

А. А. Лавруевич¹, Т. С. Алешина², О. А. Вадачкоря³, И. А. Лавруевич⁴,
Е. А. Машкова⁵, С. В. Шендяпина⁶, А. Н. Гордиенко⁷

АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАРСТООПАСНОСТИ УЧАСТКА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОДОРОГИ МЕЗМАЙ–ЛАГОНАКИ (КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

АННОТАЦИЯ

При проведении комплексных изысканий территории строительства автодороги от поселка Мезмай до пересечения с автодорогой плато Лагонаки – станция Даховская (Краснодарский край) были использованы ортофотопланы по данным космической съемки высокого разрешения, доступные через программу Google Earth, что позволило еще на предпроектной стадии оценить опасность развития карстовых процессов. Цель исследований — принятие проектных решений для нормального функционирования сооружения на территории развития карста. В статье наглядно показано, как применение космических снимков, данных лидарной съемки и карт-схем района строительства автодороги позволяет выделить наиболее важные компоненты геологической среды и факторы, способствующие развитию и активизации карстовых процессов. Используя метод сканирования исследуемой территории, получилось «снять» верхний слой лесного покрова и обнажить положение в рельефе участка, а также размеры, формы и количество карстовых проявлений. Это позволило предварительно оценить механизм карстового процесса, сформировавшего многочисленные карстовые воронки. При развитии данных форм рельефа в первую очередь действовал не провальный, а коррозионно-эрозионный процесс. Таким образом, развитие карстовых воронок на этом участке проектируемой автодороги не подпадает под «стандартные», описанные в СП, методики оценки карстовой опасности. Рекогносцировка трассы автодороги и обследование карстовых воронок в процессе маршрутной съемки полностью подтвердили высказанное предположение. Действительно, все исследованные карстовые воронки в известняках юрского возраста имели коррозионно-эрозионное происхождение. На основании проведенных инженерно-изыскательских и карстологических исследований сформулирован вывод о том, что при строительстве и эксплуатации дороги противокарстовых мероприятий не требуется. Необходим набор противоэрозионных мероприятий и мониторинг состояния автодороги в процессе эксплуатации.

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», 117997, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

² ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

³ Институт геоэкологии РАН им. Е. М. Сергеева, Уланский пер., д. 13 с. 2, Москва, Россия, 101000, *e-mail*: vadachkoria@mail.ru

⁴ ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

⁵ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская, д. 7, Москва, Россия, 121352, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

⁶ ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337, *e-mail*: kanz@mgsu.ru

⁷ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская, д. 7, Москва, Россия, 121352, *e-mail*: a_gordienko@vniigochs.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автодорога, карст, провалы, известняки, коррозионно-эрозионные воронки

Andrey A. Lavrusevich¹, Tatiana S. Aleshina², Oleg A. Vadachkoria³, Ivan A. Lavrusevich⁴, Elena A. Mashkova⁵, Svetlana V. Shendyapina⁶, Aleksey N. Gordienko⁷

REMOTE SENSING DATA ANALYSIS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT COMPONENTS FOR THE PURPOSES OF KARST HAZARD ASSESSMENT IN THE TERRITORY OF THE MEZMAI-LAGONAKI ROAD CONSTRUCTION SITE (KRASNODAR REGION)

ABSTRACT

During carrying out comprehensive survey at the construction site of the road connecting Mezmay village with the existing road Lagonaki plateau – Dakhovskaya village (Krasnodar region), satellite images from the Google Earth program having sufficiently high resolution were used, which made it possible to assess the risk and danger of karst processes at the pre-design stage. The purpose of the research is to make design decisions for the normal construction process in the territory with developing karst processes. The article clearly shows how the use of satellite imagery, laser scanning data and maps of the road construction site provides for identification of the most important components of geological environment and factors contributing to development and activation of karst processes. Using LIDAR scanning of the study area it was possible to “remove” the upper forest layer (cover) and expose the relief of the site, determining size, shape and number of karst manifestations. This allowed performing preliminary assessment of the mechanism of the karst process that formed numerous depressions. These landforms are primarily formed not by sinkholes, but by corrosion-erosion processes. That is, the development of karst funnels on this section of the projected road does not fall under the “standard” methodology for assessing karst hazard described in the SP. The reconnaissance of the road route and the inspection of karst funnels on the spot fully confirmed the above assumption. Indeed, all studied depressions in limestones of the Jurassic age had a corrosion-erosion origin. Thus, on the basis of the conducted engineering survey and karstological studies, the conclusion is formulated that during the construction and reconstruction of the road anti-karst measures are not required. A set of anti-erosion measures and monitoring of the state of the road is required instead.

KEYWORDS: road, karst, sinkholes, limestones, corrosion-erosion funnels

-
- ¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Miklouho-Maclay St. 23., Moscow, 117997, Russia, *e-mail:* lavrusevich@yandex.ru
 - ² FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kantz@mgsu.ru
 - ³ Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, 13/2, Ulansky ln., Moscow, 101000, Russia, *e-mail:* vadachkoria@mail.ru
 - ⁴ FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kantz@mgsu.ru
 - ⁵ All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defence and Emergency Management EMERCOM of Russia, 7, Davydkovskaya str., Moscow, 121352, Russia, *e-mail:* lavrusevich@yandex.ru
 - ⁶ FSEI HPE National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe hwy, Moscow, 129337, Russia, *e-mail:* kantz@mgsu.ru
 - ⁷ All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defence and Emergency Management EMERCOM of Russia, 7, Davydkovskaya str., Moscow, 121352, Russia, *e-mail:* a_gordienko@vniigochs.ru

ВВЕДЕНИЕ

Участок проектируемой трассы автодороги расположен в Апшеронском районе Краснодарского края, который протягивается с северо-запада на юго-восток от поселка Мезмай до пересечения с автодорогой «станция Даховская – турбаза Лагонаки», на км 22+536. Автодорога будет проходить по незастроенной территории. Это юг Краснодарского края, северный склон Главного Кавказского хребта, в пределах территории государственного заказника местного значения «Камышанова поляна».

Трасса проектируемой автодороги поднимется по северо-западному склону хребта Азиш-Тау, протянувшегося с северо-востока на юго-запад, преимущественно по существующей лесовозной дороге, от юго-восточной границы пос. Мезмай. Рельеф по трассе проектируемой автодороги находится в зависимости от особенностей геологического строения, тектоники и литологического состава пород. Перепад высот и уклон в направлении северо-запад, абсолютной отметки от 717,51 до 1416,63 м (по устьям пробуренных скважин).

