхлых отложений и, соответственно, повышения риска деформации земной поверхности вследствие развития карстового процесса и выхода карстовых полостей на поверхность в виде провалов.

Характеристика закарстованности территории. Длительная история геологического развития территории города Кентау обусловила накопление мощных толщ растворимых пород, перекрытых комплексом песчаных и глинистых отложений мезокайнозойского возраста.

²Копылов И. С. Детальное дешифрирование космоснимков в пределах северной части города Кентау для оценки геодинамической активности и выделения потенциально опасных карстовых участков: отчет о НИР. Пермь, 2020. 4 с.

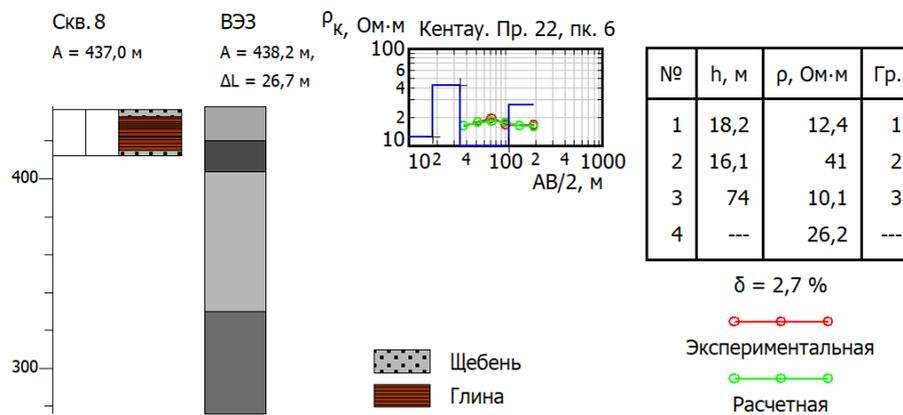


Рисунок 7. Количественная интерпретация параметрического зондирования по данным инженерно-геологического строения участка
Figure 7. Quantitative interpretation of parametric sounding according to the engineering-geological structure of the site

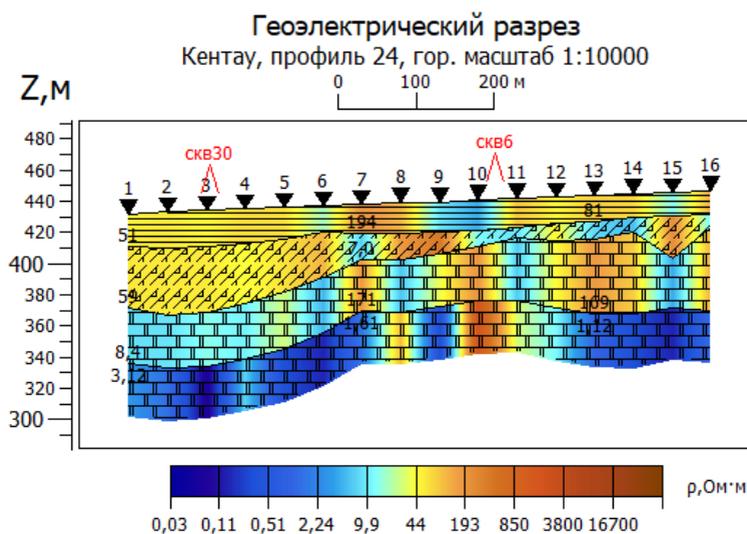


Рисунок 8. Типовой геоэлектрический разрез (линия профиля приведена на рис. 5)
Figure 8. Typical geoelectric section (the profile line is shown in fig. 5)

Кроме того, периоды регрессии, неоднократно происходившие в геологическом прошлом, привели к формированию древних форм карста в толще палеозойских пород.

Согласно типизации карста по литологии карстующихся пород, на территории города Кентау наиболее широко развит карбонатный тип карста вследствие повсеместного распространения карбонатных пород девонской и каменноугольной систем, представленных главным образом известняками, реже – доломитами. Процесс растворения связан с протерозойскими массивными доломитами и кристаллическими известняками, кембрийскими доломитами и водорослевыми известняками, девонскими и карбоновыми известняками и доломитами. Карстовые формы представлены нишами, карами, воронками, пещерами, исчезающими реками, источниками (до $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$). Встречаются погребенные воронки (диаметр до 60, глубина до 15 м), заполненные красноцветными меловыми отложениями [14].

В предгорьях хребта Карату широко развиты тектонические нарушения, обуславливающие сильную трещиноватость карстующихся пород, что создает благоприятную среду для растворения карбонатов и аккумуляции в трещинах дисперсного материала, выносимого из перекры-

вающей толщи. Известно, что развитие карста в неогене происходило под влиянием теплого и влажного климата, а в четвертичное время – под влиянием оледенения вследствие расклинивающего воздействия на стенки трещин в массиве пород, вызванного неоднократными циклами оттаивания нижних масс льда при трении ледника о поверхность и их повторного замерзания.

