УДК 624.133/.138

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Аспирант **В.В. Самосват**
(Новгородский филиал
АО «Институт «Стройпроект»)
Конт. информация: samosvat.victor@gmail.com

*В статье рассмотрены проблемы нормативно-методического обеспечения проектирования земляного полотна автомобильных дорог на закарстованных территориях, а также трудности при назначении противокарстовых мероприятий. Проанализирован потенциал мониторинговых работ для повышения эффективности противокарстовой защиты и обеспечения безопасности дорожных сооружений при традиционной организации наблюдений.*
***Ключевые слова**: карст, суффозия, противокарстовая защита, мониторинг, оседание поверхности, механическая безопасность.*

На современном этапе строительство новых автомобильных дорог всё чаще сопряжено с освоением территорий распространения специфических грунтов (просадочных, набухающих, органических и др.) и опасных геологических процессов (оползни, подтопления, карст, суффозия и т.д.). Проектирование и строительство земляного полотна в сложных инженерно-геологических условиях становится привычной практикой, но, несмотря на существующее многообразие методов проектирования и расчета, технологий и материалов, остается сложным и трудоемким процессом, существенно отличающимся от проектирования и строительства в нормальных инженерно-геологических условиях. Особую категорию сложности представляет проектирование земляного полотна на закарстованных территориях.

Изучению карстово-суффозионных процессов посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых, среди которых наиболее заметны работы Ф.П. Саваренского, Г.А. Максимовича, Г.М. Шахунянца, И.А. Печеркина, Н.А. Гвоздецкого, Д.С. Соколова, В.Н. Дублянского, Г.Н. Дублянской, В.М. Кутепова, Г.М. Троицкого, К.А. Горбуновой, В.В. Толмачева, В.П. Хоменко, В.Н. Андрейчука, А.В. Аникеева, М.В. Леоненко, В.Н. Катаева, Н.З. Готман, Г. Адерхолда, Д. Дженнингса, В.Р. Дирмана, Ф.Г. Белла, У. Джоу и Б. Бека, Ф. Ройтера

и Х. Молека, Е. Лишковского, Ф. Гутьерреса и др. Однако многогранность и многофакторность карстово-суффозионных процессов существенно затрудняют их полноценное моделирование в полевых и лабораторных условиях с достаточной для инженерных целей точностью, поэтому даже к началу третьего десятилетия XXI столетия многие аспекты карстово-суффозионных процессов остаются недостаточно изученными. Строительные нормы (в том числе автодорожные), будучи отражением современного понимания научной проблемы, как нельзя лучше демонстрируют данное обстоятельство.

### *Нормативное обеспечение проектирования земляного полотна автомобильных дорог в районах развития карста*

Если обратиться к основным дорожным сводам правил СП 34.13330 **[1]** и СП 45.13330 **[2]**, которые регламентируют проектирование земляного полотна автомобильных дорог и грунтового основания земляных сооружений, то можно убедиться, что в них не отражены вопросы проектирования на закарстованных территориях, за исключением п. 7.57 **[1]**, содержащим требование к осуществлению устройства земляного полотна на любых специфических грунтах и при любых опасных геологических процессах, включая карст, на основе специальных технических условий.

Единственным дорожным нормативом, содержащим информацию о подходах к проектированию в районах развития карста, является ГОСТ 33149-2014 **[3]**. Однако в разделе данного стандарта из шести коротких пунктов относительно карста приведены только общие сведения о принципах проектирования земляного полотна на закарстованных территориях и отсутствуют конкретные указания в части применения противокарстовых мероприятий. Кроме того, необходимо отметить, что ГОСТ 33149-2014 по большей части дублирует текст «Рекомендаций по проектированию земляного полотна дорог в сложных инженерно-геологических условиях» **[4]**, разработанных ЦНИИС в 1974 г., и не содержит каких-либо принципиальных нововведений или положений, учитывающих накопленный за прошедшие четыре десятилетия опыт и современное развитие технологий.

Относительно широко вопросы проектирования на закарстованных территориях раскрыты в требованиях и рекомендациях общестроительного свода правил по инженерной защите зданий и сооружений от опасных геологических процессов СП 116.13330 **[5]**, а также в СП 22.13330 **[6]**, распространяющегося на проектирование оснований зданий и сооружений в котлованах, траншеях и открытых выработках (не распространяется на автомобильные дороги, но, ввиду общего характера

его требований, зачастую также рассматривается в качестве общестроительного, поэтому во многих отраслевых дорожных документах приводится ссылка на данный свод правил). Однако в отношении данных сводов правил следует отметить три важных обстоятельства: 1) оба документа не учитывают особенности линейных сооружений в целом и земляного полотна дорог в частности; 2) рекомендации, приведенные в них, применимы лишь для сравнительно простых условий, в более сложных ситуациях проектировщику предлагается обратиться в специализированные организации; 3) даже эти документы не представляется возможным оценить как прогрессивные, в полной мере учитывающие все особенности карстово-суффозионных процессов.

Наиболее полно вопросы проектирования на закарстованных территориях, по мнению автора, отражены в ТСН 22-308-98 **[7]** и в «Рекомендациях по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области» **[8]**. Данные документы затрагивают большинство аспектов строительного проектирования в условиях карста, начиная с особенностей инженерных изысканий, заканчивая рекомендациями по проведению карстологического мониторинга, подходом к оценке карстового риска и предложением по страхованию строительных объектов с учетом карстового риска. Документы **[7]** и **[8]** могут служить качественной основой для разработки новых государственных стандартов, сводов правил и отраслевых нормативов или основой для доработки существующих документов, в том числе дорожных.

