УДК 692.115

Обзор противокарстовых мероприятий, применяемых при проектировании линейного объекта М-12 «Москва — Казань»

Авторы:
Золотарь Александр Израилевич, к.т.н., главный специалист научно-технического отдела, АО «Петербург-Дорсервис», Zolotar@dor.spb.ru;
Мельников Руслан Владимирович, инженер I категории научно-технического отдела, АО «Петербург-Дорсервис», melnikov@dor.spb.ru.

Аннотация. *Карстовые процессы являются одними из наиболее тяжелопрогнозируемых и опасных геологических процессов. Они существенно усложняют как процесс строительства, так и эксплуатацию линейного объекта и его инфраструктуры. В статье на примере автомобильной дороги М-12 «Москва — Казань» описаны методы инженерно-геологических изысканий, осуществляемых в карстоопасных районах, а также варианты инженерной защиты, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию объекта проектирования.*
Ключевые слова: *автомобильная дорога, карстовое проявление, проектирование, армирование, усиление основания, противокарстовые мероприятия, районирование.*

Annotation. *Karst processes are one of the most difficult to predict and dangerous geological processes. They significantly complicate both the construction process and the operation of a linear facility and its infrastructure. Using the M-12 Moscow — Kazan highway as an example, the article describes the methods of engineering and geological surveys carried out in karst-prone areas, as well as engineering protection options that ensure accident-free operation of the design object.*
Keywords: *highway, karst manifestation, engineering, reinforcement, base reinforcement, anti-karst measures, zoning.*

Актуальность темы. Карст является одним из наиболее труднопрогнозируемых и опасных природных процессов, проявляющихся в виде внезапных провалов и оседаний земной поверхности с размерами в плане и по глубине до 50-100 и более метров. Карстующиеся породы широко распространены на территории России и простираются почти на 50% ее площади. Выделяются Волго-Уральская, Предуральская, Западно-Уральская, Центрально-Уральская и Магнитогорская карстовые провинции. Карстовые проявления значительно усложняют процесс строительства и эксплуатацию линейных объектов и инфраструктуры. Для минимизации и предотвращения их пагубного влияния необходимо предусматривать противокарстовые мероприятия.

Объектом исследования является М-12 «Строящаяся скоростная автомобильная дорога Москва – Нижний Новгород – Казань, 4 этап км 224 – км 347, Владимирская, Нижегородская области (от пересечения с автомобильной дорогой регионального значения 17К-2 «Муром - М-7 «Волга» до пересечения с автомобильной дорогой федерального значения Р-158 «Нижний Новгород – Арзамас – Исса – Пенза – Саратов»). Трасса проходит по территории, на которой широко распространены карстовые проявления, обусловленные наличием карстующихся грунтов–известняков, доломитов, гипсов и ангидритов пермской системы.

Цель работы состоит в разработке противокарстовых мероприятий, обеспечивающих безопасное и безаварийное использование проектируемого линейного объекта и его инфраструктуры.

Вопрос нормативного обеспечения проектирования земляного полотна автомобильных дорог на закарстованных территориях подробно рассмотрен в работе В.В. Самосвата [1]. Автор справедливо отмечает, что в основных дорожных сводах

правил СП 34.13330 [2] и СП 45.13330 [3] данная проблема не отражена, а в ГОСТ 33149 [4] даны только общие указания по противокарстовым мероприятиям. Более широко вопросы проектирования на закарстованных территориях раскрыты в своде правил по инженерной защите зданий и сооружений от опасных геологических процессов СП 116.13330 [5], а также в СП 22.13330 [6] по проектированию оснований зданий и сооружений. В то же время в отношении данных сводов правил автор отмечает три важных обстоятельства:

- оба документа не учитывают особенности земляного полотна дорог;
- рекомендации, приведенные в них, применимы лишь для сравнительно простых условий, в более сложных ситуациях проектировщику предлагается обратиться в специализированные организации;
- даже эти документы не позволяют в полной мере учесть все особенности карстово-суффозионных процессов.

По мнению автора, наиболее полно вопросы проектирования на закарстованных территориях отражены в Рекомендациях [7]. Однако применимость этого документа для дорожных объектов ограничена в связи с тем, что в нем неполно учтены особенности работы земляного полотна автомобильных дорог в условиях карста и отсутствуют сведения о методиках расчетного обоснования противокарстовых мероприятий. Отмечено также, что эти Рекомендации разработаны только для территории Нижегородской области.

Приведенные сведения показывают, что сформулированная ранее цель работы предполагает, в связи с недостаточностью нормативной базы, применение решений, основанных в том числе, и на имеющемся опыте проектирования и строительства в районах развития карста.

Для достижения поставленной цели далее рассматривается решение следующих задач:

1. Изучение результатов карстологических исследований на участке строительства;
2. Обоснование противокарстовых мероприятий на объекте проектирования;
3. Обоснование методов расчета для принятых противокарстовых мероприятий;
4. Расчетная реализация противокарстовых мероприятий для проектирования.

Карстологические исследования на участке строительства

В ходе инженерно-геологических изысканий, осуществляемых в карстоопасных районах, могут быть обнаружены признаки подготовки провалообразования. К ним относятся: оседания земной поверхности; присутствие в растворимых породах незакольматированных полостей; присутствие полостей в дисперсных грунтах, перекрывающих растворимые породы; погребенные карстовые оседания или провалы; суффозионное разуплотнение несвязных грунтов, перекрывающих растворимые породы; разупрочнение дисперсных грунтов, перекрывающих карстовые полости.

Для обоснования категории устойчивости по интенсивности провалообразования, установления карстовых зон, разработки рекомендаций по защите территории от развития карстовых и карстово-суффозионных процессов и ее благоустройству специализированной организацией ООО «Противокарстовая и береговая защита» выполнены карстологические исследования, включающие, как основные составляющие, изучение поверхностной и подземной закарстованности.

