

УДК 624.131.537

Проектирование на закарстованных территориях

Ковалев В.А., Патрикеев А.Б., Пастухова И.А.

НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство».
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В действующей нормативной документации в области изысканий и проектирования на закарстованных территориях в недостаточной мере регламентирован и конкретизирован подход к прогнозу карстово-суффозионного процесса и принятию проектных решений в условиях возможности образования карстовых провалов.

Цель: Уточнение и дополнение требований к оценке и прогнозу карстово-суффозионной опасности для формулирования общего последовательного подхода к проектированию на закарстованных территориях.

Материалы и методы. Систематический анализ проектно-изыскательских работ при научно-техническом сопровождении различных объектов строительства (гражданских, промышленных, линейных).

Результаты. Сформулирован общий подход к карстологическому прогнозу, анализу и проектированию в условиях карстоопасности. Ключевые дополнения и уточнения внесены в СП 22.13330.2016, обновленные указания в развернутом виде приведены в СП 499.1325800.2021.

Выводы. Нормативные документы регламентируют основные положения инженерно-геологических изысканий и проектирования на закарстованных территориях. Важно систематически актуализировать и оптимизировать требования нормативных документов, опираясь на новые данные исследований, технические разработки и потребности строительной отрасли. Для повышения точности и эффективности разрабатываемых проектных решений на закарстованных территориях ведется работа по внесению дополнений и уточнений в нормативную документацию.

Ключевые слова: карст, категории опасности, расчет, диаметр, рекомендации, строительные нормы

Для цитирования: Ковалев В.А., Патрикеев А.Б., Пастухова И.А. Проектирование на закарстованных территориях // НИИОСП. Вчера, сегодня, завтра: Труды VII Петрухинских чтений / Под ред. канд. техн. наук И.В. Колыбина и д-ра техн. наук О.А. Шулятьева. – М.: Изд-во АО «НИЦ «Строительство». – 2023. – С. XX–XX.

DESIGN IN THE KARST TERRITORIES

Kovalev V.A., Patrikeev A.B., Pastuhova I.A.

NIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction.

Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. The current regulatory documentation in the field of surveys and design in the karst territories insufficiently regulates and specifies the approach to the forecast of the karst-suffusion process and the adoption of design decisions in conditions of the possibility of the formation of karst failures.

Aim. Clarification and addition of requirements for the assessment and forecast of karst-suffusion hazard for the formulation of a general consistent approach to design in karst areas.

Materials and methods. Systematic analysis of design and survey work with scientific and technical support of various construction projects (civil, industrial, linear).

Results. A general approach to astrological forecasting, analysis and design in conditions of karst hazard is formulated. Key additions and clarifications were made to the SP 22.13330.2016, updated instructions in expanded form are given in the SP 499.1325800.2021.

Conclusion. Regulatory documents regulate the main provisions of engineering and geological surveys and design in the karst territories. It is important to systematically update and optimize the requirements of regulatory documents, based on new research data, technical developments and the needs of the construction industry. In order to improve the accuracy and efficiency of the developed design solutions, work is underway on making additions and clarifications to the regulatory documentation in the karst territories.

Keywords: karst, hazard categories, calculation, diameter, recommendations, building code

For citation: Kovalev V.A., Patrikeev A.B., Pastuhova I.A. Design in the karst territories. In the collection: Proceedings of the VII Petrukhin's readings "NIOSP. Yesterday, today, tomorrow". Moscow: Publishing house of JSC Research Center of Construction, 2023. – Pp. XX–XX (In Russian).

Развитие современных технологий и методов изысканий существенно расширило и углубило представления о карстово-суффозионном процессе и влияющих на него факторах.

Использование снимков поверхности земли (спутниковая съемка, аэрофотосъемка, лазерное сканирование), расширенных геофизических исследований, построение 3D моделей грунтового основания, гидрохимические исследования карстующихся пород и т. п. становятся все более доступными и позволяют получить объемное представление об опасном карстово-суффозионном процессе.

Постоянное расширение научной базы и степени изученности закарстованных областей затрагивает все больше различных аспектов прогноза карстоопасности и степени их влияния на карстово-суффозионный процесс.