Однако в нынешнем виде применимость вышеупомянутых документов для объектов дорожного комплекса ограничена в связи с тем, что в них:

- неполно учтены особенности линейных сооружений и работы земляного полотна автомобильных дорог в условиях карста;
- не приведены методики расчетного обоснования противокарстовых мероприятий или ссылки на такие методики.

Кроме того, следует иметь в виду, что эти документы являются территориальными документами применительно к Нижегородской области, в то время как карстующиеся грунты могут встречаться практически в любой части территории России.

Ряд других нормативных и методических документов в области строительного освоения закарстованных территорий подготовлены, как правило, на основе результатов изучения отдельных вопросов карстоведения и спелеологии, затрагивающих либо региональные особенности развития карста, либо способы получения отдельных сведений о характере протекания карстово-суффозионных процессов.

Анализируя зарубежную нормативную базу и опыт защиты автомобильных дорог от карста, необходимо отметить технологию армирования основания земляного полотна над существующими и потенциально возможными карстовыми полостями высокопрочными геосинтетическими материалами (**рис. 1**), с образованием обойм, полуобойм или так называемого гибкого ростверка. Данная технология изложена в EBGEO **[9]**, с указанием аналитических решений для назначения марок материала по прочности и обоснования проектных решений. Несмотря на то, что подобный способ защиты эффективен только для неглубокого карста с небольшими расчетными диаметрами карстовых провалов (по опыту проектирования и строительства – до 5-6 м), он является, пожалуй, наиболее распространенным конструктивным противокарстовым мероприятием в отечественной и зарубежной практике строительства как автомобильных, так и железных дорог.

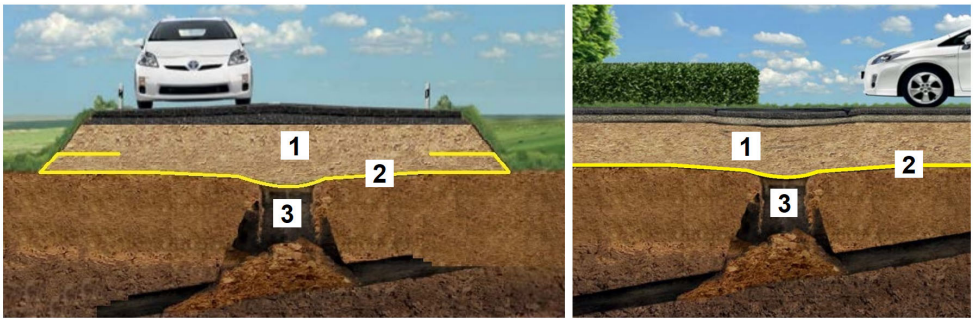


***Рис. 1. Принципиальная схема армирования основания земляного полотна автомобильных дорог над карстовыми полостями***

*1 – грунт насыпи земляного полотна;*
*2 – высокопрочный геосинтетический материал;*
*3 – карстовая полость*

Противокарстовое армирование основания земляного полотна высокопрочными геосинтетиками было успешно реализовано на множестве отечественных и зарубежных объектов транспортной инфраструктуры, в том числе на автомобильной дороге федерального значения А-291 «Таврида» в Крыму; автомобильной дороге «Павлово – Сосновское – Лесуново – Мухтолово – Саконы» в Нижегородской области; автомагистрали А1 в Польше; автомагистралях А38 и В180 в Германии; автомагистрали 448 в Бразилии; участках высокоскоростных железнодорожных магистралей в Испании и Франции. Кроме того, усиление основания земляного полотна с устройством гибкого ростверка из геосинтетических материалов планируется при прохождении по закарстованным участкам

таких значимых для отечественной транспортной отрасли объектов, как автомагистраль М-12 «Москва – Н. Новгород – Казань» и высокоскоростная железнодорожная магистраль «Москва – Казань». При этом в отечественные нормативные документы указанная выше технология до настоящего времени не включена.

Обобщая изложенное выше относительно нормативно-методического обеспечения проектирования земляного полотна автомобильных дорог на закарстованных территориях, можно отметить следующее:

- дорожных норм недостаточно для того, чтобы принять обоснованные проектные решения и гарантировать безопасность земляного полотна в условиях карста, при этом общестроительными нормами не учитывается специфика линейно протяженных объектов и особенности работы земляных сооружений;
- основной частью документов предусматриваются меры защиты для сравнительно простых условий развития карстово-суффозионных процессов, которые применимы, как правило, только для неглубокого карста локального характера;
- отсутствует информация о возможных механизмах развития карстовых форм и карстовых деформаций, играющих определяющую роль для расчетного прогнозирования и соответственно для назначаемых противокарстовых мероприятий;
- отсутствуют верифицированные нормативные методики расчета (при этом использование вероятностных методов не рекомендуется, хотя карстовые процессы носят ярко выраженный стохастический характер, а вероятностные методы в последние годы получили новый виток в своем развитии и нередко применяются даже в механике твердого тела, являющейся априори более точным направлением строительной механики);
- расчет сооружений и конструкций требуется производить в запас на теоретически (потенциально) возможные за срок службы карстовые деформации, что для линейных сооружений часто приводит к необходимости закладывать дорогостоящие специальные конструктивные или специальные геотехнические мероприятия по всей длине сооружения, а это в свою очередь ставит под вопрос экономическую целесообразность строительства объекта в целом.

Несмотря на все сложности и недостаточность нормативно-методического обеспечения в практике дорожного проектирования, устоялись некоторые тенденции в части противокарстовых мероприятий и мер обеспечения безопасности земляного полотна в условиях развития карста.

## *Противокарстовые мероприятия на автомобильных дорогах и современные тенденции*

В настоящее время имеется целый ряд противокарстовых мероприятий, которые при тех или иных условиях могут быть использованы в целях обеспечения безопасности и надежности работы земляного полотна автомобильных дорог. Основные из таких мероприятий представлены в **табл. 1**.