Таким образом, исследуемая территория города Кентау характеризуется преимущественным развитием *карбонатного карста* при *подчиненном развитии сульфатно-карбонатного карста*. Основные карстующиеся породы – *известняки* и *доломиты*. По степени обнаженности карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи практически повсеместно развит *покрытый тип карста* [15]. По времени образования *карст современный*, так как он продолжает проявлять себя в виде образования новых карстовых форм как на поверхности земли, так и в толще пород, главным образом, вследствие техногенеза.

Изучение и оценка распространения отрицательных форм рельефа, так или иначе связанных с карстовыми явлениями, развивающимися на территории города Кентау и его окрестностей, осуществлены в результате:

– сбора, анализа и обобщения архивных материалов геологических, гидрогеологических и геофизических исследований прошлых лет и опубликованных работ;

– дешифрирования космических снимков высокой точности из различных источников (Google, Yandex, Here, Bing), отражающих ситуацию в разные временные периоды для снижения ошибки. С использованием спутниковых данных выделено 230 поверхностных карстовых форм.

Следует отметить, что выделение поверхностных карстопроявлений с использованием архивных материалов, топографических карт и данных дистанционного зондирования Земли без наземного карстологического обследования местности сопряжено с трудностью объективной оценки генезиса выделенных отрицательных форм и возможной переоценкой карстовой опасности. Сложность картирования карстовых форм в данных условиях обусловлена возможным ошибочным отнесением к таковым, например, техногенных отрицательных форм рельефа. Вследствие образования г. Кентау на базе рабочих поселков Кантаги и Миргалымсай, территория города характеризуется наличием подработанных участков, участков нарушенного сложения вследствие разработки Ачисайского полиметаллического месторождения.

Кроме этого, сложность возникает при определении глубины карстовых форм при дешифрировании космоснимков. Глубина поверхностных карстовых форм определена условно по различиям в цветотонах: чем темнее карстовая форма, тем больше значение ее глубины.

Основываясь на анализе дешифрирования космоснимков, можно сделать вывод о том, что поверхностные карстовые формы, распространенные в окрестностях города Кентау, вытянуты полосой до 1,5 км в ширину в юго-восточном направлении в 1,5–2,0 км севернее города. Оценка поверхностной закарстованности непосредственно территории г. Кентау затруднена вследствие ее плотной застройки.

На исследуемой территории в основном встречаются сухие карстовые воронки, которых насчитывается

около 135 шт. Диаметр воронок варьирует в значительных пределах: диаметр особо крупных форм достигает 16,5 м, карстовых воронок незначительных размеров – 5,5 м. Средняя глубина воронок составляет около 5,0 м. Форма воронок в профиле – чашеобразная, около половины в плане круглые (65 шт.), остальные – эллипсовидные (70 шт.). Практически все встречаемые карстовые воронки условно отнесены к древним вследствие относительно выположенной формы и повсеместно развитой задернованности бортов, реже встречаются воронки, в бортах которых наблюдаются выходы коренных пород.

Относительно реже распространены провалы (86 шт.), плотность которых к северу от города достигает 30 шт./км². Карстовые провалы представляют наибольшую угрозу для инженерных сооружений. Диаметр провалов изменяется от 2,3 до 76,0 м, что говорит о весьма значительном разнообразии условий и механизмов их образования. Средняя глубина провалов составляет 15,0 м. Форма в профиле – конусообразная, в плане большинство провалов эллипсовидные (58 шт.), остальные (28 шт.) – круглые. Провалы условно отнесены к молодым ввиду повсеместного выхода коренных пород в бортах и конусообразной формы в профиле.

На рис. 9 представлены кривые распределения карстовых воронок и провалов. Эмпирическому распределению воронок соответствует теоретическое логнормальное распределение со следующими параметрами: среднее значение – 1,7 (5,4 м в нелогарифмированном виде), стандартное отклонение – 0,6 (1,8 м в нелогарифмированном виде); провалов – логнормальное распределение со следующими параметрами: среднее значение – 2,1 (8,1 м в нелогарифмированном виде), стандартное отклонение – 0,8 (2,2 м в нелогарифмированном виде).

Кроме карстовых провалов и воронок на исследуемой территории встречаются крупные котловины (9 шт.) провального генезиса сложной в плане формы, образованные в результате слияния нескольких карстовых провалов. Развита севернее г. Кентау в предгорной местности и вытянута в юго-восточном направлении. Средняя глу-