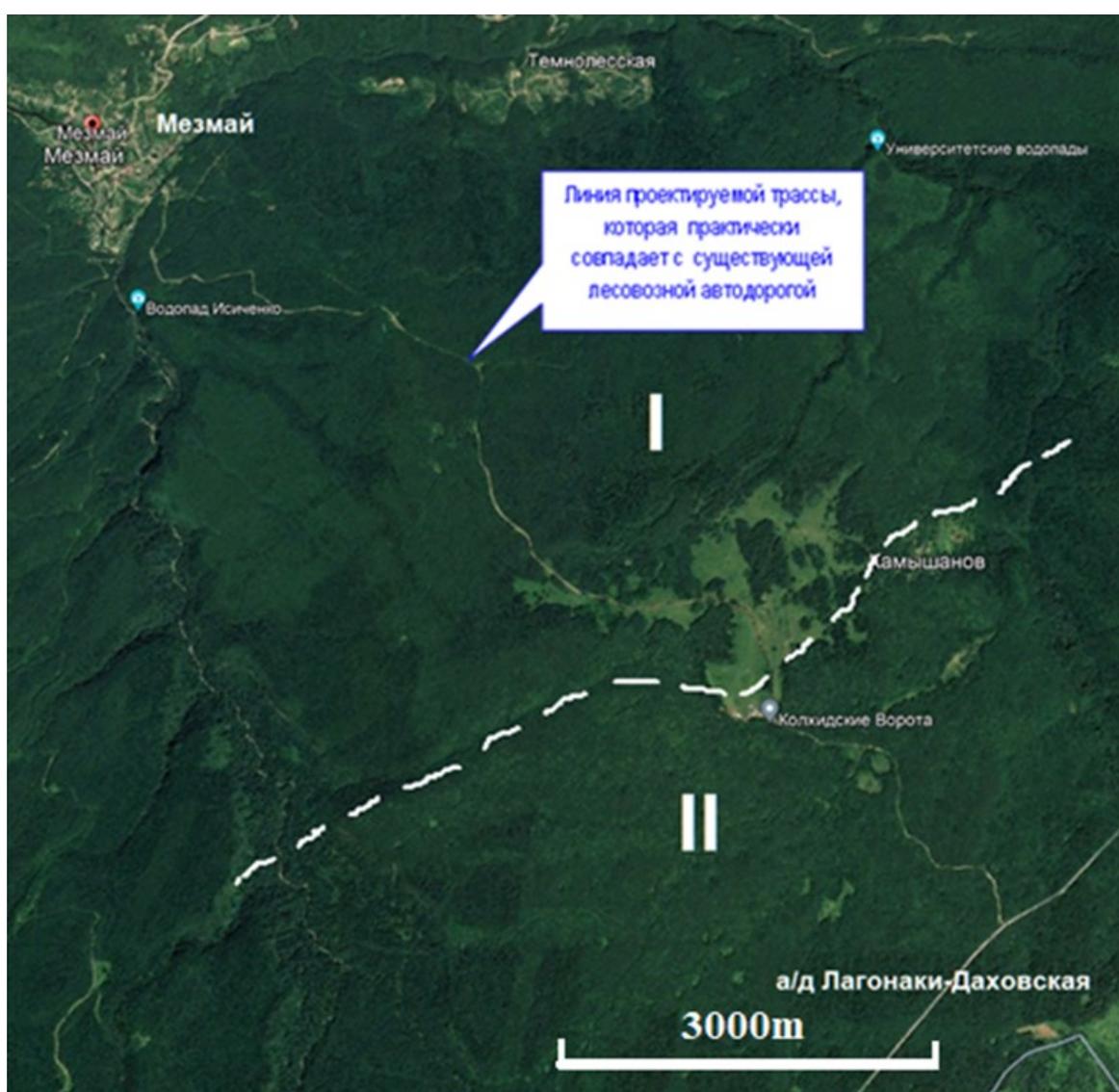


Рис. 1. Ситуационный план расположения проектируемой а/д Мезмай – Лагонаки – Даховская в междуречье рек Мезмай и Курджипс

Fig. 1. Situational plan of the location of the projected Mezmay – Lagonaki – Dakhovskaya highway in the mesopotamia of the Mezmay and Kurdzhips rivers

Анализ горных пород по проектируемой трассе автодороги Мезмай – Лагонаки – Даховская показал, что на участке практически повсеместно представлены отложения среднего и верхнего отделов юры. Это карстующиеся породы карбонатного типа (известняки, доломитизированные известняки, доломиты), которые доминируют в разрезе и относятся к весьма труднорастворимым разновидностям. Пестроцветные глины, прослой карбонатизированных песчаников и алевролитов имеют подчиненное значение. Четвертичные отложения в виде покровного или прерывистого чехла развиты практически повсеместно, отсутствуя лишь на скальных эскарпах куэст, отвесных скалах каньонов и на обнаженных, бронированных участках линии проектируемой трассы. Представлены континентальными образованиями, часто в сложных парагенетических сочетаниях [Государственная геологическая карта, 2002].

Решение задачи, после предварительного анализа ситуации проектируемой дороги, состояло в оценке интенсивности и опасности развития карстовых процессов. После анализа картографического материала, результатов изысканий прошлых лет, а также космоснимков и рекогносцировочных маршрутов, сделан вывод о развитии многочисленных карстовых воронок коррозивно-эрозионного типа, что практически исключает процесс провалообразования, и территория в соответствии с существующими СП не является карстоопасной. Ситуационный план участка представлен на рис. 1. Цифрами I и II выполнено дистанционное зонирование территории: I — участок автодороги с резким превышением рельефа и выходами коренных пород в виде «бронированных склонов» (рис. 2); II — относительно пологий, выровненный участок с Q_{IV} отложениями мощностью до 1,5 м и широким распространением поверхностных и подземных карстовых форм рельефа (воронки, поноры, пещеры и др.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1962 г. Д. С. Соколов [1962] сформулировал четыре основных фактора, способствующих развитию карста и формированию карстовых форм рельефа:

- 1) наличие неустойчивых к воздействию воды пород;
- 2) водопроницаемость неустойчивых к воздействию воды пород;
- 3) наличие движущейся воды с определенным напорным градиентом;
- 4) агрессивность движущейся воды.

Самой важной особенностью геологического строения исследуемого участка является следующее: коренные породы, представленные карбонатными разностями, не перекрыты другими отложениями, которые могли бы препятствовать воздействию воды на карбонатный массив и находятся на поверхности. Это т. н. голый, обнаженный или открытый карст [Максимович, 1963, 1969]. Характер толщи — переслаивание карбонатных пород между собой и с маломощными некарстующимися отложениями (глины, песчаники, алевролиты) — значительно затрудняет развитие карста.

При дистанционном анализе было проведено зонирование территории, где выделены две зоны, отличающиеся друг от друга целым набором факторов (рис. 1). Самым важным из них является наличие многочисленных карстовых форм во второй, юго-восточной части территории (район II).

Карстующийся массив представляет собой куэсту с простиранием СВ 40°, с углами падения от 5 до 10°. Это треугольной формы пологонаклонная к северу структурная ступень, осложненная рядом малоамплитудных сбросов и флексур (рис. 3). Данные дизъюнктивные структуры фиксируются в деформациях раннеплиоценовой геоморфологической поверхности, формирующей главные водоразделы востока Лагонакского плато, и обособляют блоки более высоких порядков. Структуры второго

порядка южной части Мезмайской ступени — Юго-западномезмайская и Восточномезмайская структурные ступени — разделены Сухокурджипским сбросом, который проходит по прирусловой части долины Сухого Курджипса. По этому сбросу Восточномезмайская ступень опущена относительно Юго-западномезмайской ступени на 50 м по деформации понтической (раннеплиоценовой) поверхности и на 15–20 м по изгибу мохошевской поверхности [Несмеянов, 1999]. Таким образом, оформился достаточно крупный моноклиальный склон, сильно дислоцированный тектоническими движениями, особенно в верхней части, что привело к формированию раскрытой краевой области питания атмосферными осадками зон вертикальной нисходящей циркуляции. Это, в свою очередь, привело к формированию многочисленных коррозионных воронок, или воронок инфильтрационного и инфлюационного растворения карстующихся пород в поверхностной части массива. Скорость их развития была достаточно медленной; на поверхности формировались разнообразные асимметричные формы от блюдцеобразных до конусообразных с водопоглощающим понором на дне (рис. 4) [Несмеянов, 1999].