Методика изучения поверхностной закарстованности.

Предварительное изучение поверхностной закарстованности с выделением участков потенциального развития карстовых форм произведено по результатам анализа топографических карт и статических космоснимков земли, полученных в реальном времени.

Рекогносцировочное маршрутное карстологическое обследование производилось в два этапа:

Маршрутное карстологическое обследование на участках повышенной плотности поверхностных форм, которые устанавливались по результатам дешифрования космоснимков и анализа топографических карт;

Карстологическое рекогносцировочное обследование на протяжении земполотна проектируемой автодороги и уточнение результатов первого этапа.

В ходе рекогносцировки исследовались и описывались геоморфологические, гидрологические, геоботанические условия, отмечались места обнажений горных пород и выходов на поверхность подземных вод, оценивались физико-географические процессы и явления, сопутствующие карстовым проявлениям. Изучались условия и закономерности распространения карста в пространстве. Рассматривались возможные влияния техногенных воздействий на активизацию карста.

Карстологическое рекогносцировочное обследование местности с фиксацией поверхностных карстовых форм (рис. 1) проведено в пределах 500-метровой зоны от оси трассы с выполнением поперечных маршрутов через каждые 1-2 км.

Рис.1. Карстовые проявления на поверхности

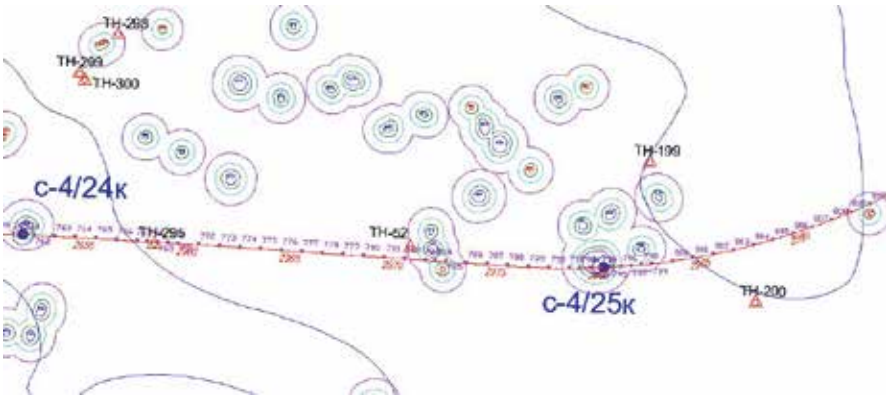

Рис. 2. Фрагмент карты фактического материала

Для количественной оценки поверхностной закарстованности применены следующие показатели: плотность карстопроявлений; интенсивность провалообразования; коэффициент площадной и объемной закарстованности.

На основании всех собранных данных составлена карта фактического материала поверхностных карстовых форм, фрагмент которой представлен на рис. 2.

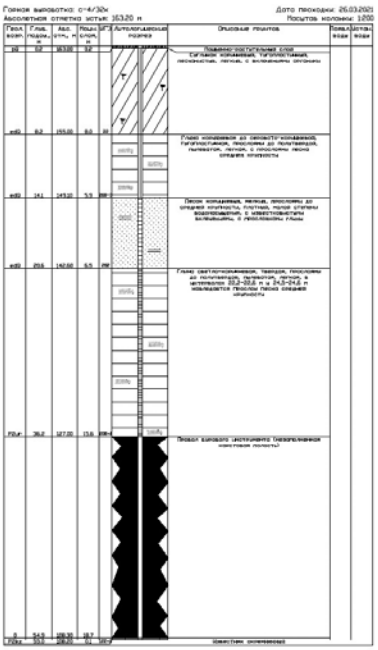

Рис. 3. Пример литологической колонки карстологической скважины

Методика изучения подземной закарстованности

Закарстованность массива пород оценена по данным проходки инженерно-геологических и карстологических скважин, а также геофизическими исследованиями. Анализ литологических колонок скважин (рис. 3) позволил выделить интервалы глубин, в пределах которых обособляются ослабленные зоны (зоны дробления) коренных пород и вероятные карстовые полости.

При проходке скважин из основных литологических разновидностей с целью определения свойств и состояния грунтов перекрывающей толщи дисперсных отложений и коренных карстующихся пород были отобраны пробы грунта ненарушенной структуры. В целом по данным бурения выделено примерно 280 зон дробления и 15 полостей.

Геофизические исследования проводились методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и методом преломленных волн (МПВ).

Исследования методом ВЭЗ выполнены с целью расчленения геологического разреза, получения информации о строении и физическом состоянии пород, слагающих разрез территории работ на глубину до 70 м, выявления участков повышенной закарстованности территории (рис. 4).

Сейсморазведка методом (МПВ) позволяет определить границы геологических слоев, достаточно резко отличающихся по своим сейсмоакустическим свойствам, и выделить в их пределах участки с аномально низкими скоростными параметрами. Сейсморазведка МПВ рекомендована при решении задач по установлению геологического строения, поиска локальных неоднородностей, состава и состояния грунтов.

На исследуемой территории выполнено шесть сейсмозондирований методом преломленных волн (МПВ) с косой 96 м. Шаг между сейсмоприемниками составлял 2 м. Возбуждение упругих колебаний производилось импульсным источником продольных (Р) волн - ударником типа «кувалда» вертикальным ударом по поверхности земли. Согласно полученным данным карстовые проявления в пределах проектируемой трассы обусловлены наличием карстующихся грунтов – известняков, доломитов, гипсов и ангидритов пермской системы.