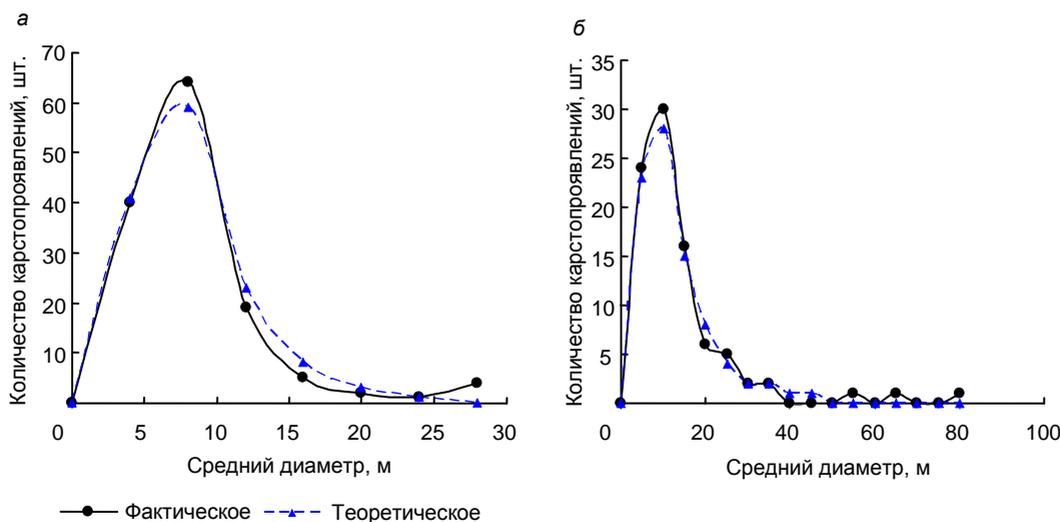


Рисунок 9. Кривая распределения диаметров древних карстовых воронок (а) и провалов (б)
 Figure 9. The distribution curve of the diameters of ancient sinkholes (a) and dolines (b)

бина составляет 30,0 м. Диаметр изменяется от 18,1 м до 49,9 м, единичные котловины достигают диаметров от 96,9 до 152,2 м. Условно отнесены к древним.

Карстовые воронки отличаются относительно небольшими глубинами: 83 % характеризуются глубиной до 5 м, 17 % – до 10 м. Глубина карстовых провалов преимущественно составляет 5–10 м (63 %), встречаются формы глубиной 10–20 м (23 %), глубина некоторых, наиболее глубоких карстовых провалов (9 %), достигает 30 м. Встречаются единичные провалы глубиной до 5 м (5 %). Карстовые котловины в силу особенностей своего генезиса характеризуются значительными глубинами: 20–30 м.

С поверхностными деформациями связаны деформации инженерных сооружений. Так как вследствие плотной застройки в черте города оценка поверхностной закарстованности затруднена, оценивалось состояние инженерных конструкций. Так, в северной части г. Кентау отмечается 16 домов с трещинами. Часть домов уже снесены в результате развития неравномерных осадок основания.

Особенности развития карста с учетом природных факторов и геофизических полей. Существенную роль в пространственном распределении поверхностных форм играют структурно-тектонические условия. Максимальное количество поверхностных карстовых форм закартировано на удалении 250–350 м от тектонических разломов. Следует отметить, что в качестве тектонических разломов использованы региональные дизъюнктивы, закартированные на геологической карте масштаба 1 : 200 000. Данные формы представляют собой ослабленные

трещиноватые зоны, их ширина составляет десятки, сотни метров. Примечательно, что ориентация поля карстовых форм совпадает с главным направлением разрывных нарушений (рис. 10).

Концентрацию карстовых форм вблизи зон повышенной трещиноватости – линеаментов, в том числе в условиях складчатости (в пределах Главной Кизеловской антиклинали, Пермский край, Россия) отмечает Д. Р. Золотарев [16–18]. Согласно исследованиям автора, карстовые формы, в частности карстовые поля – участки максимальной концентрации не только поверхностных, но и подземных карстовых форм – характеризуются логнормальным распределением относительно линеаментов.

Кроме структурно-тектонического и геологического факторов плотность поверхностных форм контролируют геоморфологические факторы. В результате одномерного статистического анализа получены кривые распределения поверхностных карстовых форм в зависимости от плотности водотоков – величины, характеризующей расчлененность рельефа местности. При прочих равных условиях с увеличением густоты речной сети увеличивается степень расчлененности рельефа, а следовательно, улучшаются условия для дренажа пресных поверхностных вод в глубь массива пород. Анализ кривых распределения свидетельствует о наибольшем скоплении поверхностных карстовых форм в районе, где суммарная длина водотоков на единицу площади равна 1,20–1,70 км/км².

Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от уклона рельефа носит логнормальный характер –