**Таблица 1**

### *Основные виды противокарстовых мероприятий при проектировании земляного полотна и условия их применения*

| *Вид противокарстовых мероприятий* | *Условия применения* |
|---|---|
| ***Планировочные мероприятия**** | |
| Расположение земляного полотна на наименее опасных участках или по наикротчайшему пути | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при любых инженерно-геологических условиях |
| Проложение трассы по водоразделам | |
| ***Водозащитные мероприятия**** | |
| Регулирование поверхностного стока | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при любых инженерно-геологических условиях |
| Применение водозащитных и водонепроницаемых покрытий (проезжей части, обочин, откосов земляного полотна и прилегающей территории) | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при открытом или неглубоком покрытом карсте |
| Создание фильтрационных завес | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при небольшой глубине залегания сульфатных карстующихся пород |

| ***Вид противокарстовых мероприятий*** | ***Условия применения*** |
|---|---|
| Создание противофильтрационного экрана на границе покровных и карстующихся пород | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при выраженных суффозионных процессах и неглубоком залегании карстующихся пород |
| ***Геотехнические мероприятия**** | |
| Превентивное обрушение кровли опасных полостей трамбованием или целенаправленным взрывом с последующей ликвидацией образовавшихся карстовых воронок | Для существующих карстовых деформаций (в основном для устойчивых на момент изысканий полостей), при неглубоком их расположении. При использовании взрыва важно, чтобы в зоне влияния не оказались другие полости, а также чтобы на территории отсутствовали условия для активного развития суффозионных процессов |
| Засыпка старых карстовых воронок глинистым грунтом с укладкой водонепроницаемых геосинтетических материалов | При наличии на дневной поверхности участка строительства существующих карстовых воронок |
| Заполнение опасных полостей тампонажными или несвязными инертными материалами | Для существующих карстовых деформаций (в основном для устойчивых на момент изысканий полостей), при этом необходим предварительный прогноз степени опасности обнаруженных полостей и оценка риска возможной активизации карста на соседних участках |
| Закрепление трещиноватых и ослабленных зон в карстующейся толще | Для существующих карстовых деформаций, при возможном развитии карстово-суффозионных процессов |

| ***Вид противокарстовых мероприятий*** | ***Условия применения*** |
|---|---|
| Закрепление разуплотненных и ослабленных зон в покровной толще | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при расположении ослабленных зон в сжимаемой толще основания |
| Устройство свайного основания | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при неглубоком залегании закарстованных пород |
| ***Конструктивные мероприятия**** | |
| Применение эстакад и «легких насыпей» для снижения нагрузки на кровлю карстующихся пород и существующей или потенциально возможной полости | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при открытом или неглубоком покрытом карсте |
| Перекрытие ж/б плитой или высокопрочными геосинтетическими материалами | |
| ***Эксплуатационные мероприятия**** | |
| Устройство сигнальных систем фиксации карстовых деформаций | Для существующих и потенциально возможных карстовых деформаций, при любых инженерно-геологических условиях |
| Инструментальный и визуальный контроль за режимом грунтовых вод, развитием карстовых процессов и состоянием сооружений | |

***Примечание:***
** – Тип противокарстовых мероприятий принят в соответствии с СП 116.13330.2012* ***[5]*** *и СП 22.13330.2016* ***[6]****.*

Анализируя каждую из приведенных групп противокарстовых мероприятий, важно отметить некоторые их ключевые особенности.

***Планировочные противокарстовые мероприятия*** являются приоритетными и, в соответствии с **[3]** и **[4]**, положены в основу принципов проектирования земляного полотна на закарстованных территориях. Однако сами по себе планировочные мероприятия способны лишь снизить опасность и вероятность возникновения активных карстовых процессов и никак не могут гарантировать устойчивость земляного полотна в случае возникновения карстовых деформаций. В данной статье планировочные мероприятия рассматриваются как априори выполненные в той степени, в которой это было возможно в рамках условий конкретного объекта проектирования.

К категории приоритетных могут быть отнесены также ***водозащитные противокарстовые мероприятия в виде регулирования поверхностного стока и применения водозащитных покрытий***. Однако следует иметь в виду, что такого рода меры эффективны лишь при открытом или неглубоком (до 3-5 м) покрытом карсте. При большем же удалении кровли карстующихся пород от земной поверхности гарантировать отсутствие воды под сооружением, без устройства противофильтрационных завес и экранов, в силу возможной миграции поверхностных вод (даже связные грунты у дневной поверхности из-за процессов выветривания имеют повышенную фильтрующую способность и являются водовмещающими), не представляется возможным.

В свою очередь ***устройство противофильтрационных завес и экранов*** предполагает выполнение значительных объемов работ, особенно на участках, приуроченных к поймам рек или водоемам, где карстово-суффозионные процессы развиваются наиболее интенсивно. Как следствие, данный вид противокарстовых мероприятий чаще всего реализуется лишь для наиболее ответственных сооружений, крайне чувствительных к малым деформациям. Например, противофильтрационные завесы-экраны были предусмотрены для опор большепролетного мостового перехода через р. Уфа в створе «Восточного выезда» из г. Уфа, для конструкций автодорожного тоннеля в том же створе, для опор мостового перехода через р. Чусовая в составе автомобильной дороги «Пермь – Березенки».