Рис. 2. Бронированный склон по трассе проектируемой автодороги. Выделенный район I (бронированные склоны, выходы доломитизированных известняков герпегемской свиты J2-3gr). Стрелка указывает на телефон (размер 7 x 14 см)

Fig. 2. An armored slope along the route of the projected highway. Designated area I (armored slopes, outcrops of dolomitized limestones of the Herpegem formation J2-3gr). The arrow points to the phone (size 7 x 14 cm)

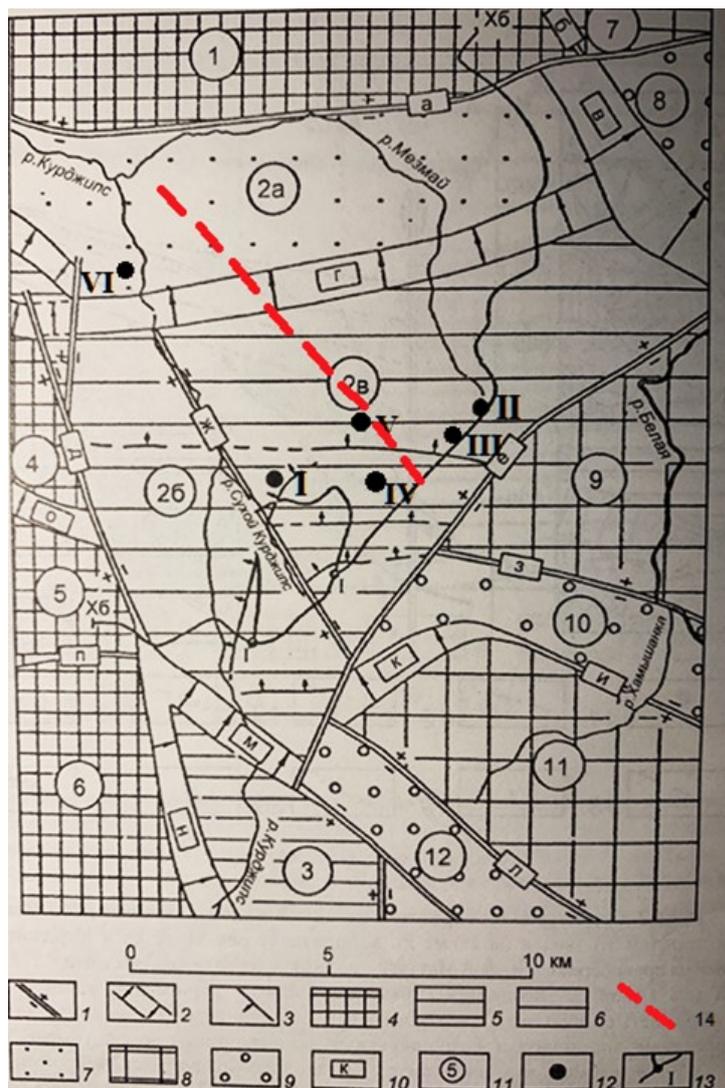
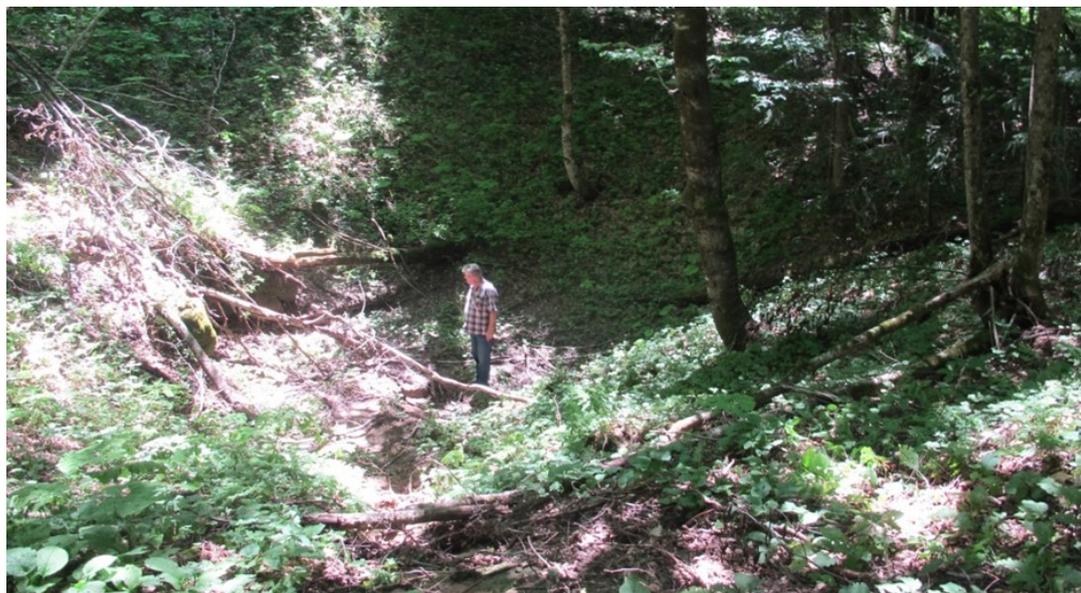


Рис. 3. Схема неотектонического районирования восточной части Лагонакского плато и смежной территории [Несмеянов, 1999]: 1 — сбросы с указанием поднятого (+) и опущенного (-) крыльев; 2 — широкая флексура; 3 — узкая, малоамплитудная флексура; 4–7 — структуры Лагонакского плато; 8–9 — структуры (горсты и грабены) за пределами плато; 10 — индексы разрывов и флексур; 11 — индексы блоковых структур; 12 — пещеры (I–VI) Мезмайской структурной ступени; 13 — линия профиля геоморфологических уровней от Гуамского (N21) до майкопского (Q32), 14 — проектируемая трасса автодороги. Цифрами обозначены: 1 — Гуамский горст; 2 — Мезмайская структурная ступень (2а — Северо-мезмайский грабен, 2б — Юго-западно-мезмайская структурная ступень, 2в — Восточно-мезмайская структурная ступень); 3 — структурная ступень Каменного моря; 4 — Северо-лагонакская структурная ступень; 5 — лагонакский горст; 6 — Нагойчукский горст; 7 — Сапунский горст; 8 — Новопрохладненский грабен; 9 — Дудугуитский горст; 10 — Хамышкинский грабен; 11 — Инженерный горст; 12 — Жолобный грабен. Буквами обозначены: а — Южногуамский сброс; б — Восточногуамский сброс; в — Буреломная флексура; г — Камышановская флексура; д — Восточно-лагонакский сброс; е — Цербелевский сброс; ж — Сухокурджипский сброс; з — Северо-камышанкинский сброс; и — Южно-камышанкинский сброс; к — Раскальная флексура; л — Филимоновский сброс; м — Южно-курджипская флексура; н — Мурзикальская флексура; о — Буквенная флексура; п — Южно-цицинская сброс-флексура [Несмеянов, 1999]