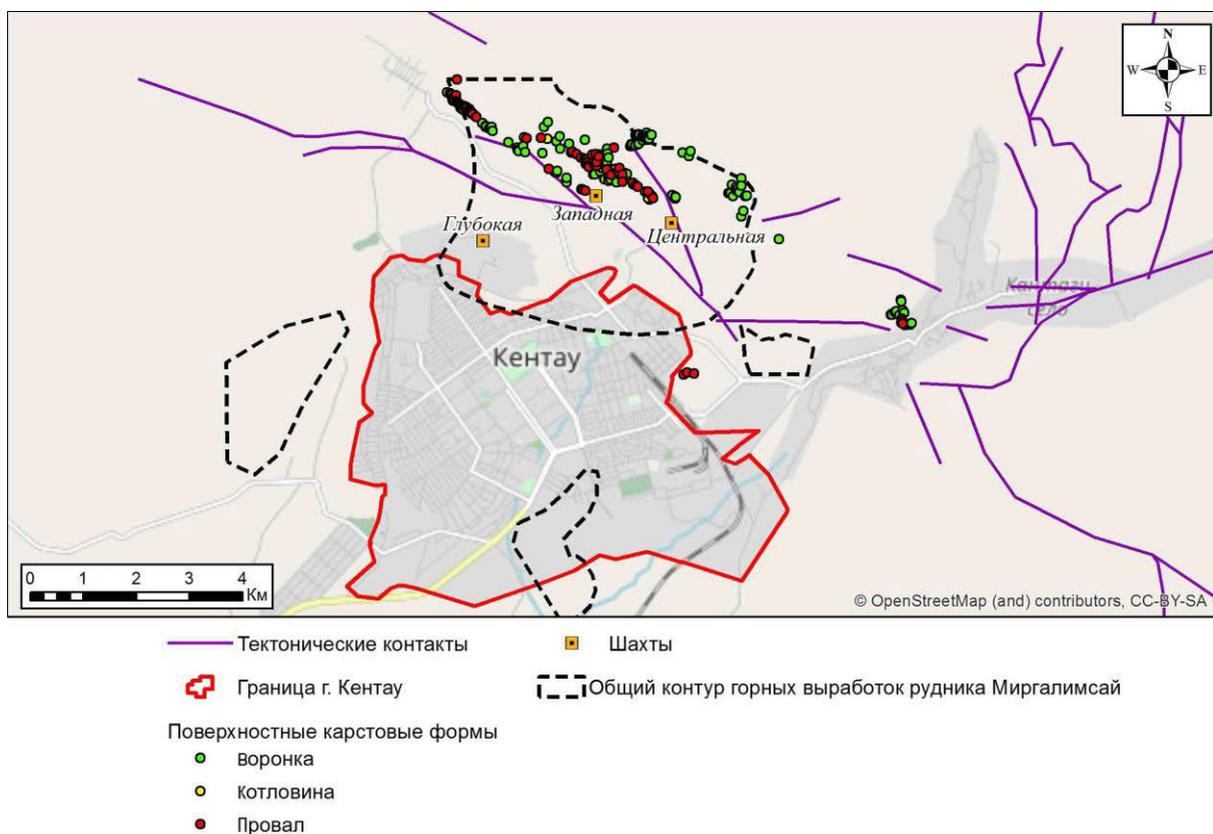


Рисунок 10. Карта распространения поверхностных карстовых форм и региональных тектонических нарушений
Figure 10. Map of the distribution of surface karst forms and regional tectonic faults

большинство форм находятся в пределах территорий с малым уклоном рельефа (3°–7°). Подобные условия благоприятствуют развитию карстовых процессов, потому что атмосферные осадки не успевают дренироваться по поверхности склона и инфильтруются в глубь массива растворимых по-

род. Также слабый уклон рельефа местности обеспечивает ламинарный характер движения грунтовых вод, зеркало которых часто повторяет поверхность рельефа.

Распределение карстовых форм в зависимости от абсолютных отметок рельефа местности отличается нор-