***Геотехнические противокарстовые мероприятия в виде закрепления грунтов цементацией и прорезки карстующихся пород сваями*** являются одними из самых эффективных, но при этом имеют довольно высокую стоимость. Поэтому для участков земляного полотна об-

ласть рационального применения геотехнических противокарстовых мероприятий ограничивается в основном их точечным использованием для ликвидации негативного влияния существующих карстовых форм. Выполнять же такого рода защиту для всех новых потенциально возможных карстовых деформаций на протяженных участках дороги, как правило, нецелесообразно. Опыт проектирования показывает, что данный вид мероприятий на практике приводит к удорожанию строительства земляного полотна на 20 % и более, вплоть до нецелесообразности строительства в целом. При этом степень нерациональности повышается с увеличением глубины кровли карстующихся пород. Например, удорожание стоимости в 1,5 раза за счет устройства свайного противокарстового основания или закрепления грунтов покровной толщи прогнозировалось при проектировании строительства 10-километрового участка дороги III технической категории в Нижегородской области при расположении кровли карстующихся пород в среднем на глубине 25-30 м.

***Такие виды геотехнических мероприятий, как превентивное обрушение существующих карстовых полостей, засыпка старых карстовых воронок глинистым грунтом и заполнение полостей тампонажными растворами***, являются способами борьбы с уже реализовавшимися карстовыми деформациями по определению и не направлены на защиту сооружений от вновь образующихся деформаций.

Использование ***конструктивных противокарстовых мероприятий в виде облегченных насыпей и эстакад*** оказывается оправдано лишь в тех случаях, когда наиболее вероятная расчетная карстовая полость расположена в активной зоне основания сооружения (в пределах сжимаемой толщи), т.е. при неглубоком карсте. В противном случае вес конструкций сооружения не оказывает существенного влияния на устойчивость свода над полостью.

Перекрытие расчетных карстовых провалов железобетонными плитами или высокопрочными геосинтетическими материалами, как отмечалось ранее, эффективно при их относительно небольших расчетных диаметрах (не более 5-6 м), что опять же характерно в подавляющем большинстве случаев для открытого или неглубокого покрытого карста. При сравнительно глубоком расположении карстовых полостей расчетные деформации провальной воронки на земной поверхности обычно развиваются за пределы сооружения, и обеспечение устойчивости несущих элементов перекрытия становится крайне сложной задачей (а иногда вовсе невыполнимой), сопряженной с большими объемами работ. Например, для того чтобы перекрыть карстовую пещеру «Таврида» на участке

одноименной трассы пришлось устраивать плиту длиной 130 м и шириной до 25,5 м на буронабивных сваях с глубиной опирания от 27 до 40 м и средним шагом около 5 м (всего 95 свай).

Из-за вероятностно-спорадического характера карстово-суффозионных процессов, а также из-за возможного несоответствия принятых к расчету гипотез и допущений реальному развитию карстовых деформаций, ***эксплуатационные противокарстовые мероприятия*** оказываются оправданными при любых инженерно-геологических условиях независимо от наличия других капитальных противокарстовых мероприятий.

Таким образом, на основании изложенного выше, можно сделать следующие важнейшие выводы.

1. В целом все противокарстовые мероприятия могут быть разделены на капитальные (предполагают устройство капитальных конструкций и сами по себе могут гарантировать обеспечение механической безопасности сооружения) и некапитальные (не предполагают устройство капитальных конструкций и сами по себе не могут гарантировать обеспечение механической безопасности сооружения, а лишь способствуют ей).
2. Ввиду того, что точное место образования карстовых деформаций практически невозможно достоверно спрогнозировать, капитальные противокарстовые мероприятия приходится предусматривать по всей длине карстоопасной территории. На протяженных участках дорог подобные мероприятия сопряжены с большим объемом работ и денежных затрат, настолько большим, что для некоторых объектов под вопросом оказывается целесообразность строительства в целом.
3. Даже если карстоопасный участок имеет небольшую протяженность, реализация таких капитальных защитных мероприятий, как закрепление грунтов цементацией, прорезка карстующихся пород сваями, устройство противофильтрационных завес и т. п., может существенно увеличить стоимость строительного объекта.

Логическим результатом указанных обстоятельств является сложившаяся в практике дорожного-строительного проектирования тенденция, когда капитальные противокарстовые мероприятия применяются главным образом лишь при высоком расположении кровли карстующихся пород (т. е. близко к дневной поверхности) и в основном на объектах высоких категорий при достаточном бюджетном финансировании строительства. В остальных случаях, когда капитальные противокарстовые мероприятия технически неэффективны или экономически нецелесообразны, защита от карста, как правило, сводится к эксплуатационным мероприятиям в виде различных мониторинговых работ (**рис. 2**).

### *Мониторинговые работы в условиях карста*

Как было отмечено ранее, из-за сложной природы карстово-суффозионных процессов и возможных отклонений фактических условий от расчетных предпосылок, мониторинговые работы уместны, даже если проектом предусмотрены капитальные противокарстовые мероприятия. Когда же капитальная противокарстовая защита технически не эффективна или её реализация ставит под вопрос экономическую целесообразность проектируемого объекта, мониторинг становится вовсе единственным возможным мероприятием, позволяющим не отказаться от строительства и обеспечить механическую безопасность сооружения. В этом случае на весь период эксплуатации дороги устанавливается контроль над ходом развития карстово-суффозионных процессов с целью предотвращения недопустимых карстовых деформаций, влекущих за собой нарушения работы сооружения, а капитальные противокарстовые мероприятия реализовываются точечно по мере необходимости, что позволяет существенно повысить их эффективность за счет исключения излишних запасов. Дополнительный экономический эффект может быть достигнут путем раннего обнаружения признаков подготовки карстовых деформаций: чем меньше развились карстово-суффозионные процессы, тем меньший объем работ необходимо выполнить для устранения их негативного влияния или ликвидации последствий.

В общем случае ранним обнаружением подготовки карстового провалообразования предлагается считать такое, которое позволяет своевременно провести защитные мероприятия, не допустив при этом наступление предельного состояния сооружения.