Fig. 3. Scheme of neotectonic zoning of the eastern part of the Lagonaki plateau and adjacent territory [Nesmeyanov, 1999]: 1 — discharges indicating raised (+) and lowered (–) wings; 2 — wide flexure; 3 — narrow, low-amplitude flexure; 4–7 — structures of the Lagonaki plateau; 8–9 — structures (gorsts and grabens) outside the plateau; 10 — indices of discontinuities and flexures; 11 — indices of block structures; 12 — caves (I–VI) of the Mezmay structural stupa; 13 — profile line of geomorphological levels from Guam (N21) to Maikop (Q32); 14 — projected highway route. The numbers indicate: 1 — Guam mountain; 2 — Mezmay structural stage (2a — North Mezmay graben, 2b — Southwestern Mezmay structural stage, 2c — East Mezmay structural stage); 3 — Stone Sea structural stage; 4 — North Lagonaki structural stage; 5 — Lagonaki mountain; 6 — Nagoychuksky gorst; 7 — Sapunsky gorst; 8 — Novoprokhladnensky graben; 9 — Dudugushtsky graben; 10 — Khamyshkinsky graben; 11 — Engineering gorst; 12 — Zholobny graben. Letters are marked: a — South Guamian discharge; b — East Guamian discharge; c — Windbreak flexure; d — Kamyshanovskaya flexure; e — Vostochno-lagonaksky discharge; f — Cerbelevsky discharge; g — Sukhokurdzhipsky discharge; h — Severo-Kamyshankinsky discharge; i — Yuzhno-Kamyshankinsky discharge; j — Incandescent flexure; k — Filimonovsky discharge; l — Yuzhno-Kurdzhipskaya flexure; m — Murzikalskaya flexure; n — Letter flexure; o — Yuzhno-Tsitsinsky discharge-flexure [Nesmeyanov, 1999]



*Рис. 4. Понор диаметром более 0,6 м в нижней части
коррозионно-эрозионной карстовой воронки*
*Fig. 4. A hole with a diameter of more than 0.6 m in the lower part
of a corrosive-erosive karst funnel*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке полученных при инженерных изысканиях материалов необходимо осуществлять районирование исследуемой территории относительно карстовых провалов по интенсивности провалообразования по средним диаметрам карстовых провалов. Однако на исследуемой территории карстовые провалы отсутствуют. Все зафиксированные воронки имеют не провальный, а коррозионный характер. Исследуемые в процессе инженерно-геологических изысканий отрицательные карстовые формы рельефа связаны с формированием коррозионно-эрозионных форм рельефа (воронок с поглощающим понором), первоначальное развитие которых начинается с поверхности. Геологические

процессы на склонах воронок — оползни, обвалы, суффозии — вторичны, имеют подчиненное значение и реализуются уже после формирования первичных отрицательных форм рельефа, вызванных выщелачиванием карбонатных пород в зоне поверхностной нисходящей вертикальной циркуляции. В орогенных зонах развитие карста контролируется в первую очередь тектоническим строением территории. Важную роль представляют разрывные нарушения, вдоль которых в растворимых породах нередко формируются мощные карстовые зоны, распространяющиеся на большую глубину (рис. 5).

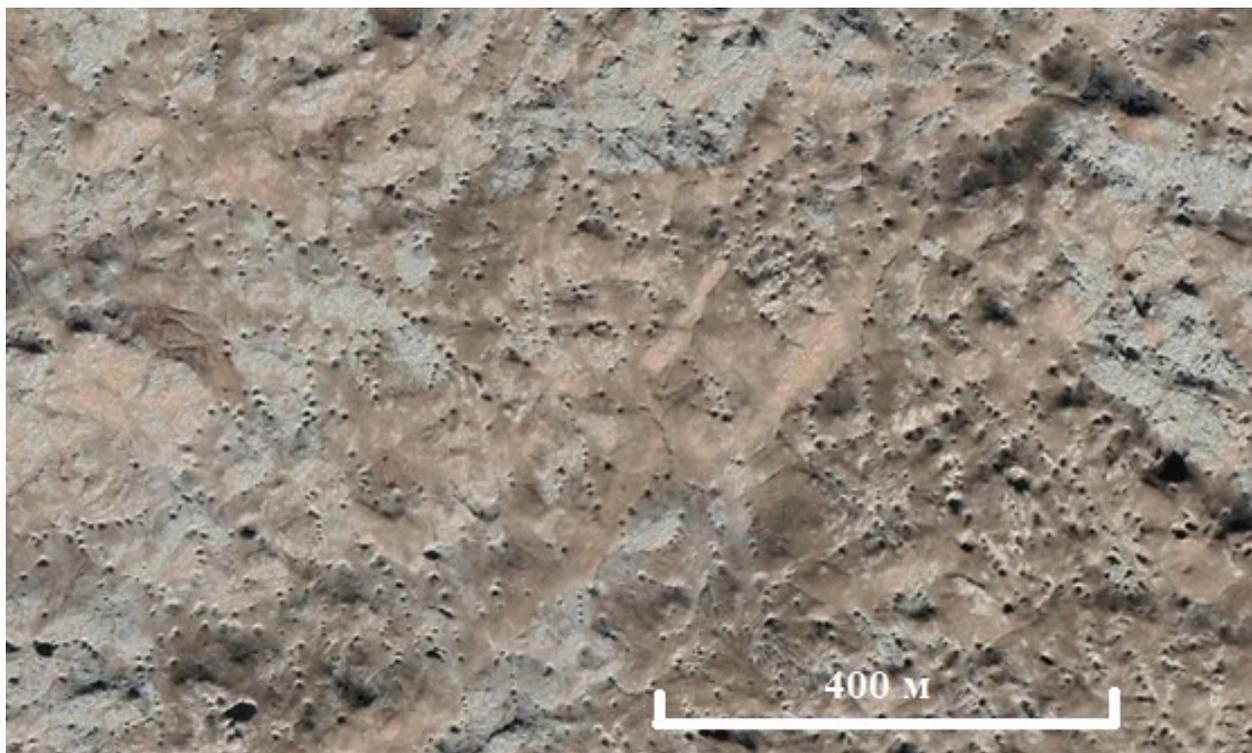


Рис. 5. Фрагмент водораздельной поверхности Бзыбского хребта (Абхазия). На космическом снимке видны многочисленные воронки коррозионно-эрозионного генезиса, приуроченные к зонам неотектонических нарушений (линейно вытянутые цепочки воронок)

Fig. 5. A fragment of the watershed surface of the Bzyb ridge (Abkhazia). The satellite image shows numerous craters of corrosive-erosive genesis confined to zones of neotectonic disturbances (linearly elongated chains of craters)

Наиболее распространенная карстовая форма на исследуемой территории — карстовые воронки коррозионно-эрозионного генезиса. Приведем их краткую морфологическую характеристику. Размер воронок самый разнообразный, однако проведенный статистический анализ территории, примыкающей к проектируемой дороге (рис. 6, 136 определений), показал, что наиболее часто встречающийся диаметр воронок составляет от 20 до 50 м.