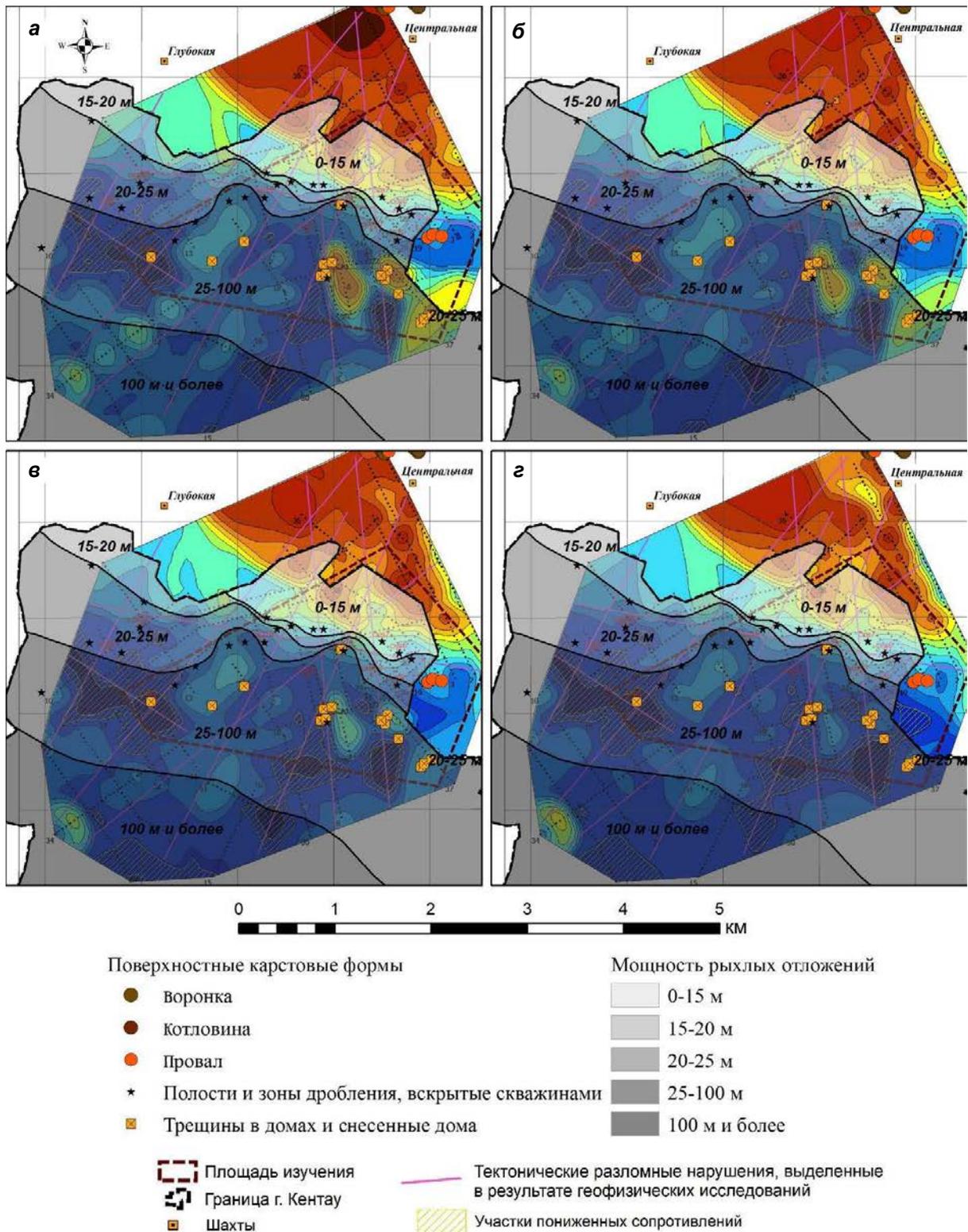


Рисунок 11. Карты кажущихся сопротивлений на различных глубинах, совмещенные с карстовыми проявлениями и разломами, выделенными по результатам геофизических исследований: а – 25 м; б – 50 м; в – 75 м; г – 100 м
Figure 11. Maps of apparent resistivity at various depths, combined with karst occurrences and faults identified according to the results of geophysical surveys: a – 25 m; b – 50 m; c – 75 m; d – 100 m

мальным характером. Большая часть всех поверхностных форм встречается в предгорьях хребта Каратау, в интервале абсолютных отметок 520–580 м, карстовые провалы приурочены к относительно пониженным альтитудам: 520–550 м. Приуроченность к предгорным частям возвышенностей также способствует карстовому процессу вследствие дренажа атмосферных осадков и талых вод не по поверхности массива, а в глубь него.

Более половины (69 %) карстовых форм, дешифрированных по космоснимкам, закартировано в пределах территорий распространения фаменских известняков под толщей четвертичного покрова. На участках развития глинистого водоупора мелового возраста закартировано минимальное количество поверхностных карстовых форм (около 1 %). Характер распределения карстовых провалов принципиально схож, однако наблюдается небольшое изменение процентного соотношения количества форм в пределах геологических подразделений.

Анализ полей кажущихся сопротивлений, фиксируемых по результатам ВЭЗ и ЭП (ДОЗ) на разных глубинах, позволяет выявлять тенденции в развитии карста: деформирование земной поверхности и инженерных сооружений связано преимущественно с участками пониженных сопротивлений. По результатам геофизических исследований на различных глубинах можно сделать вывод о морфологии кровли карстующихся отложений, в частности, выделить участки различной мощности по-

кровной толщи, приподнятые блоки, которые, при прочих равных условиях, отличаются повышенной вероятностью развития карста, так как здесь сокращается мощность перекрывающей толщи. Выделенные в результате геофизических исследований разрывные нарушения также являются весьма информативными при карстологическом анализе: в местах их повышенной плотности (большого количества пересечений) вероятность растворения выше вследствие нарушенности массива, обуславливающей возможность инфильтрации агрессивных вод с поверхности (рис. 11, а–з).

В зависимости от удаленности от тектонических нарушений, выделенных геофизическими методами на территории города, распределение деформаций носит нормальный характер со значительной асимметрией в сторону меньших значений. Большинство деформаций отмечено на расстоянии 100–150 м от разломов. Это связано с тем, что зоны разломов, аппроксимируемые на картах прямой линией, представляют собой трехмерные зоны, ширина которых может достигать нескольких сотен метров, особенно в тектонически активных складчатых областях. Кроме того, близкое к нормальному распределение проявлений карста, в том числе выраженных деформациями сооружений, свидетельствует о том, что на исследуемой территории на карстовый процесс кроме тектонического оказывают влияние и другие факторы.