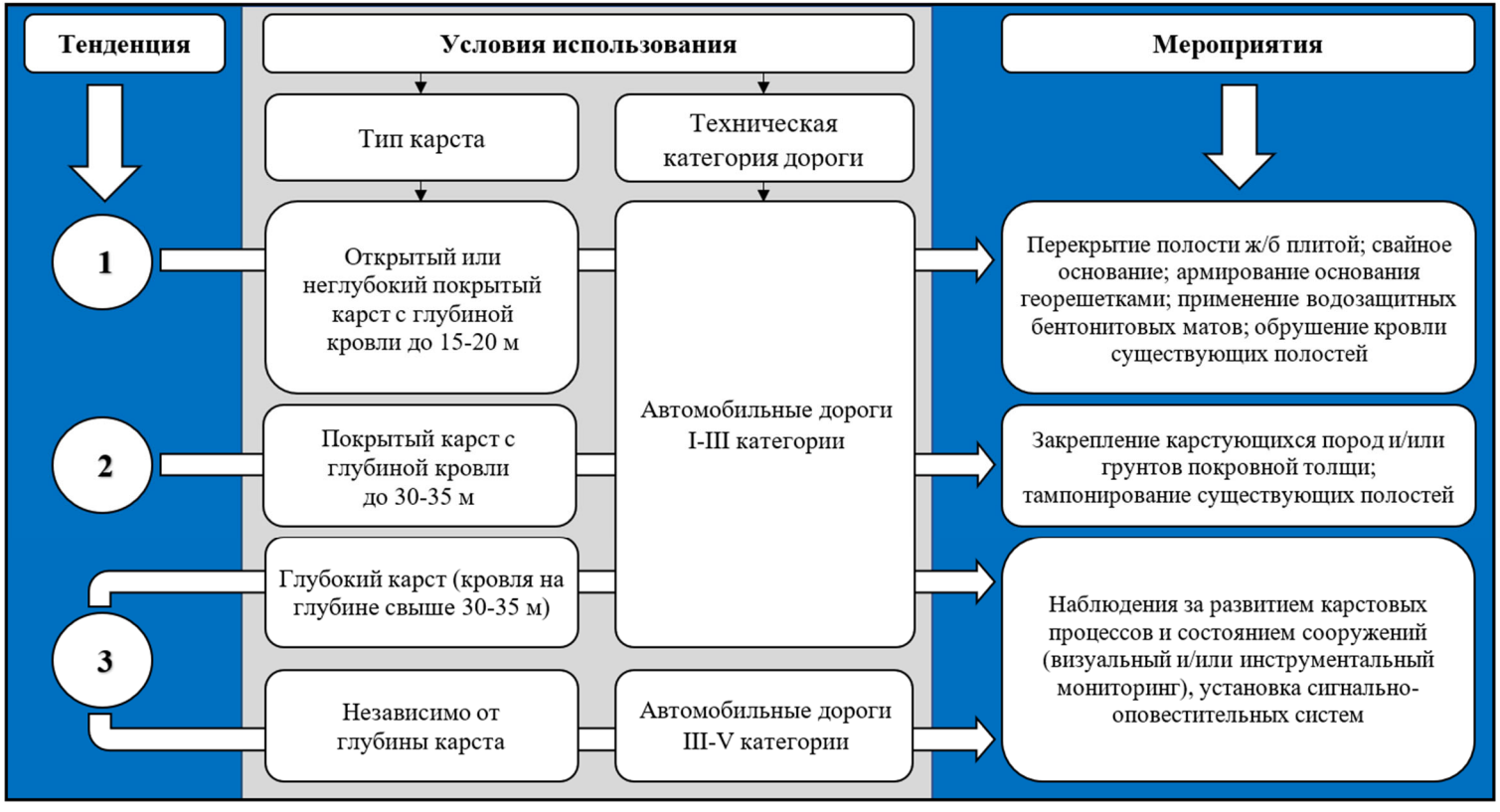


***Рис. 2. Существующие тенденции в назначении противокарстовых мероприятий при проектировании земляного полотна автомобильных дорог***

Среди карстовых деформаций наибольшую опасность для сооружений и наибольшую сложность для мониторинговых наблюдений представляют те деформации, которые связаны с образованием и развитием подземных полостей и провалообразованием.

Принципиальная возможность раннего обнаружения признаков подготовки карстового провалообразования может быть установлена из условий, причин и механизмов карстовых провалов различных видов, подробно рассмотренных в работах **[10-13]**.

В соответствии с исследованиями ведущих отечественных специалистов-карстологов (Хоменко В.П., Аникеева А.В. и др.) всё многообразие механизмов карстовых провалов можно разделить на 6 генетических типов, составляющих три принципиальных класса **[10-12]**:

1. *класс карстово-обвальных провалов* включает в себя три типа:

   1.1 формирующийся в условиях открытого или бронированного (когда карстующиеся породы перекрыты нерастворимыми скальными породами) карста;

   1.2 формирующийся в условиях покрытого карста простого типа;

   1.3 формирующийся в условиях покрытого карста сложного типа;

2. *класс карстово-суффозионных провалов* содержит два типа:

   2.1 формирующийся в условиях покрытого карста фреатического типа;

   2.2 формирующийся в условиях покрытого карста вадозного типа;

3. *класс карстово-суффозионно-обвальных провалов* представлен единственным типом:

   3.1 формирующийся в условиях покрытого карста смешанного типа.

Ни один из указанных типов карстовых провалов (**рис. 3**) не происходит мгновенно, каждому из них предшествуют определенные процессы, обусловленные рядом факторов, которые в совокупности служат признаками-индикаторами подготовки карстового провала и могут быть обнаружены по результатам мониторинговых исследований.