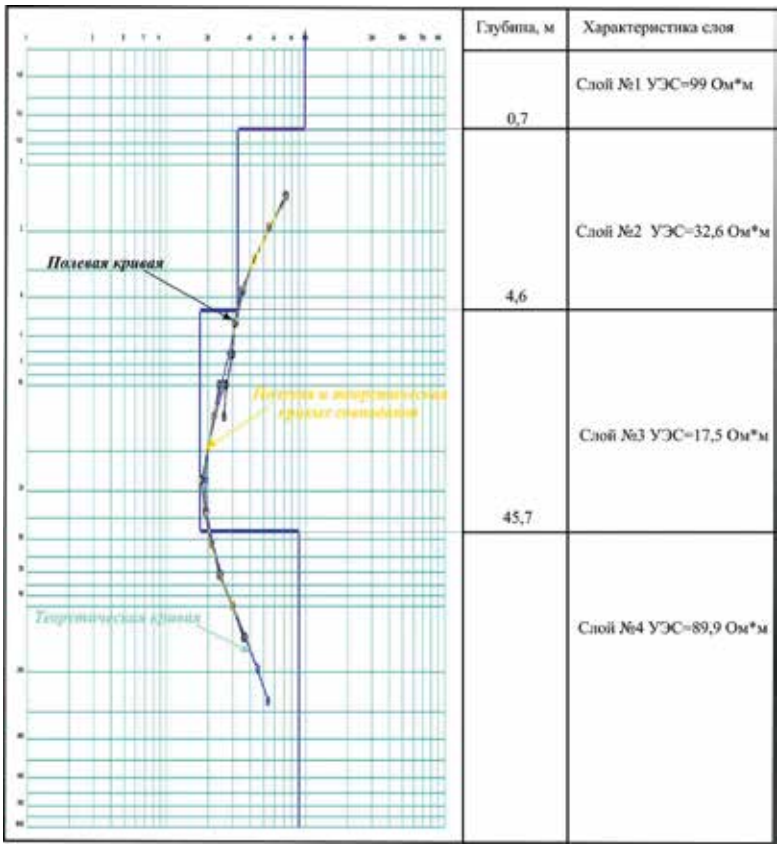

Рис. 4. Пример интерпретации единичного ВЭЗ

В качестве примера на рис. 5 приведена схема проведения геофизических работ вокруг карстологических скважин с-4/7к м с-4/7к-доп на ПК 2508-ПК 2527 методом МПВ. В результате обработки полевых материалов построены карты скоростей сейсмических волн на различных глубинах (16 м, 48 м) (рис. 6).

В результате интерпретации геофизических данных выделена ослабленная зона (оконтурена зеленым цветом), связанная с разуплотненным состоянием пород в интервале глубин 16-48 м (рис. 7), что подтверждается бурением карстологических скважин.

Методика оценки карстоопасности скоростной автомобильной дороги

При оценке карстоопасности территории трассы применены два метода ее районирования.

1. Общее районирование по интенсивности провалообразования и расчетным диаметрам карстовых провалов выполнено согласно СП 11-105-97 [9] с учетом основных условий, степени и характера развития карста. В

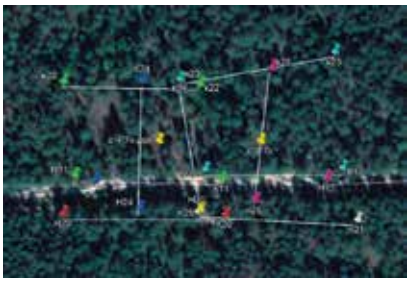

Рис. 5. Схема проведения геофизических работ МПВ, вокруг скважин с-4/7к, с-4/7к-доп

основу районирования положены структурно-тектонические, геоморфологические, гидрогеологические и геолого-гидрологические условия. В результате на исследуемой территории выделено 36 карстовых участков с категориями устойчивости по интенсивности провалообразования от II до VI и категориями устойчивости относительно средних диаметров карстовых провалов от Б до Г. В данном случае в соответствии с требованиями СП 11-105-97 и СП 22.13330 [6] оценка карстоопасности выполнена по интенсивности провалообразования.

2. Микрорайонирование по удаленности от ближайшего карстопроявления выполнено согласно СП 11-105-97 и Руководству [10].

По методу удаленности (микрорайонирования) от ближайшего карстопроявления выполнено следующее назначение категорий устойчивости (рис. 8):

- Зона I – само карстопроявление (участок с элементами местности особо высокой опасности);

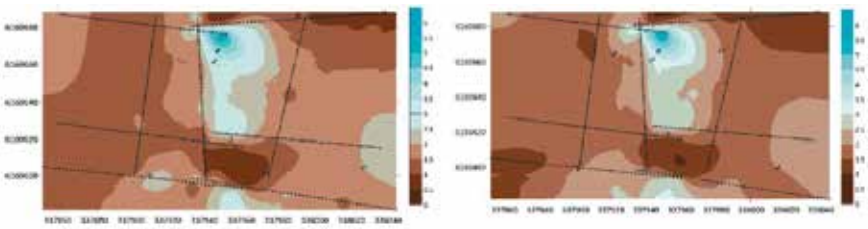

Рис. 6. Карты скоростей сейсмических волн на различных глубинах

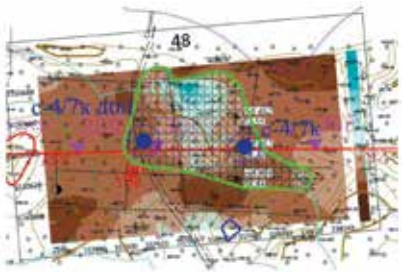

Рис. 7. Контур развития карстовых полостей

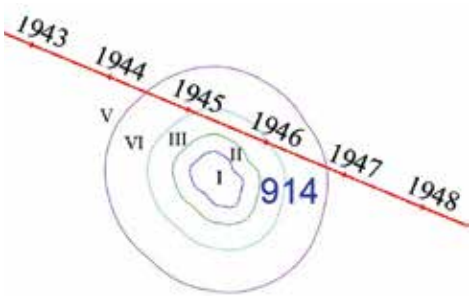

Рис. 8. Пример микрорайонирования по удаленности от ближайшего карстопроявления

- Зона II – радиус удаленности 20 м от карстовой формы (участок с элементами местности высокой опасности);
- Зона III – радиус удаленности 20-50 м от карстовой формы (участок с элементами местности умеренной опасности);
- Зона IV – радиус удаленности 50-100 м от карстовой формы (участок с элементами местности низкой опасности);
- Зона V – удаленность более 100 м от карстовой формы (участок с элементами местности крайне низкой опасности).