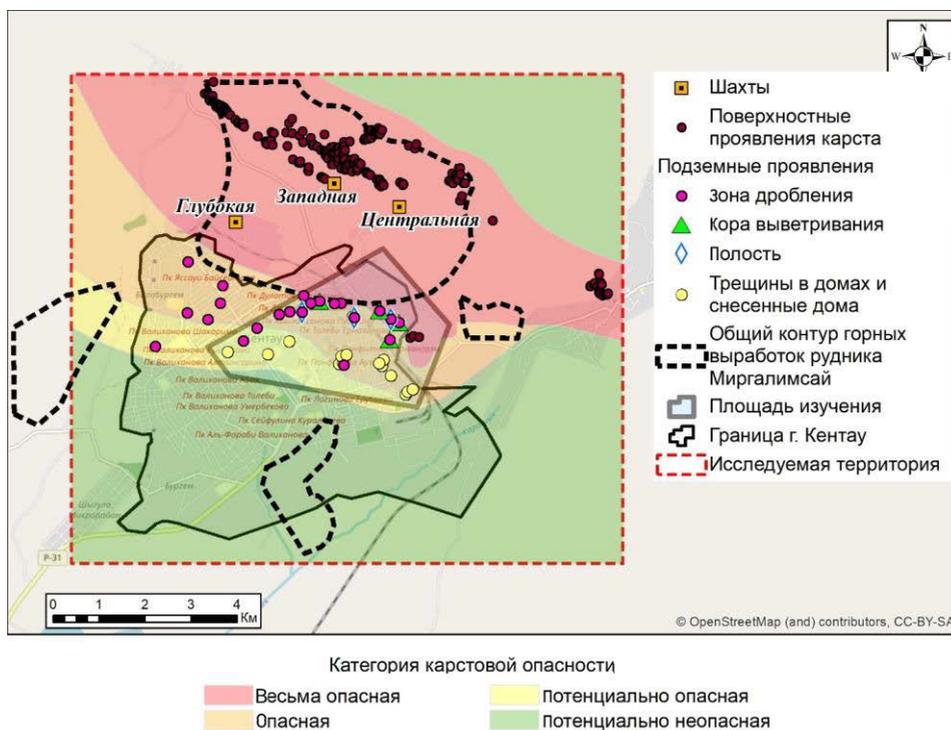


Рисунок 12. Карта карстовой опасности г. Кентау и прилегающей территории
 Figure 12. Karst hazard map of Kentau and adjacent area

Оценка карстоопасности. В результате совместного анализа распределения карстовых форм и природных условий развития карста в границах исследуемой территории выделены карстоопасные участки, установлены зоны развития и активизации структурных и тектонических трещин (рис. 12). Всего выделено 4 категории с различной степенью опасности: весьма опасная, опасная, потенциально опасная и неопасная. Выделенные карстовые участки имеют северо-западное (близширотное) простирание, обусловленное ориентацией региональных разломных тектонических структур и направлением погружения кровли карстующихся отложений (на юго-запад).

Участки, приуроченные к зоне тектонических нарушений, с малой мощностью перекрывающих пород, высокой плотностью развития карстовых форм отнесены к **весьма опасной категории**.

В условиях относительно большой мощности перекрывающих отложений и отсутствия поверхностных провальных карстовых форм находятся территории **опасной категории**.

Участки со схожими структурно-тектоническими, геологическими и геоморфологическими условиями, без поверхностных проявлений карста, с единичными подземными карстовыми формами, имеющие все предпосылки для развития карстового процесса и его проявления на поверхности, отнесены к **потенциально опасным**.

Участки, максимально удаленные от зон тектонических нарушений, расположенные на субгоризонтальной поверхности и характеризующиеся мощностями перекрывающих отложений от 60 м и более, а также водораздельные пространства к северо-востоку от г. Кентау отнесены к **потенциально неопасным**.

Заключение

Далее приводятся основные выводы по оценке карстовой опасности г. Кентау и его окрестностей на основании результатов геофизических исследований и детального анализа геологических и техногенных условий территории.

1. Исследуемая территория характеризуется преимущественным развитием карбонатного карста при подчиненном развитии сульфатно-карбонатного карста. Основные карстующиеся породы – известняки и доломиты. По степени обнаженности карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи практически повсеместно развит покрытый тип карста.

2. На территории города и в его окрестностях зафиксированы как поверхностные (воронки, котловины, трещины в домах), так и подземные (полости, зоны дробления) проявления карстового процесса. Это создает дополнительные проблемы при хозяйственном освоении территорий, особенно при выборе мест под застройку, а также в значительной степени усложняет условия строительства и эксплуатации хозяйственных объектов. Дополнительную трудность в освоение территории в данных природных условиях вносит ее подработка в процессе освоения месторождений полезных ископаемых, с которой также может быть связано формирование провалов.

3. Ориентировка провальных карстовых форм в пространстве носит многофакторный характер (ориентировка разрывных нарушений, морфология поверхности, обводненность грунтов и их литология, динамика грунтовых вод, мощность перекрывающих карстующиеся породы толщ и т. д.). На территории г. Кентау основными факторами, влияющими на опасность развития карста, являются концентрация процессов выноса вещества в зонах сопряжения разломов разной ориентации и небольшая мощность рыхлых отложений, а также подработка территории.