Так, например, для открытого или бронированного карста, представленного единственным типом (1.1), такими признаками могут служить: незакольматированные полости в карстующихся породах; наличие примесей растворенной горной породы в химическом составе подземных вод; характерный для зоны с наименьшими давлениями (зоны разгрузки) интенсивный ток инфильтрующейся с осадками воды по направлению к

полости. Для покрытого карста таких признаков гораздо больше (**табл. 2**).

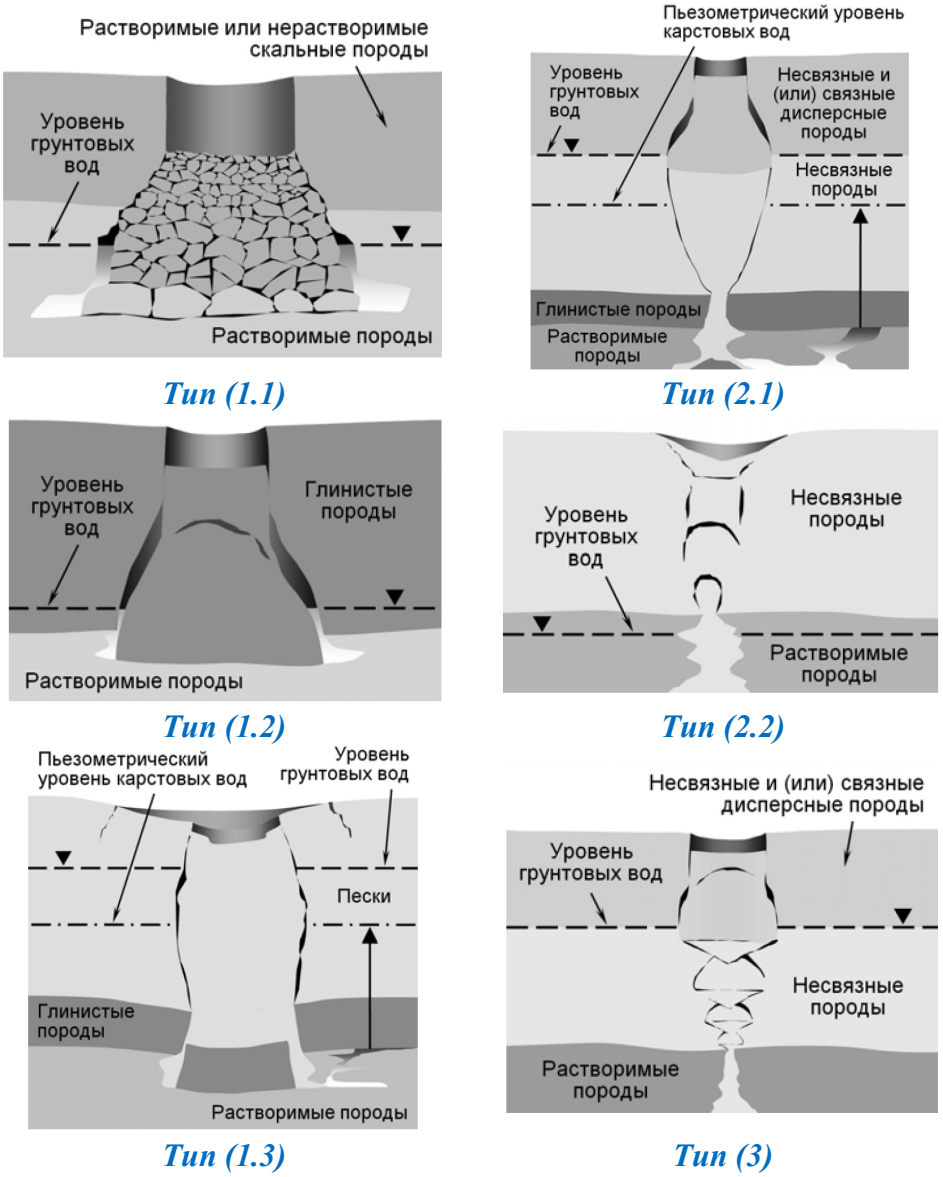


***Рис. 3. Основные генетические типы карстовых провалов [10]***

**Таблица 2**

***Принципиальная возможность (+) или невозможность (–) обнаружения признаков подготовки карстового провалообразования***

| *Признаки подготовки провалообразования в условиях покрытого карста* | *Генетические типы готовящегося карстового провалообразования* | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Карстово-обвальные провалы* | | *Карстово-суффозионное провалы* | | *Карстово-суффозионно-обвальные провалы* |
| | *простого типа* | *сложного типа* | *фреатического типа* | *вадозного типа* | |
| *Характерный ток подземных (в т. ч. инфильтрующихся с осадками) вод* | + | + | + | + | + |
| *Наличие примесей растворенной горной породы в составе подземных вод* | + | + | + | + | + |
| *Незакольматированные полости в карстующихся породах* | + | + | + | + | + |
| *Погребенные поверхностные проявления покрытого карста* | + | + | + | + | + |
| *Зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород* | – | – | + | + | – |
| *Зоны разупрочнения пород покрывающей толщи над полостями* | + | + | + | + | + |
| *Полости в породах покрывающей толщи* | + | – | + | + | + |
| *Оседания земной поверхности* | + | + | + | +* | + |

***Примечания:***

*Таблица подготовлена на основе данных диссертационного исследования В.С. Крашенинникова **[12]**.*