При этом нормативные документы, регулирующие порядок инженерно-геологических изысканий и проектирования на закарстованных территориях, на конец 2010 годов в недостаточной мере регламентировали порядок выполнения изысканий и проектирования на закарстованных участках, для того чтобы специалистами прикладных сфер максимально четко и объективно решалась задача принятия проектных решений в конкретных условиях, осложненных карстово-суффозионным процессом.

Для решения данной задачи сотрудниками НИИОСП им. Н.М. Герсевича сформирован общий подход при инженерно-геологических изысканиях и проектировании для оценки и расчета параметров карстово-суффозионного процесса, направленный на эффективное использование требований нормативной документации, в первую очередь со стороны безопасности и реализуемости проектных решений, и отраженный в СП 22.13330.2016.

Под карстово-суффозионной опасностью подразумевается результат комплексного геологического процесса.

Карст представляет собой совокупность геологических процессов и явлений, вызванных растворением подземными и поверхностными водами горных пород с образованием в них пустот, нарушением структуры и изменением свойств [3, 5].

К районам развития карста относятся районы, где распространены водорастворимые горные породы (известняки, доломиты, мел, гипсы и т. п.) [1, 3].

Карстовые деформации – процесс, который сопровождается растворением горных пород, суффозией и деформациями толщи, покрывающей закарстованные породы, с формированием поверхностных форм проявления карста (на поверхности земли или в уровне заложения фундаментов) [3, 5].

Карстовые деформации можно разделить на основные виды: провалы, оседания и растворение горных пород на поверхности [5, 6, 11] (рис. 1).