В итоге применения данного метода получена карта районирования территории по степени поверхностной закарстованности, в которой по оси трассы выделены зоны удаленности от карстовой формы от I до V.

В таблице 1 показаны протяженности выделенных участков по двум методам районирования, включая саму трассу, пересекаемые дороги и развязку с автомобильной дорогой Р-158.

В целом, согласно результатам карстологических исследований, инженерно-геологические условия района проектирования трассы характеризуются как неблагоприятные из-за распространения карстовых процессов. В связи с этим необходимо применение мероприятий противокарстовой защиты.

Выбор и обоснование противокарстовых мероприятий на объекте проектирования

Защитные противокарстовые мероприятия осуществляются с целью предотвращения или сведения к минимуму катастрофических разрушений и обеспечения сохранности сооружений и подразделяются на:

- мероприятия, направленные на изменение в нужном направлении естественного развития карста;
- мероприятия, направленные на защиту строительных объектов, зданий и сооружений, и обеспечивающие безопасность людей;
- мероприятия, направленные на уменьшение вредного влияния хозяйственной деятельности на карстовые процессы.

Следует отметить, что, с учетом примечания к таблице 5.1 СП 11-105-97 [9], на участках с категорией VI по интенсивности провалообразования противокарстовые мероприятия не применялись.

В соответствии с п. 8.3 СП 116.13330 [5] для инженерной защиты зданий и сооружений от карста применяются следующие противокарстовые мероприятия или их сочетания: планировочные, водозащитные и планировочные, геотехнические, конструктивные, технологические, эксплуатационные. Различные вопросы, связанные с реализацией этих мероприятий в практике строительства, в том числе дорожного, рассмотрены в [1, 11, 12, 13] и других работах.

С учетом отраженного в этих работах опыта, на рассматриваемом участке трассы в качестве водозащитных и планировочных мероприятий предусмотрено устройство продольного и поперечного водоотвода канавами и кюветами, а также планировка полосы отвода с уклонами поверхности, обеспечивающими сток в канавы, водные объекты или за пределы границ полосы отвода.

Эксплуатационные мероприятия применяются с целью контроля возможной активизации карстово-суффозионных процессов. В рассматриваемом проекте эти мероприятия включают регулярный визуальный контроль состояния трассы для выявления симптомов карстовых, суффозионно-карстовых и карстово-суффозионных деформаций в 100-метровой буферной зоне от оси трассы и являются составной частью общей программы геотехнического мониторинга.

Общее районирование		Микрорайонирование	
Категории устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов	Протяженность участков, км	Категория устойчивости по удаленности от ближайшего карстопроявления	Протяженность участков, км
I	0	I	0,472
II	9,172	II	1,730
III	19,070	III	4,939
IV	16,545	IV	10,999
V	59,552	V	86,199
VI	40,253	-	-
Σ (I – IV)	**44,787**	**Σ (I – IV)**	**18,140**

Таблица 1

В соответствии с п. 6.12.15 СП 22.13330 [6] необходимость специальных противокарстовых мероприятий (геотехнических и конструктивных) для участков с V-ой категорией устойчивости была исключена, исходя из учета соотношения расчетного срока службы сооружения и интенсивности провалообразования на этих участках.

Геотехнические мероприятия в настоящем проекте предполагают тампонирование выявленных в пределах трассы карстово-суффозионных, суффозионно-карстовых воронок, или воронок любого иного генезиса. Предусмотрены два типа тампонирования:

тип 1 - для неактивных, древних воронок выполняется тампонирование связным грунтом (глина, суглинок) (рис.9);

тип 2 - для активных, молодых по возрасту воронок выполняется их тампонирование связным грунтом (глина, суглинок) с укладкой георешетки и слоя грунтоцементной смеси в основании выемки (рис.10).

Конструктивные мероприятия должны обеспечивать прочность, устойчивость и безаварийную эксплуатацию сооружения в течение всего срока службы с учетом расчетных параметров потенциально возможных карстовых деформаций. Для назначения конструктивных противокарстовых мероприятий изыскательской организацией (ООО «Противокарстовая и береговая защита») выполнены расчеты ожидаемых размеров (диаметров) вновь образующихся карстовых провалов. В расчетах применены два подхода:

1) по детерминистическим формулам с применением метода послойного аналитико-графического моделирования по А. В. Аникееву [14] и Г. М. Троицкому [15] , предусматривающего

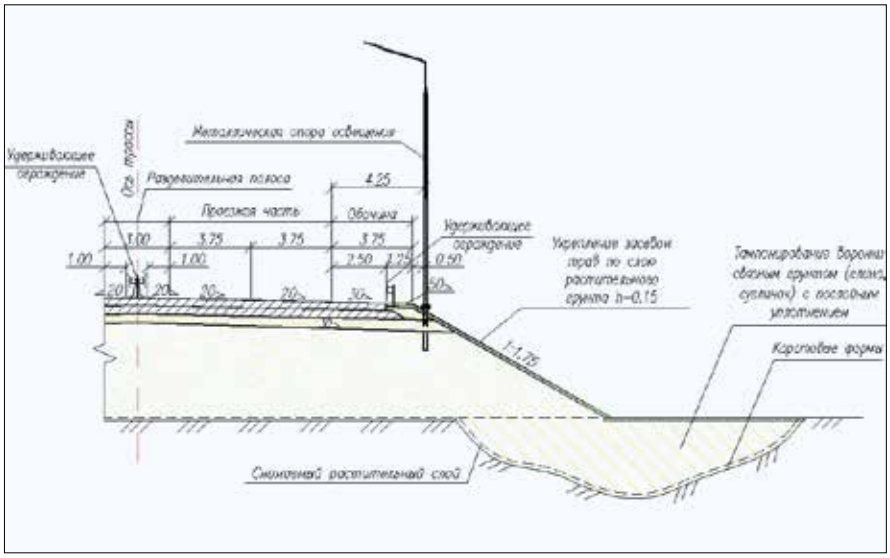

Рис. 9. Первый тип тампонирования (неактивные, древние воронки)