** – Поскольку механизм образования карстово-суффозионного провала вадозного типа подразумевает череду обрушений ослабленных зон несвязного грунта над карстовой полостью (обрушения происходят снизу-вверх, начиная непосредственно от кровли карстующихся пород, постепенно приближаясь к поверхности), то оседания земной поверхности происходят не плавно, как при других типах, а скачкообразно по форме просадок относительно небольших размеров, как правило, не приводящих к критическим деформациям сооружений.*

Большинство из указанных признаков подготовки провалообразования и динамика их изменений могут быть установлены по результатам геофизических исследований. При небольшой глубине залегания карстующихся пород (до 15 м) для этих целей чаще всего используются высокопроизводительные радиолокационные методы. При более глубоком расположении – применяют методы отраженных или преломленных волн (МОВ, МПВ), метод электропрофилирования (ЭП), метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и другие методы сейсмо-, грави-, магнито- и электроразведки, обеспечивающие необходимую глубину наблюдений. Однако, несмотря на эффективность, экономичность и экологичность и другие достоинства геофизических методов, из-за непрямых измерений, из-за чувствительности к условиям среды, ограничивающим область их рационального применения, из-за возможных сложностей выделения полезного сигнала и/или неоднозначности интерпретации результатов, они редко используются самостоятельно. Более того, принято считать, что для раннего обнаружения признаков подготовки карстового провалообразования мониторинговые работы должны быть комплексными и, помимо режимных геофизических исследований, включать в себя: режимные гидрологические наблюдения за уровнем воды в скважинах; регулярный отбор проб подземных вод для изучения химического состава; периодические геодезические наблюдения за деформациями сооружений, дневной поверхности и геологической среды. На практике реализация комплексного мониторинга для линейно протяженных объектов имеет ряд сложностей и недостатков, а именно:

- *во-первых*, следует отметить трудоемкость организации и проведения наблюдений, поскольку несколько видов работ и ведение базы данных измерений должны регулярно выполняться на всем протяжении карстоопасных участков в течение всего периода эксплуатации объекта;
- *во-вторых*, комплексный карстологический мониторинг требует привлечения специализированных организаций для составления программы мониторинга и интерпретации данных наблюдений, а таких организаций в Российской Федерации имеется очень незначительное количество;
- *в-третьих*, необходимо учитывать затратность предполагаемых исследований и измерений, что обусловлено использованием специального оборудования и привлечением высококвалифицированных кадров в течение длительного срока;

- *в-четвертых*, из-за особенностей государственного бюджетирования в большинстве случаев перенос значительных объемов финансирования со строительного периода на эксплуатационный имеет определенные трудности;

- *в-пятых*, целесообразность комплексного карстологического мониторинга обычно количественно не оценивается, а определяется на основании экспертного мнения исходя из теоретических предпосылок (в лучшем случае) или устанавливается произвольно при отсутствии альтернативных решений (в худшем случае);
- *в-шестых*, и, пожалуй, самое важное: в действительности даже при комплексных карстологических наблюдениях существует определенный риск нарушения механической безопасности сооружения. Отсюда распространенная рекомендация, согласно которой карстологическим мониторингом можно ограничиваться только для сооружений III уровня ответственности, где нет угрозы здоровью и жизни людей. Автомобильные дороги к таким сооружениям не относятся.

Ввиду указанных проблем, даже при невозможности обеспечить механическую безопасность сооружения с помощью капитальных мероприятий, комплексные карстологические наблюдения производятся крайне редко. В основном в экстренных ситуациях, когда по факту фиксируется активная стадия карстово-суффозионных процессов и существует высокий риск нарушения работы сооружения, или подобные обрушения уже произошли, а исследования проводятся для назначения мероприятий по ликвидации последствий. В большинстве же случаев, вопреки требованиям и рекомендациям, мониторинг ограничивается периодическими визуальными маршрутными обследованиями, которые не могут гарантировать своевременное установление карстовой опасности, а следовательно, не могут гарантировать безопасность дорожного объекта и его пользователей.

## *Заключение*

Исходя из вышеизложенного, можно отметить, что в существующей практике проектирования автомобильных дорог в условиях карста имеется устойчивая обратно пропорциональная связь между затратами на противокарстовую защиту и величиной риска нарушения механической безопасности сооружения вследствие воздействия карстово-суффозионных процессов. При этом «золотая середина», когда и уровень затрат, и уровень риска приемлемы, практически недостижима, и выбор зачастую требуется делать между двумя крайними вариантами: либо

огромные затраты при приемлемом уровне рисков (и то лишь при качественно выполненной на всех этапах работе, что с учетом сложности карстово-суффозионных процессов является непростой задачей), либо умеренные затраты при необеспеченной механической безопасности.

Таким образом, для изменения сложившейся ситуации на современном этапе необходима разработка новых экономически эффективных подходов к обеспечению механической безопасности земляного полотна автомобильных дорог в условиях карста.

## *ЛИТЕРАТУРА*


1. *СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменениями N 1, 2) [Электронный ресурс]: Введ. 2013-07-01. – М.: Министерство регионального развития РФ: Минрегион России, 2012.*
2. *СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 (с Изменениями N1, 2) [Электронный ресурс]: Введ. 2017-08-28. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ: Минстрой России, 2017.*
3. *ГОСТ 33149-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях [Электронный ресурс]: Введ. 2015-12-01. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2015.*
4. *Рекомендации по проектированию земляного полотна дорог в сложных инженерно-геологических условиях [Текст]. – М: ЦНИИС Минтрансстроя, СоюздорНИИ, 1974. – 257 с.*
5. *СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 [Электронный ресурс]: Введ. 2013-01-01. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: Минстрой России, 2016. Доступ из справочной системы «Техэксперт».*
6. *СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3) [Электронный ресурс]: Введ. 2017-07-01. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: Минстрой России, 2016.*
7. *ТСН 22-308-98 НН Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных*