Воронки, как правило, имеют асимметричную форму, хотя встречаются практически ровные (например, воронки в зоне примыкания проектируемой дороги к трассе Лагонаки – Даховская, рис. 7). Углы склонов воронок колеблются в широком диапазоне от 15 до 60°. Уступы воронок неровные, нередко видны выходы коренных пород. Глубина воронок колеблется от 5 до 25 м и более.

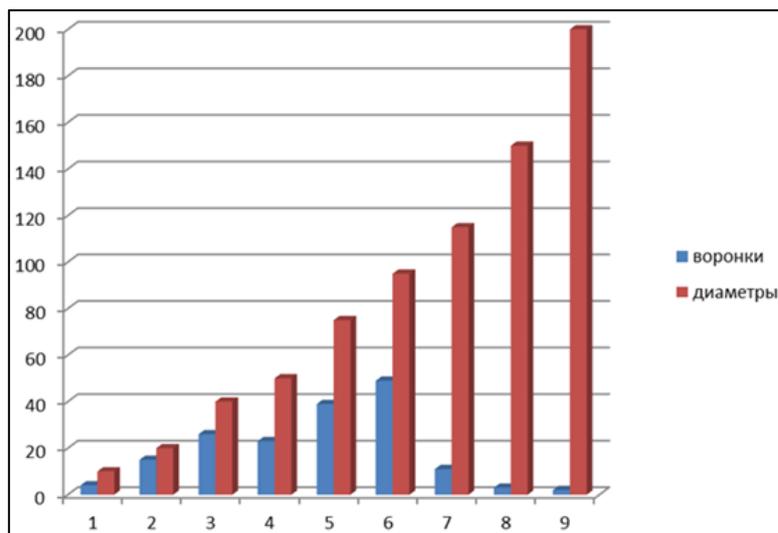


Рис. 6. График, иллюстрирующий количество воронок в зависимости от их диаметров.

Мода от 20 до 50 м [Лаврусевич и др., 2023]

Fig. 6. A graph illustrating the number of funnels depending on their diameters.

Mode from 20 to 50 m [Lavrusevich et al., 2023]

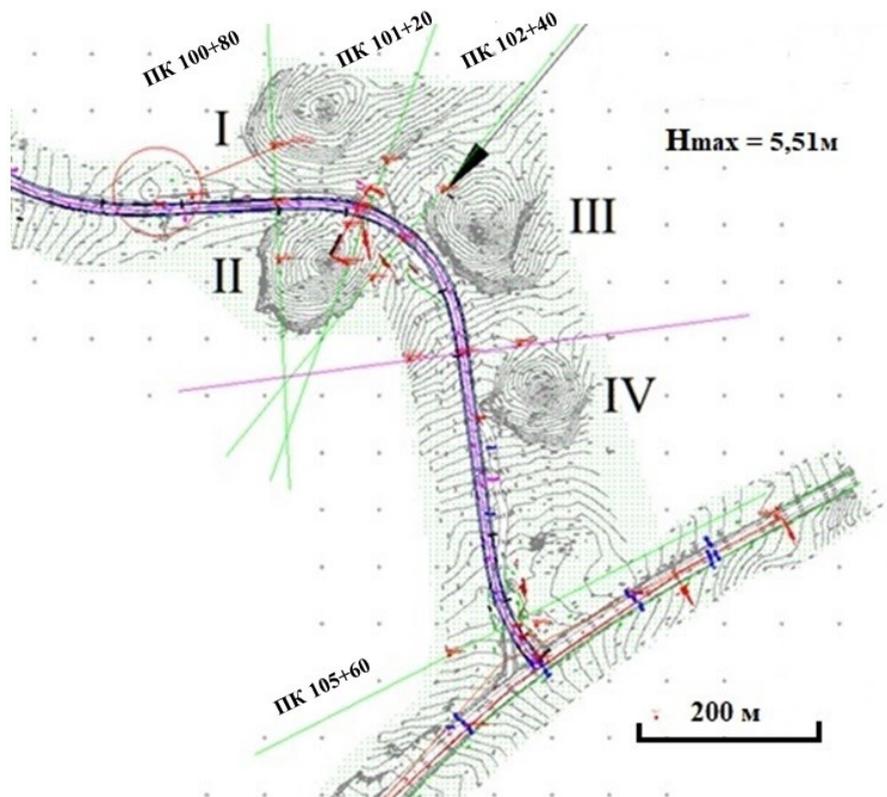


Рис. 7. Фрагмент топографического плана проектируемой трассы автодороги от ПК 100+80 до ПК 105+60, на участке примыкания к автодороге Лагонаки-Даховская в зоне развития коррозионно-эрозионных карстовых явлений

Fig. 7. A fragment of the topographic plan of the projected highway route from PC 100+80 to PC 105+60, at the site adjacent to the Lagonaki-Dakhovskaya highway in the zone of development of corrosive and erosive karst phenomena

Анализ данных спутниковой съемки, выполненной в зимний период (в отсутствие листвы), позволяет выполнить предварительную оценку количества и характера карстовых форм рельефа на исследуемом участке (рис. 8).

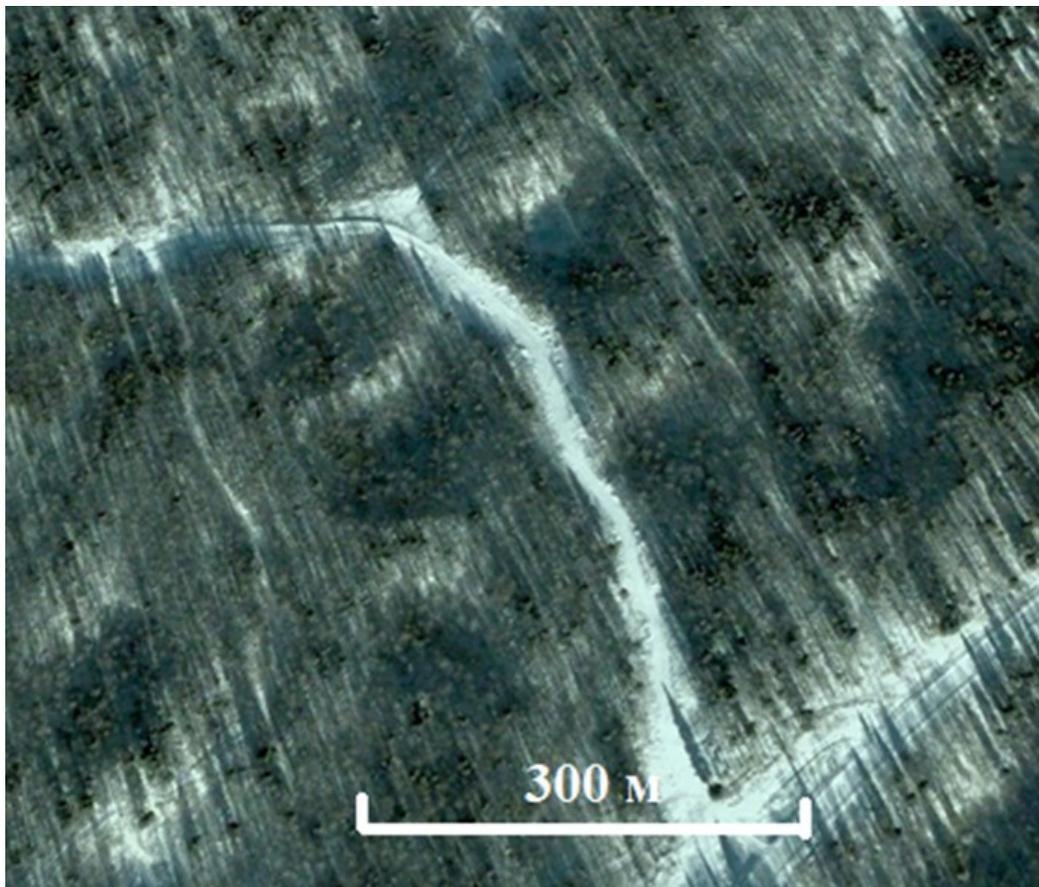


Рис. 8. Космическая съемка исследуемого участка, выполненная в зимнее время (ноябрь) при освещении наклонными лучами (солнце низко над горизонтом)