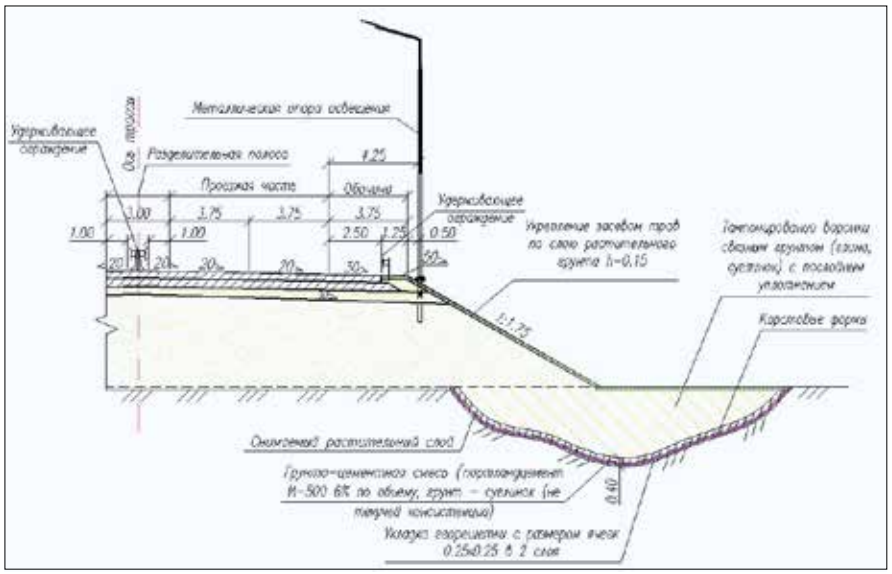

Рис. 10. Второй тип тампонирования (активные, активизированные, молодые по возрасту воронки)

учет всех данных о мощностях и физико-механических характеристиках отдельных прослоев перекрывающих дисперсных отложений, установленных по результатам инженерно-геологических и карстологических изысканий в пределах каждого карстового участка.

2) по вероятностно-статистическому методу, на основе анализа распределений ожидаемых карстовых провалов по величине их средних и максимальных диаметров, с учетом площади сооружения в пределах выделенных зон карстоопасности по микрорайонированию. Основные положения этой методики отражены в Рекомендациях [7] и работах [16, 17, 18, 19].

На рисунке 11 показан фрагмент таблицы районирования с результатами расчетов по обоим методам.

В работе В.В. Самосвата [1] в качестве конструктивных противокарстовых мероприятий указано

применение эстакад и «легких насыпей», а также перекрытие потенциально опасных участков ж/б плитой или гибким ростверком из высокопрочного геосинтетического материала. Отмечено, что устройство гибкого ростверка является наиболее распространенным конструктивным противокарстовым мероприятием в отечественной и зарубежной практике строительства как автомобильных, так и железных дорог.

Согласно результатам микрорайонирования территории трассы суммарная длина участков, требующих конструктивной защиты от возможных карстовых проявлений, составляет (включая пересекаемые дороги и развязки) 18140 м (см. табл. 1). Данное обстоятельство практически предопределило в качестве основного конструктивного противокарстового мероприятия устройство гибкого ростверка из высокопрочного геосинтетического материала. К достоинствам этой конструкции относятся простота технологии, сравнительно невысокие сроки ее устройства, возможность отсыпки земполотна непосредственно после укладки ростверка. Кроме того, данная конструкция обоснована теоретическими и модельными исследованиями [20 ÷ 26]. В особых случаях (см. далее) гибкий ростверк заменялся железобетонными плитами.

Согласно таблице районирования (рис. 11) применение вероятностно-статистического метода, в отличие от детерминированного, позволяет детализировать требуемые параметры противокарстовой конструкции соответственно распределению величин расчетных пролетов (диаметров) карстовых провалов по зонам удаленности. По выполненным оценкам, в стоимостном выражении для рассматриваемого участка трассы это приводит к снижению затрат более, чем в 6 раз. В связи с этим в расчетах противокарстовых конструкций рассмотрены диаметры ожидаемых карстовых провалов, определенные вероятностно-статистическим методом.