*территориях Нижегородской области [Текст]: Введ. 1999-09-01. – Нижний Новгород: Администрация, 1999. – 72 с.*

8. *Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области [Текст]. – Нижний Новгород: Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области, 2012. – 139 с.*
9. *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO [Text]: Deutsche Gesellschaft für Geotechnike. V // German Geotechnical Society (Editor), Alan Johnson (Translator). – Munich, 2010 – 313 p.*
10. *Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности [Текст] / В.П. Хоменко // Экологическая безопасность строительства 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. 50-60.*
11. *Крашенинников В.С. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования [Текст] / В.С. Крашенинников, В.П. Хоменко // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 11. – С. 6-8.*
12. *Крашенинников В.С. Локальная оценка карстовой опасности с учетом особенностей строения покрывающей толщи: специальность: 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: дис. ... кандидата геолого-минералогических наук / Крашенинников Вадим Сергеевич [Место защиты: ФГБОУ ВО Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе]. – М., 2017. – 136 с.*
13. *Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска [Текст]: монография / А.В. Аникеев. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.*

## *L I T E R A T U R A*

1. *SP 34.13330.2012 Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.02-85* (s Izmeneniyami N 1, 2) [Elektronnyj resurs]: Vved. 2013-07-01. – M.: Ministerstvo regional'nogo razvitiya RF: Minregion Rossii, 2012.*
2. *SP 45.13330.2017 Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 3.02.01-87 (s Izmeneniyami N1, 2) [Elektronnyj resurs]: Vved. 2017-08-28. – M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva RF: Minstroj Rossii, 2017.*

3. *GOST 33149-2014 Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Pravila proektirovaniya avtomobil'nyh dorog v slozhnyh usloviyah [Elektronnyj resurs]: Vved. 2015-12-01. – M.: Mezhgosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii: Standartinform, 2015.*
4. *Rekomendacii po proektirovaniyu zemlyanogo polotna dorog v slozhnyh inzhenerno-geologicheskih usloviyah [Tekst]. – M: CNIIS Mintransstroya, SoyuzdorNII, 1974. – 257 s.*
5. *SP 116.13330.2012. Inzhenernaya zashchita territorij, zdanij i sooruzhenij ot opasnyh geologicheskih processov. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 22-02-2003 [Elektronnyj resurs]: Vved. 2013-01-01. – M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii: Minstroj Rossii, 2016. Dostup iz spravochnoj sistemy «Tekhekspert».*
6. *SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdanij i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.01-83* (s Izmeneniyami N 1, 2, 3) [Elektronnyj resurs]: Vved. 2017-07-01. – M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii: Minstroj Rossii, 2016.*
7. *TSN 22-308-98 NN Inzhenernye izyskaniya, proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluataciya zdanij i sooruzhenij na zakarstovannyh territoriyah Nizhegorodskoj oblasti [Tekst]: Vved. 1999-09-01. – Nizhnij Novgorod: Administraciya, 1999. – 72 s.*
8. *Rekomendacii po provedeniyu inzhenernyh izyskanij, proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatacii zdanij i sooruzhenij na zakarstovannyh territoriyah Nizhegorodskoj oblasti [Tekst]. – Nizhnij Novgorod: Departament gradostroitel'nogo razvitiya territorii Nizhegorodskoj oblasti, 2012. – 139 s.*
9. *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO [Text]: Deutsche Gesellschaft für Geotechnike. V // German Geotechnical Society (Editor), Alan Johnson (Translator). – Munich, 2010 – 313 p.*
10. *Homenko V.P. Karstovoe provaloobrazovanie: mekhanizm i ocenka opasnosti [Tekst] / V.P. Homenko // Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'stva v karstovyh rajonah: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma / Pod red. V. N. Kataeva, D.R. Zolotareva, S.V. Shcherbakova, A.V. Shilovoj; Perm. gos. nac. issled. un-t. Perm', 2015. – S. 50-60.*
11. *Krasheninnikov V.S. Pokrytyj karst: neobhodimye usloviya, prichiny i priznaki podgotovki provaloobrazovaniya [Tekst] / V.S. Krasheninnikov, V.P. Homenko // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 11. – S. 6-8.*
12. *Krasheninnikov V.S. Lokal'naya ocenka karstovoj opasnosti s uchetom osobennostej stroeniya pokryvayushchej tolshchi: special'nost': 25.00.08*

*«Inzhenernaya geologiya, merzlotovedenie i gruntovedenie»: dis. ... kandidata geologo-mineralogicheskih nauk / Krasheninnikov Vadim Sergeevich [Mesto zashchity: FGBOU VO Rossijskij gosudarstvennyj geologorazvedochnyj universitet imeni Sergo Ordzhonikidze]. – M., 2017. – 136 s.*

13. *Provaly i voronki osedaniya v karstovyh rajonah: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i ocenka riska [Tekst]: monografiya / A.V. Anikeev. – M.: RUDN, 2017. – 328 s.*

## *MODERN PROBLEMS OF PROVIDING THE MECHANICAL SAFETY OF SUBGRADE WHEN DESIGNING ROADS IN KARST AREAS*

*Post-graduate student **V.V. Samosvat***
*(Novgorod branch*
*AO «Institute Stroyproekt»)*
*Contact information: samosvat.victor@gmail.com*

*The article dwells upon the problems of regulatory and methodological support for road subgrade design in karst territories, as well as the difficulties concerning the anti-karst measures assignment. The potential of monitoring works to increase the effectiveness of anti-karst protection and to provide the safety of road structures under condition of traditional organization of observations is analyzed.*

***Key words**: karst, suffusion, anti-karst protection, monitoring, surface subsidence, mechanical safety.*

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 27.07.2020 г.