Fig. 8. Satellite image of the studied area, performed in winter (November) when illuminated by inclined rays (the sun is low above the horizon)

На рис. 9 показано, как в результате авиационной лидарной съемки была построена цифровая модель поверхности исследуемого участка без верхнего растительного слоя. Видны «оспины» коррозионно-эрозионных деформаций (воронки) на территории развития карста (II зона типизации территории по рис. 1). Проведенное дешифрирование территории позволило составить перечень коррозионно-эрозионных объектов с выносом их в натуру с указанием координат. Видно, что процесс развития карстовых воронок приурочен к зонам тектонических разломов, вдоль которых происходит их частичное слияние с формированием карстовых полей, имеющих общее простирание в северо-западном направлении по линии падения пластов куэсты (рис. 9).

Необходимо отметить, что не всегда можно судить о происхождении карстовой воронки по ее внешним очертаниям. Так, например, блюдцеобразная воронка в русском, камском и среднеевропейском типах карста может быть начальной или конечной стадией развития ряда генетических типов карстовых воронок. Для установления происхождения большинства карстовых воронок необходимо разбуривание их до карстующихся пород.

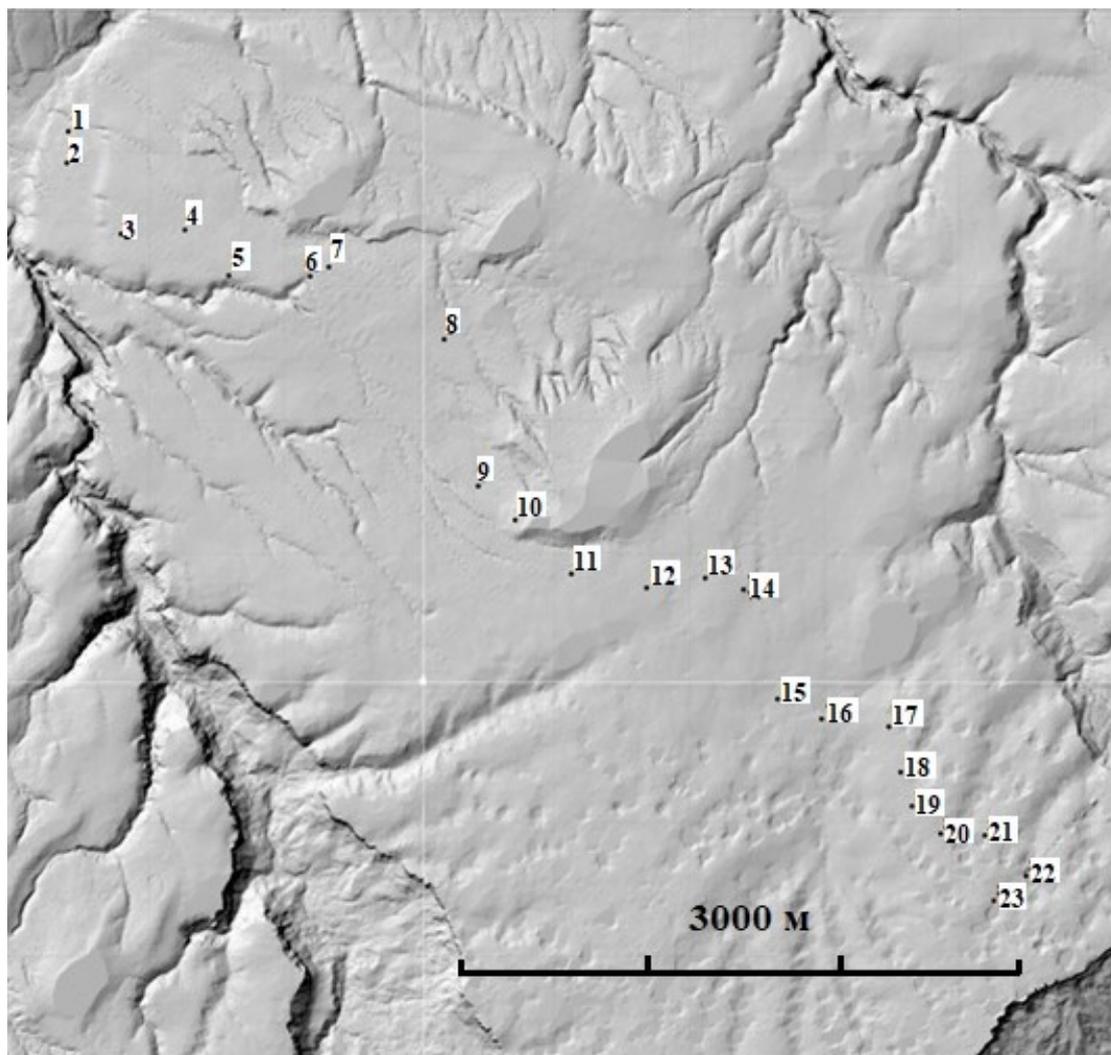


Рис. 9. Визуализация данных лидарной съемки исследуемого участка
Fig. 9. Visualization of lidar survey data of the studied area

Определение происхождения карстовых воронок имеет большое практическое значение. В районах, сложенных слаборастворимыми известняками и доломитами, где зона горизонтальной циркуляции находится глубоко, провальные карстовые воронки почти не образуются. Следовательно, условия строительства здесь более благоприятны, чем в районах с неглубоким залеганием зоны горизонтальной циркуляции, где развиты провальные воронки.

Аналогичная ситуация с воронками подробно описана Б. А. Вахрушевым с соавторами [2001] для Бзыбского хребта и Хипстинского массива, где их максимальное количество приходится на средне- и высокогорные зоны. Из карстовых форм здесь преобладают карры, воронки, котловины. В растворении известняков активное участие принимает также биологическая коррозия. Для среднегорного карста с высотами от 700 до 1 900 м характерны в основном коррозионные и коррозионно-эрозионные воронки (рис. 5).

Коррозионные воронки приурочены к субгоризонтальным или пологонаклонным (до 15°) поверхностям (рис. 10). Механизм образования воронок хорошо освещен в работах Р. Уильямса [Williams, 1985] и А. Б. Климчука [1987, 1989]. При выщелачивании трещин в эпикарстовой зоне в днище воронки и расширении водопоглощающей трещины в блоковой зоне образуется коррозионно-гравитационная воронка.

На дне такой воронки часто располагаются входы в вертикальные карстовые полости [Климчук, 1989].