Карстовый участок	Районирование				Микрорайонирование			Расчетный пролет карстового провала				
	Карстовый участок	Интенсивность образования провалов шт/км2·год	Категория устойчивости по интенсивности	Расчетные значения – Средний (расчетный) диаметр в пределах участка	Зона удаленности от карстовой формы	Пикетаж	Протяженность, м	Интенсивность провалообразования, шт./км2	Средний диаметр провала для карстового участка по Аникееву, м	Максимальный диаметр карстового провала по Троицкому, м	Результаты вычисления расчетных пролетов карстового провала, м	Результаты вычисления расчетной площади провала, кв. м
4а	4а	0,083	III	4,4	V	ПК2307+21,63-ПК2314+88,88	767,25	0,005	4,4	14,1	-	-
4а					V	ПК2314+88,88-ПК2315+24,00	35,12	0,005	4,4	14,1	-	-
4а					IV	ПК2315+24,0-ПК2315+83,5	59,50	0,025	4,4	14,1	0,18	0,99
4а					III	ПК2315+83,5-ПК2316+63,3	79,80	0,075	4,4	14,1	0,58	3,37
4а					IV	ПК2316+63,3-ПК2318+14,0	150,70	0,025	4,4	14,1	0,35	1,82
4а					III	ПК2318+14,0-ПК2318+53,4	39,40	0,075	4,4	14,1	0,39	2,21
4а					IV	ПК2318+53,4-ПК2320+05,3	151,90	0,025	4,4	14,1	0,35	1,83
4а					III	ПК2320+05,3-ПК2320+35,4	30,10	0,075	4,4	14,1	0,34	1,87
4а					II	ПК2320+35,4-ПК2320+55,8	20,40	0,500	4,4	14,1	2,08	11,18
4а					I	ПК2320+55,8-ПК2320+71,5	15,70	1,000	4,4	14,1	3,20	17,24
4а					II	ПК2320+71,5-ПК2320+92,6	21,10	0,500	4,4	14,1	2,07	11,90
4а					III	ПК2320+92,6-ПК2321+23,3	30,70	0,075	4,4	14,1	0,34	1,92
4а					IV	ПК2321+23,3-ПК2321+79,5	56,20	0,025	4,4	14,1	0,16	0,94
4а					V	ПК2321+79,5-ПК2323+53,3	173,80	0,005	4,4	14,1	-	-
4а					IV	ПК2323+53,3-ПК2324+14,0	60,70	0,025	4,4	14,1	0,17	0,97
4а					III	ПК2324+14,0-ПК2325+15,6	101,60	0,075	4,4	14,1	0,69	3,87

Рис. 11. Фрагмент таблицы районирования

Методика определения параметров гибкого ростверка

Основными параметрами гибкого ростверка для проектирования являются требуемая прочность геоткани и геометрические характеристики – длины нахлестов и анкеровки. Для их определения используют апробированные на практике аналитические методы расчетов [27, 28], а также численное моделирование, как правило, конечно-элементными методами.

В численных исследованиях, выполненных с применением программного комплекса PLAXIS [21, 23], параметры армирования подбирались путем варьирования характеристик геосинтетического материала и грунта засыпки, а также высоты слоя засыпки. В результате серии расчетов подбирались оптимальные параметры всей конструкции исходя из минимальной осадки поверхности грунтового массива. Однако в условиях проектирования большого по протяженности участка трассы с многообразием размеров прогнозируемых карстовых проявлений, значительными перепадами продольного профиля, изменчивостью инженерно-геологических условий, применение подхода, основанного на численных исследованиях, не представляется возможным. Поэтому для определения расчетных параметров гибкого ростверка нами был выбран аналитический метод.

В таблице 11.1 EBGEO [28] наиболее известные аналитические методы расчета гибкого ростверка (BS 8006, B.G.E., Giroud, R.A.F.A.E.L., A.S.T.) сопоставлены с точки зрения возможности учета физических характеристик модели. По нашему мнению, наиболее универсальным является метод B.G.E., который и был принят для расчетов гибкого ростверка. К достоинствам этого метода можно отнести:

- возможность учета работы ростверка в продольном и поперечном направлении, как для изотропного, так и для анизотропного геосинтетического материала;

- возможность рассмотрения трех расчетных схем работы грунтового массива над армирующим слоем.

Применительно к рассматриваемому проекту основные предпосылки расчета сводились к следующему.

1. Расчетный срок работы конструкции усиления под нагрузкой, обусловленной образованием карстовой полости, принимается равным сроку службы сооружения (120 лет).

2. Параметры гибкого ростверка назначаются расчетом исходя из следующих основных условий:

1. Максимальное значение допустимой относительной просадки на поверхности дорожного покрытия согласно табл. 5.2 ГОСТ Р 50597 [29] составляет 0,0033 (не более 10мм на длине 3,0 м).

2. Для сложных участков, с большими расчетными диаметрами воронок, максимальное значение относительной просадки на поверхности покрытия составляет не более 0,017 (см. п.11.2.5 EBGEO [28]), при этом абсолютная деформация на поверхности покрытия должна быть не более 5см (см. табл. 5.3 ГОСТ Р 50597 [29]).

3. Максимальное значение относительного удлинения геосинтетического материала за период работы под нагрузкой не должно превышать 6,0%.

4. Учитывается деформирование геосинтетического материала вдоль рулона и в поперечном направлении.

5. В зависимости от соотношения высоты насыпи H и диаметра воронки D рассматриваются три расчетные модели:

1) Модель разрушения без учета сопротивления по боковой поверхности зоны разуплотнения над конструкцией гибкого ростверка – при H/D < 1;

2) Модель разрушения с учетом сопротивления по боковой поверхности зоны разуплотнения над конструкцией гибкого ростверка – при 1 ≤ H/D ≤ 5;

3) Модель с образованием арочного свода высотой 1,87D над конструкцией гибкого ростверка (арочная модель) - при H/D > 5.

Необходимо отметить, что при динамическом воздействии подвижной нагрузки возможно отсутствие образование арки над конструкцией гибкого ростверка. Поэтому в запас прочности в рассматриваемых расчетах образование арки принято при условии H/D > 5, в то время как в EBGEO [28] данная модель рекомендована уже при H/D > 3. Кроме того, принятая в расчетах высота арочного свода h= 1,87D превышает рекомендованную в EBGEO минимальную высоту h= D, что также обеспечивает определенный запас прочности армирующего материала.