4. Тектонические разломные нарушения в условиях г. Кентау достаточно точно дешифрируются по результатам линеamentного структурного анализа совместно с геофизическими исследованиями с поверхности земли методами электроразведки – вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП). С применением последних разломные нарушения идентифицируются по протяженным зонам пониженных и повышенных кажущихся сопротивлений, фиксируемых на различных эффективных глубинах.

5. Электроразведочные методы ВЭЗ и ЭП в совокупности с данными параметрического бурения скважин позволяют весьма однозначно выделять зоны с различной мощностью покровных рыхлых отложений, перекрывающих карстующиеся породы.

6. В результате совместного анализа распространения карстовых проявлений и их сопоставления с зонами развития рыхлых отложений различной мощности и тектоническими разломными нарушениями составлена карта карстоопасности г. Кентау и его окрестностей. Данная карта может быть использована при актуализации генплана и разработке общей стратегии дальнейшего развития города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М.: Недра, 1971. 272 с.
2. Катаев В. Н. Основы создания системы мониторинга закарстованных территорий (на примере Пермского края) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 1. С. 25–41.
3. Бондарик Г. К. Классификация инженерно-геологических прогнозов и перспективы развития методов прогнозирования. М.: ВСЕГИНГЕО, 1972. Вып. 57. С. 5–18.
4. Лисичкин В. А. Теория и практика прогностики. Методологические аспекты. М.: Наука, 1972. 223 с.
5. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
6. Геологическая карта СССР масштаба 1 : 2 000 000. Лист К-42-III. М., 1959.
7. Myat M., Wamweya A., Kovin O., Anderson N., Robison J. Application of Electrical Resistivity Method in Steeply Dipping Karst Terrane // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (GSP 183): Proc. of 11th Multidisciplinary Conf. (Tallahassee, FL, Sept. 22–26, 2008). Reston: American Society of Civil Engineers, 2008. P. 91–97. [https://doi.org/10.1061/41003\(327\)10](https://doi.org/10.1061/41003(327)10)
8. Özel S., Darici N. Environmental hazard analysis of a gypsum karst depression area with geophysical methods: a case study in Sivas (Turkey) // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8861-4>
9. Margiotta S., Negri S., Parise M., Quarta T. A. M. Karst geosites at risk of collapse: the sinkholes at Nociglia (Apulia, SE Italy). Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75 (1). P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4848-y>
10. Kaufmann G. Geophysical mapping of solution and collapse sinkholes // Applied Geophysics. 2014. Vol. 111. P. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.011>

11. Milanović P. Karst Hydrogeology. Belgrade, 2018. 390 p.
12. Патрушев Ю. В. Дистанционная оценка и прогноз развития опасных инженерно-геологических процессов при строительстве тоннелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 24 с.
13. Kataev V., Ermolovich I. Karst sinks of the Perm region (the Western Ural) // Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics: 14th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference and Expo 2014 (SGEM 2014), Albena, Bulgaria, 17–26 June 2014. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. Book 1. Vol. 2. Part A. P. 559–565.
14. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н. Карст мира. Пермь, 2007. 331 с.
15. Максимович Г. А. Основы карстования. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь, 1963. 447 с.
16. Золотарев Д. Р. Результаты линеаментного анализа на закарстованных территориях Пермского края // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 345. <https://science-education.ru/en/article/view?id=7233>
17. Золотарев Д. Р., Катаев В. Н. Воздействие линеаментной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // ГеоРиск. 2013. № 1. С. 34–43.
18. Золотарев Д. Р., Катаев В. Н., Щербаков С. В. Соотношение закарстованности и линеаментов в пределах Полазненского локального поднятия // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы юбил. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию геол. факультета и 95-летию Перм. ун-та. Пермь: ПГНИУ, 2011. С. 153–155.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2021 года

Assessment of karst hazards within the orogen territories using geophysical methods (on the example of Kentau city and surroundings, Kazakhstan)

Elena Viktorovna DROBININA^{1,2*}

Sergey Vladimirovich SHCHERBAKOV^{1,2}

Denis Rafailovich ZOLOTAREV^{1,2}

Oleg Nikolaevich KOVIN¹

German Vasil'evich FEDOROV³

Dmitriy Anatol'evich INKIN⁴

¹Perm State University, Perm, Russia

²Perm Branch of LLC "Antikarst and shore protection", Moscow, Russia

³LLP "ECOSERVICE-S", Almaty, Kazakhstan

⁴LLP "Azimuth Geology", Karaganda, Kazakhstan

Abstract

Relevance. In areas where soluble rocks are widely developed, an adequate karst hazard and karst susceptibility assessment is very relevant. Karst process development within these areas is often associated with the sinkholes, which form suddenly. It complicates the territory economic development.

The main aim of the research is to conduct the karst hazards assessment using geophysical methods within an area of carbonate karst development.