Размеры и форма коррозионных воронок тесно связаны с возрастом и геолого-геоморфологическими условиями их заложения. Крупные воронки (20–40 м в диаметре) формируются на участках, рельеф которых унаследовано развивается с эрозионного этапа. Такие воронки имеют ранне- или среднеплейстоценовый (1,5–2 млн лет) возраст и приурочены в основном к среднегорной зоне. В высокогорной зоне массива интенсивное физическое выветривание, экзарационная денудация гляциального этапа развития территории обуславливают недоразвитость формирующихся здесь воронок [Климчук, 1989]. Их размеры редко превышают 10–15 м в диаметре.

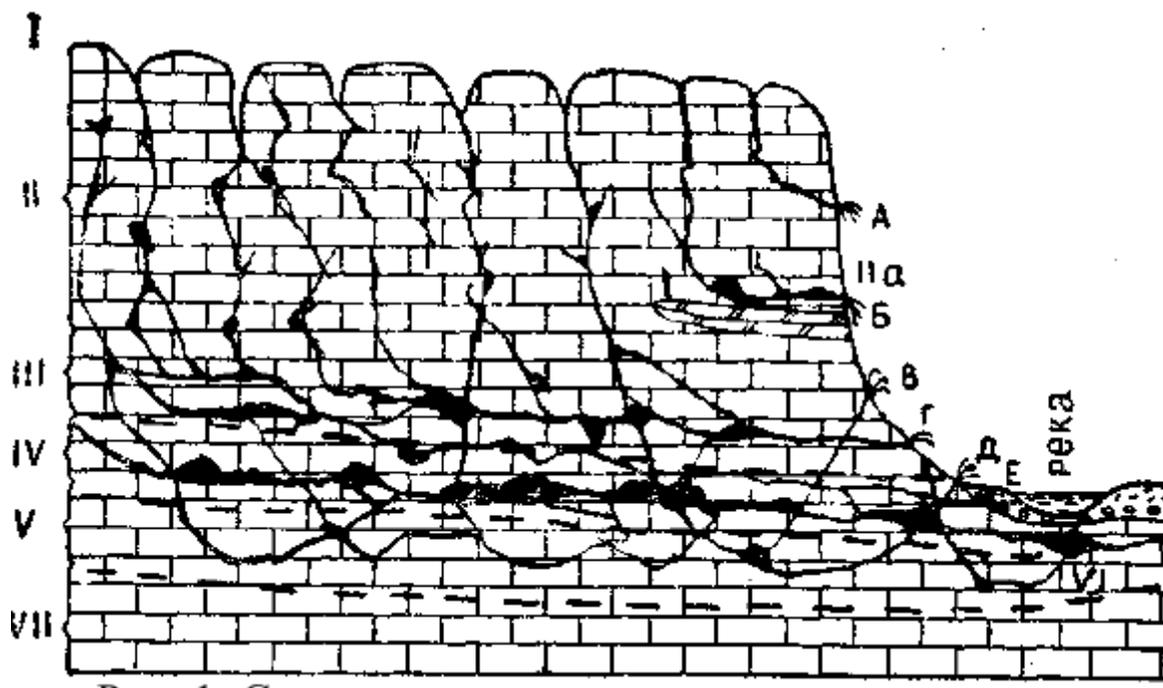


Рис. 10. Схема гидродинамических зон карстового массива, прорезанного рекой, являющейся базисом коррозии. I — зона поверхностной циркуляции; II — зона вертикальной нисходящей циркуляции; IIa — подзона подвешенных вод на местных водоупорах; III — зона колебания уровня карстовых вод или переходная; IV — зона горизонтальной циркуляции; V — зона сифонной циркуляции напорных вод; VI — зона поддолинной или подрусловой циркуляции; VII — зона глубинной циркуляции. Карстовые источники зон циркуляции: A — вертикальной нисходящей; B — подвешенных вод; B–D — сифонной; Г — переходной; E — разгрузка вод зоны горизонтальной циркуляции в речные отложения [Максимович, 1963, 1969]

Fig. 10. Diagram of hydrodynamic zones of a karst massif cut through by a river which is the basis of corrosion. I — zone of surface circulation; II — zone of vertical downward circulation; IIa — subzone of suspended waters on local reservoirs; III — zone of fluctuations in the level of karst waters or transitional; IV — zone of horizontal circulation; V — zone of siphon circulation of pressure waters; VI — zone of submerged or subsurface circulation; VII — the zone of deep circulation. Karst sources of circulation zones: A — vertical descending; B — suspended waters; C–D — siphonal; D — transitional; E — unloading of the waters of the horizontal circulation zone into river sediments [Maksimovich, 1963, 1969]

Максимальные размеры коррозионные воронки приобретают в верхней части горно-лесного пояса, в интервале высот 1 300–1 800 м. Благоприятные микроклиматические условия, длительный период снеготаяния (в среднем вдвое более продолжительный, чем на открытых местах), снегозадерживающая роль лесов и высокая составляющая биологической коррозии приводят к образованию здесь гигантских воронок диаметром 100–150 м и глубиной 40–50 м.

Их формирование связывается с изотропией гидрогеологических свойств эпикарстовой зоны (кора выветривания известняковых массивов), неравномерной трещиноватостью и пониженной площадной водопроницаемостью в нижней блоковой зоне. Возникший фильтрационный порог препятствует нисходящему движению воды и обуславливает ее латеральное распространение к гидрогеологически активным тектоническим трещинам блоковой зоны. Вокруг водопоглощающих трещин блоковой зоны, в вышележащей трещиноватой коре выветривания формируется депрессия карстовых вод, в пределах которой резко возрастает активность карстовой коррозии. Происходит прямое отражение гидрогеологической депрессии подземных вод в морфологии поверхности. Возникает карстовая коррозионная воронка [Максимович, 1963, 1969].

В основу классификации воронок (рис. 11) положено два признака: характер деформации земной поверхности и время формирования воронки, которые свидетельствуют о процессах, происходящих в карстующемся массиве.

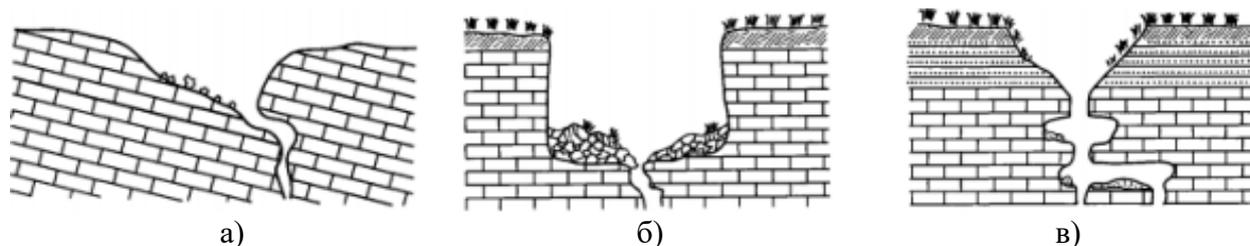


Рис. 11. Основные генетические типы карстовых воронок: а — воронка поверхностного выщелачивания (коррозионно-эрозионная);

б — провальная воронка; в — воронка просасывания

Fig. 11. The main genetic types of karst craters: a — is a surface leaching funnel (corrosion-erosion); b — is a sinkhole; c — is a suction funnel

На рис. 11 представлены следующие типы воронок:

- а) Коррозионные воронки, или воронки инфильтрационного и инфлюационного растворения карстующихся пород; в поверхностной части массива развиваются медленно, обычно от блюдцеобразных до конусообразных асимметричных форм с поглощающим понором на дне. В случае закупорки понора начинается регрессивное развитие воронки — превращение ее в озеро, заболачивание, заполнение делювием.
- б) Провальные воронки, образующиеся путем обрушения сводов полостей, возникающих в карстующихся породах или перекрывающих их рыхлых отложениях. Если покровные отложения представлены рыхлыми грунтами, провал быстро эволюционирует от колодеобразной формы к чашеобразной воронке. Коррозионно-суффозионные воронки являются следствием суффозии и последующего оседания рыхлых отложений небольшой мощности в трещины или полости в кровле карстующихся пород.