В расчетах рассмотрены два предельных состояния:

- по долговременной прочности за срок эксплуатации;
- по эксплуатационной пригодности, исходя из условия, что деформация геосинтетического материала под нагрузкой за срок эксплуатации не превысит наименьшую из двух величин: допустимую, соответствующую допустимой деформации поверхности покрытия, или 6%. Для арочной модели, предполагающей отсутствие деформаций поверхности, допустимая деформация геосинтетического материала составляет 6%. В результате расчета определяются (см. рис. 12):
- требуемая паспортная (кратковременная) прочность материала армирования;
- требуемая длина анкеровки армирования на входе в карстоопасный участок и выходе из него;
- требуемая длина анкеровки поперечного армирования под откосами насыпи;

Отрезок трассы	Длина, м	Расчетный диаметр карстовой воронки, м	Прочность геополотна, кН/м		Анкеровка при входе на участок, м	Нахлест вдоль/поперек рулона, м	Анкеровка на выходе из участка, м	Минимальная высота отсыпки, м
			паспортная	длительная, не менее				
Карстовый участок № 7а								
ПК2515+10.4 - ПК2516+01.8	91,4	0,44	100/50	36/18	0,7	0,7/0,5	0,7	
ПК2516+01.8 - ПК2516+20.8	19,0	2,46	1800/100	735/36	9,5	9,5/0,5	9,5	2,46
ПК2516+20.8 - ПК2519+21.6	300,8	0,73	100/50	36/18	1,3	1,9/0,6	1,4	1,3
ПК2519+21.6 - ПК2519+59.4	37,8	3,07	1800/100	735/36	10,5	10,5/0,5	10,5	3,07
ПК2519+59.4 - ПК2519+85.2	25,8	4,3	2000/100+ 1600/100 два слоя	816/36+ 653/36 два слоя	13,9	13,9/0,6	13,9	4,3
ПК2519+85.2 - ПК2520+06.2	21,0	2,46	1800/100	735/36	9,5	9,5/0,5	9,5	2,46
ПК2520+06.2 - ПК2520+30.1	23,9	0,34	100/50	36/18	0,5	0,5/0,5	0,5	

Рис. 12. Фрагмент таблицы результатов расчетов

Рис. 13. Противокарстовое армирование в основании земляного полотна

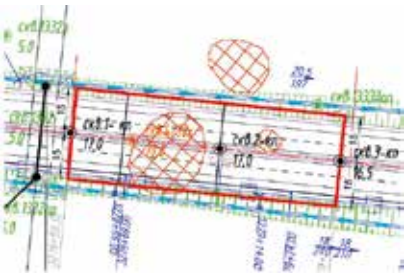

Рис. 14. План отрезка трассы с плитой

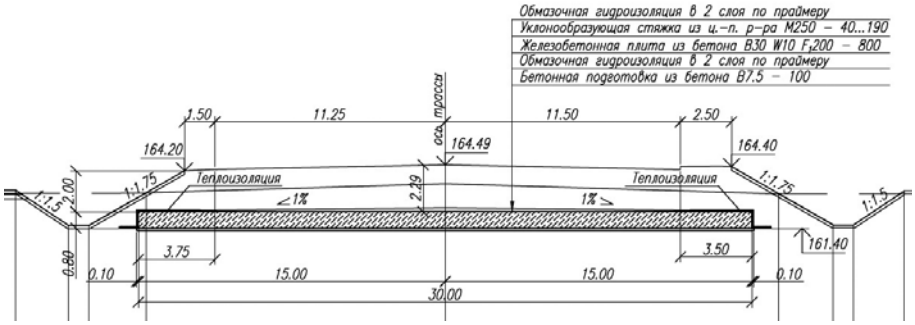

Рис. 15. Поперечник с плитой

- требуемая величина нахлеста полотнищ геосинтетического материала в продольном и поперечном направлениях.

Расчеты выполнены применительно к высокопрочным тканым геосинтетическим материалам на основе полиэфира (Стабиленка, Армостаб). В расчетах и проектных решениях рассмотрена укладка армирования вдоль продольной оси насыпи (рис. 13). Укладка производится на песчаную подсыпку толщиной не менее 15 см. Использование более 2 слоев геосинтетики принято считать нецелесообразным и в расчетах не рассматривалось. В связи с этим в ряде случаев (большие диаметры воронок, низкие насыпи, выемки) возникали дополнительные требования к минимально допустимой высоте отсыпки над армирующим слоем.

В случаях особо неблагоприятных сочетаний условий (низкие отметки продольного профиля и большие размеры прогнозируемых воронок – более 5-6 метров) при невозможности обеспечить необходимую прочность двухслойного армирования, вместо гибкого ростверка применены железобетонные плиты, устроенные в основании насыпи.

Такое же решение применено для перекрытия потенциальных провалов над выявленными глубинными карстовыми полостями. Оно оказалось предпочтительным по итогам технико-экономического сравнения с вариантами устройства эстакады и заполнения полости грунтоцементным раствором. Оценки напряженно-деформированного состояния плит с учетом карстового провала выполнены в среде SCAD Office, как описано в [30]. На рис. 14, 15 показаны план и поперечный профиль плиты длиной 88,6 м на участке потенциальных провалов диаметром до 12,22 м над карстовой полостью на участке трассы ПК 3278+50.32 – ПК 3279+39.0.

Заключение

Карстовые процессы являются одними из наиболее трудно-прогнозируемых природных процессов, влияние которых на конструктивные решения объектов дорожного строительства необходимо учитывать. Особое внимание следует уделять инженерным изысканиям при прохождении объекта по территориям, на которых распространены карстующиеся породы и велик риск проявления деформаций на поверхности, что может привести к серьезным последствиям. В данной статье мы постарались описать решения противокарстовой защиты применительно к линейному объекту М-12 «Москва — Казань». Главная задача представленных конструктивных противокарстовых мероприятий — обеспечение эксплуатационной пригодности линейного объекта при образовании в основании земляного полотна карстового провала (воронки). Практическая значимость статьи заключается в том, что описанные подходы в изучении поверхностной и подземной закарстованности и назначенные противокарстовые мероприятия возможно использовать при строительстве других линейных объектов.