Results. Environmental conditions of the studied area and indicators of surface and subsurface karst are considered. The analysis of karst forms distribution respectively to the natural and anthropogenic factors affecting karst processes is presented. An electrical profiling (EP) using a dipole–dipole electrode array and vertical electrical sounding (VES) were applied as basic research methods on the first and the second stages of the study respectively. The resistivity pseudo sections constructed at the second stage of the study generally coincide with and supplement the electrical tomography images constructed at the first stage. Taking into account characteristics of karst development and results of geophysical study, it was established that sites of surface and construction deformation associates mainly with areas of soil low resistance.

Conclusions. Within the Kentau city and surrounding territory, the main factors providing the karst development are suffusion processes activation in the conjunction zones of faults of different orientations and range, and small thickness of overlaying sediments, as well as undermining of the territory. The areas of overlaying sediments thickness decreasing and the raised crust blocks characterized also by reduce of sediment cover are clearly revealed by geophysical research. These areas are considered as areas of high probability of karst development. The karst hazards map of the Kentau city area and its surroundings was created as a result of analysis of karst forms distributions and their comparison within areas of varying thickness of overlaying sediments and density of tectonic faults. The map can provide with useful information for updating the general plan of the city and to develop a general strategy for its further development.

Keywords: karst hazard, carbonate karst, karst massive, vertical electrical sounding, electrical profiling.

REFERENCES

1. Bondarik G. K. 1971, The theory of engineering-geological rocks properties variability. Moscow, 272 p. (*In Russ.*)
2. Kataev V. N. 2013, The theory of a monitoring system development for karst areas (on the example of the Perm region). *Geoekologija. Inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija* [Geoecology. Engineering geology, Hydrogeology, Geocryology], no. 1, pp. 25–41. (*In Russ.*)
3. Bondarik G. K. 1972, Classification of geotechnical forecasts and the prospects for the forecasting methods development. Moscow, issue 57, pp. 5–18. (*In Russ.*)
4. Lisichkin V. A. 1972, Theory and practice of forecasting. Methodological aspects. Moscow, 223 p. (*In Russ.*)
5. Khomenko V. P. 2003, Regularities and forecast of suffusion processes. Moscow, 216 p. (*In Russ.*)
6. 1959, Geological map of the USSR, scale 1 : 2 000 000. Sheet K-42-III. Moscow.
7. Myat M., Wamweya A., Kovin O., Anderson N., Robison J. 2008, Application of Electrical Resistivity Method in Steeply Dipping Karst Terrane. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (GSP 183): Proc. of 11th Multidisciplinary Conf. (Tallahassee, FL, Sept. 22–26, 2008). Reston: American Society of Civil Engineers, pp. 91–97. [https://doi.org/10.1061/41003\(327\)10](https://doi.org/10.1061/41003(327)10)
8. Özel S., Darıcı N. 2020, Environmental hazard analysis of a gypsum karst depression area with geophysical methods: a case study in Sivas (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, vol. 79, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8861-4>
9. Margiotta S., Negri S., Parise M., Quarta T. A. M. 2016, Karst geosites at risk of collapse: the sinkholes at Nociglia (Apulia, SE Italy). *Environmental Earth Sciences*, vol. 75 (1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4848-y>
10. Kaufmann G. 2014, Geophysical mapping of solution and collapse sinkholes. *Applied Geophysics*, vol. 111, pp. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.011>

✉ alenadrobina@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6756-7947>

44 Е. В. Дробинина и др. Оценка карстовой опасности с применением геофизических методов в условиях складчатой зоны (на примере окрестностей г. Кентау, Казахстан) // Известия УГГУ. 2022. Вып. 1(65). С. 28–45. DOI 10.21440/2307-2091-2022-1-28-45

11. Milanović P. 2018, Karst Hydrogeology. Belgrade, 390 p.
12. Patrushev Yu. V. 2017, Remote assessment and forecast of the hazardous engineering and geological processes development during the construction of tunnels. Abstract of thesis. tech. sciences. Ekaterinburg, 24 p. (*In Russ.*)
13. Kataev V., Ermolovich I. 2014, Karst sinks of the Perm region (the Western Ural). Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics: 14th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference and Expo 2014 (SGEM 2014), Albena, Bulgaria, 17–26 June 2014. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., book 1, vol. 2, part A, pp. 559–565.
14. Dublyansky V. N., Dublyanskaya G. N. 2007, Karst of the world. Perm, 331 p. (*In Russ.*)
15. Maksimovich G. A. 1963, The theory of karst studies. Vol. 1. Questions of karst morphology, speleology and karst hydrogeology. Perm, 447 p. (*In Russ.*)
16. Zolotarev D. R. 2012, The results of lineament analysis in the karst territories of the Perm region. *Modern problems of science and education*, no. 5, p. 345. <https://science-education.ru/en/article/view?id=7233>
17. Zolotarev D. R., Kataev V. N. 2013, The lineament tectonics impact on the karst processes development at the local research level. *GeoRisk*, no. 1, pp. 34–43. (*In Russ.*)
18. Zolotarev D. R., Kataev V. N., Shcherbakov S. V. 2011, Correlation between karst and lineaments within the Polaznensky local uplift. *Geology and useful minerals of the Western Urals*. Perm, pp. 153–155. (*In Russ.*)

The article was received on November 10, 2021