- в) Воронки просасывания, имеющие наиболее правильную коническую форму, т. к. их склоны формируются в рыхлых отложениях. Эта форма осложняется, если поглощение смываемого со склонов материала идет не в одном отверстии понора, а в линейных или крестообразных трещинных понорах, а также при наличии открывающихся в воронку эрозионных рытвин.

ВЫВОДЫ

Комплексное использование данных ДЗЗ, таких как космическая и лидарная съемка, совместно с наземными исследованиями позволяет проводить исследования территории на предмет карстоопасности с меньшими затратами и большей эффективностью.

Анализ современной динамики карстовых процессов, учитывающий тектонический, литологический, гидрогеологический, климатический, гидрологический, почвенно-растительный, ландшафтный и другие факторы влияния, на участке строительства проектируемой трассы а/д Мезмай – Лагонаки – Даховская свидетельствует о низкой активности современного карста.

В настоящее время условия для активного развития карстовых процессов на отрезке проектируемой трассы автодороги оцениваются как малоблагоприятные. Существующая с начала 70-х гг. XX в. автодорога (Лагонаки–Даховская) полноценно функционирует в течение длительного периода времени (более 50 лет). Деформаций дорожного полотна и сооружений дорожной инфраструктуры, вызванных проявлением карстовых процессов, не отмечалось. При строительстве и эксплуатации дороги мероприятий, связанных с проявлением карстовых процессов, не проводилось.

Повсеместно под маломощной толщей средне-, верхнечетвертичных и современных элювиальных хорошо проницаемых отложений вскрываются разной степени выветрелости и трещиноватости карбонатные породы — известняки, доломиты, доломитизированные известняки, карбонатные песчаники. Учитывая, что карбонатные породы являются трудно-растворимыми образованиями (до 0,05 мм в год), при отсутствии зон тектонического дробления, контролирующего активное развитие карста в рассматриваемом районе, данный процесс практически не развивается. В зонах же тектонических нарушений развиваются коррозионно-эрозионные воронки за счет выветривания и растворения самого верхнего, контактирующего с окружающей средой слоя карбонатов. Локально воронки сгруппированы (вытянуты) вдоль тектонических нарушений, что привело за четвертичный (Q_{I-IV}) период к формированию карстовых полей, имеющих северо-западное простирание.

Вблизи отрезка проектируемой трассы автодороги (во II зоне районирования территории) проведенными исследованиями отмечены карстовые воронки коррозионно-эрозионного происхождения.

Оценку карстоопасности в соответствии с видом В (т. е. провалоопасности под сооружением — п.8.2.2 СП.116.133330.2016) выполнить невозможно, т. к. зафиксированные на этом участке воронки имеют исключительно коррозионно-эрозионный генезис. Провальные же формы отсутствуют и, следовательно, показатель провалообразования равен 0 (VI категория устойчивости по п. 5.2.11 СП 11-105-97 ч. II).

Учитывая вышеизложенное, риск поражения полотна дороги провальными формами карста отсутствует. При строительстве и реконструкции дороги противокарстовых мероприятий не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вахрушев Б. А., Дублянский В. Н., Амеличев Г. Н. Карст Бзыбского хребта. Западный Кавказ. М.: РУДН, 2001. 150 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 200 000. Серия: Кавказская. СПб. : Издательство ВСЕГЕИ, 2002.

Климчук А. Б. Условия и особенности карстообразования в приповерхностной зоне карбонатных массивов. Пещеры Грузии. Тбилиси: Мецниереба, 1987. № 11. С. 54–65.

Климчук А. Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев: ИГН АН УССР, 1989. 37 с.

Лаврусевич А. А., Хоменко В. П., Леоненко М. В., Лаврусевич И. А., Алешина Т. С., Макеева Т. Г., Кривоножко О. К., Валиев Р. П. Особенности оценки карстоопасности территории развития воронок коррозионно-эрозионного генезиса проектируемой автодороги Мезмай-Лагонаки. Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: Геоинфо, 2023. Т. 24. С. 181–185.

Максимович Г. А. Основы карстологии. В 2-х т. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Книжная типография № 2, 1963. Т. 1. 445 с.

Максимович Г. А. Основы карстологии. В 2-х томах. Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст (учебное пособие). Пермь: Книжная типография № 2, 1969. Т. 2. 529 с.

Несмеянов С. А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.

Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 320 с.

Williams P. W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1985. V. 29(4). P. 463–482. DOI: 10.1127/zfg/29/1985/463.

REFERENCES

Klimchuk A. B. Conditions and features of karst formation in the near-surface zone of carbonate massifs. *Caves of Georgia*. Tbilisi: Metsniereba, 1987. No. 11. P. 54–65 (in Russian).

Klimchuk A. B. Role of the near-surface zone of karst massifs in hydrogeology and karst morphogenesis. Kiev: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1989. 37 p. (in Russian).

Lavrusevich A. A., Khomenko V. P., Leonenko M. V., Lavrusevich I. A., Aleshina T. S., Makeeva T. G., Krivonozhko O. K., Valiev R. P. Features of assessing the karst hazard of the territory of development of craters of corrosion-erosion genesis of the projected Mezmay-Lagonaki highway. *Sergeevsky readings. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Moscow: Geoinfo, 2023. V. 24. P. 181–185 (in Russian).

Maksimovich G. A. Fundamentals of karst studies. In 2 v. *Issues of hydrogeology of karst, rivers and lakes of karst areas, chalk karst, hydrothermocarst (textbook)*. Perm: Book Printing House No. 2, 1969. V. 2. 529 p. (in Russian).

Maksimovich G. A. Fundamentals of karst studies. In 2 v. Questions of karst morphology, speleology and hydrogeology of karst. Perm: Book Printing House No. 2, 1963. V. 1. 445 p. (in Russian).

Nesmeyanov S. A. Geomorphological aspects of paleoecology of the mountain Paleolithic (on the example of the Western Caucasus). Moscow: Scientific World, 1999. 392 p. (in Russian).

Sokolov D. S. The main conditions for the development of karst. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962. 320 p. (in Russian).

State Geological Map of the Russian Federation scale 1: 200 000. Series: Caucasian. St. Petersburg: RGRI, 2002 (in Russian).

Vakhrushev B. A., Dublyansky V. N., Amelichev G. N. Karst of the Bzyb ridge. Western Caucasus. Moscow: RUDN, 2001. 150 p. (in Russian).

Williams P. W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1985. V. 29(4). P. 463–482. DOI: 10.1127/zfg/29/1985/463.