Основные выводы по материалам статьи

1. Инженерно-геологические условия проектируемого участка трассы характеризуются как неблагоприятные в связи с распространением карстовых процессов, проявляющихся в виде поверхностных и подземных карстовых образований. Карстующие грунты представлены известняками, доломитами, гипсами и ангидритами пермской системы.
2. В результате общего районирования территории выделены 36 карстовых участков с категориями устойчивости по интенсивности провалообразования от II до VI и категориями устойчивости относительно средних диаметров карстовых провалов от Б до Г.
3. Оценка устойчивости территории по методу удаленности от ближайшего поверхностного проявления карста (микрорайонирование) позволила выделить по оси трассы зоны удаленности от I (участки с элементами мест-

ности особо высокой опасности) до V (участки с элементами местности крайне низкой опасности).

4. Прогноз ожидаемых размеров вновь образующихся карстовых провалов выполнен по двум методам:

- детерминистическому, на основе аналитических расчетов, учитывающих прочностные и деформационные характеристики грунтов толщи, перекрывающей карстующиеся породы;
- вероятностно-статистическому, с учетом площади сооружения в пределах выделенных зон карстоопасности по микрорайонированию.

5. Анализ материалов карстологических исследований, выполненных в составе инженерно-геологических изысканий, позволил обосновать следующие противокарстовые мероприятия:

- тампонирование выявленных в пределах трассы провалов;
- устройство гибкого ростверка или, в особых случаях, железобетонных плит на участках возможного образования новых провалов.

6. Проектные параметры гибкого ростверка определены с использованием аналитического метода расчета B.G.E. применительно к размерам (диаметрам) воронок, полученным вероятно-статистическим методом. В результате расчетов составлены таблицы прочностных и геометрических характеристик армирования для всех участков трассы с категориями удаленности I ÷ IV.

Список литературы:

1. Самосват В. В. Современные проблемы обеспечения механической безопасности земляного полотна при проектировании автомобильных дорог на закарстованных территориях. // Дороги и мосты. 2020. Вып. 2(44). ФАУ «РОСДОРНИИ». — С. 31–52.
2. СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги.
3. СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты.
4. ГОСТ 33149–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях.
5. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
6. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
7. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. // Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области. Нижний Новгород, 2012 г. — С. 139.
8. Хоменко В. П., Крашенинников В. С. Противокарстовая защита и признаки подготовки провалообразования. // Промышленное и гражданское строительство. Выпуск № 9. 2022 г. — С. 54–58.
9. СП 11–105–97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 2. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
10. Миронов Н. А., Саваренский И. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. Москва, 1995 г. — С. 166.
11. Байдин И. Ю., Сазонова С. А. Обзор противокарстовых мероприятий при проектировании линейных объектов. // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. Том 2. 2020 г.// — С. 324–329.
12. Аргал Э. С. Из опыта ликвидации карстовых пустот. // Основания, фундаменты и механика грунтов. Выпуск № 3. 2022 г. — С. 19–25.
13. Бабков В. Ф., Андреев О. В. Проектирование автомобильных дорог. Часть II., М., Транспорт, 1987. — С. 415.
14. Аникеев А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М., РУДН, 2017. — С. 328.
15. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. Под ред. Е. А. Сорочана. — Москва: Стройиздат., 1986 г. — С. 176.
16. Толмачев В. В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. — С. 98–107.
17. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. — С. 176.
18. Махнатов С. В., Уткин М. М. Способ определения параметров конструктивной противокарстовой защиты // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22–23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. — С. 72–77.
19. С. В. Щербаков, В. Н. Катаев. Алгоритм принятия проектных решений при строительном освоении закарстованных территорий. //Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума / Под ред. В. Н. Катаева, Д. Р. Золотарева, С. В. Щербакова, А. В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. — Пермь, 2015. — С. 214–222.
20. Золотозубов Д. Г., Пономарев А. Б.. Обеспечение конструкционной безопасности грунтовых оснований при возникновении провалов на карстовых территориях. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2009. № 15 (34). — С. 15–18.
21. Золотозубов Д. Г., Пономарев А. Б. Расчеты армированных грунтовых оснований при возникновении карстовых провалов. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. Выпуск № 18 (37). 2010 г. — С. 19–22.
22. Кобыща О. Е., Бочкарева Т. М. Моделирование противокарстовой защиты. Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. № 1. 2013. — С. 124–135.
23. Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г. Улучшение свойств грунтовых оснований на карстоопасных территориях с помощью геосинтетических материалов. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40 (59). — С. 116–126.
24. Готман Н. З., Готман А. Л., Проектирование геотехнических мероприятий противокарстовой защиты. // Материалы первой Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг». 2017. — С. 86–89.
25. Schwerdt S., Naciri C. G. Perfomance of aggregates in aggregates in geogrid-reinforced soils used for protection against surface collapce into underground voids // EuroGeo 3: Geosyntetics conference. Munich, Germani, 2004. Pp. 483–488.
26. Minh Tuan Pham. Granular platform reinforced by geosynthetics above cavities. Laboratory experiments and numerical modeling of load transfer mechanisms Science [cond-mat.mtrl-sci]. Université Grenoble Alpes,2019. — С. 177.
27. BS8006–1:2010. BSI — British Standart Institution: Code of practice for strengthened/ reinforced earths and other fills. London.
28. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements (EBGEO). German Geotechnical Sociery. 2011 Emst & Co. KG. Published by Emst% Sohn GmbH & Co. KG. Pp. 343.
29. ГОСТ Р 50597–2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля.
30. Гилемханов Р. А., Алишер А. Оценка напряженно-деформируемого состояния фундаментной плиты с учетом карстовых провалов в среде SCAD Office. // Строительство уникальных зданий и сооружений. Выпуск № 4 (43). 2016 г. — С. 18–33.