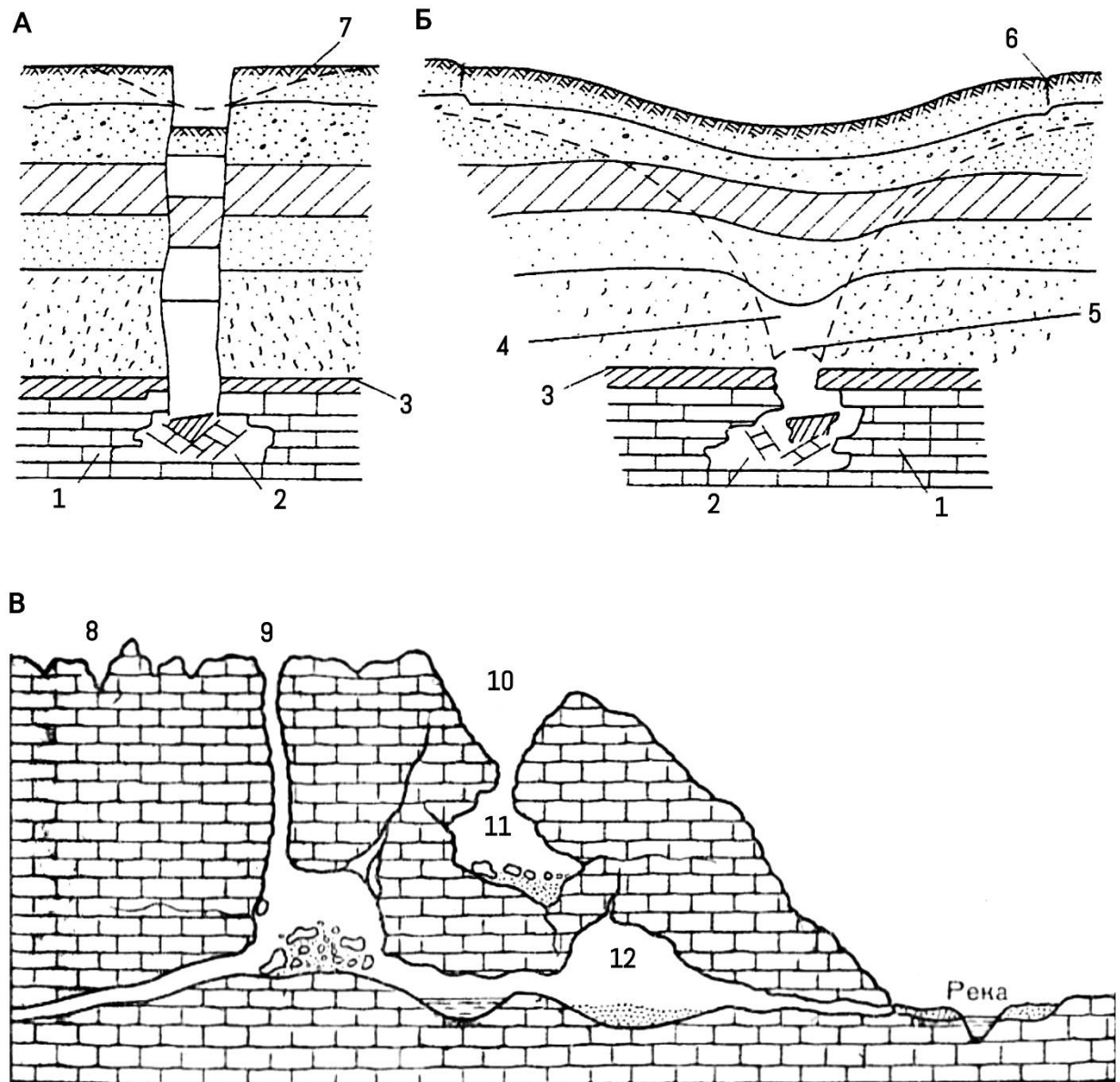


Рисунок 1 – Виды карстово-суффозионных деформаций:

A – провал; *Б* – оседание; *B* – растворение горных пород на поверхности;

1 – горная порода; *2* – карстовая полость; *3* – водоупор; *4* – зона деформаций толщи, покрывающей закарстованные породы; *5* – образованный свод; *6* – трещины в грунте; *7* – вторичная форма поверхности после провала; *8* – карры; *9* – поноры; *10, 11* – провал; *12* – пещера и подземная река

Figure 1 – Types of karst-suffusion deformations:

A – sinkhole; *B* – subsidence; *B* – dissolution of rocks on the surface;

1 – rock; *2* – karst cavity; *3* – water resistance; *4* – deformation zone of the soils covering the karst rocks; *5* – formed arch; *6* – cracks in the ground; *7* – secondary shape of the surface after the failure; *8* – karry; *9* – ponory; *10, 11* – failure; *12* – cave and an underground river

Карстовые деформации, достигающие поверхности рельефа, приводят к образованию таких поверхностных форм, как:

- воронки – замкнутые впадины, вызванные провалом (рис. 2, 3, 4, 5);
- мульды оседания – понижения, вызванные оседанием (рис. 6);
- поноры – трещины, поглощающие воду (рис. 7);
- карры – формы поверхностного растворения горных пород (рис. 8).



Рисунок 2 – Карстовый провал, Нижний Новгород (произошел в 2007 г. под разворотным кольцом железнодорожных путей, диаметр 18 м, глубина 4,5 м)

Figure 2 – Karst sinkhole in Nizhny Novgorod (occurred in 2007 under the U-turn ring of railway tracks, diameter 18 m, depth 4.5 m)



Рисунок 3 – Карстовый провал в г. Туле (произошел в 2005 г. под производственным зданием)

Figure 3 – Karst sinkhole in Tula (occurred in 2005 under a production building)



Рисунок 4 – Карстовый провал в Нижегородской области

Figure 4 – Karst sinkhole in the Nizhny Novgorod region



Рисунок 5 – Карстово-суффозионный провал в г. Владимире
Figure 5 – Karst-suffusion sinkhole in Vladimir



Рисунок 6 – Карстовое оседание, Китай
Figure 6 – Karst Subsidence, China



Рисунок 7 – Поноры, Моравия (Чехия)
Figure 7 – Ponory, Moravia (Czech Republic)



Рисунок 8 – Карры, Северный Кавказ
Figure 8 – Karry, North Caucasus

Нормативная документация, которая в обязательном порядке регламентировала порядок проведения изысканий и проектирования на закарстованных территориях, на конец 2010 годов включала в себя обобщенные, приведенные в сокращенном виде требования, что затрудняло прогноз опасности и процесс проектирования. Основными документами для применения являлись:

– СП 47.13330.2012 «СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения»;

– СП 116.13330.2012 «СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов»;

– СП 22.13330.2011 «СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений».

Например, в СП 47.13330.2012 приведены определенные требования и задачи изысканий на закарстованных территориях:

– районирование территории строительства по степени опасности воздействия карста на проектируемые сооружения с учетом сроков его эксплуатации;

– составление прогноза развития карста и определение возможности активизации карста на период строительства и эксплуатации сооружений;

– определение расчетного параметра карстовых деформаций (диаметр провала) с учетом особенностей конкретного сооружения и изменения напряженного деформируемого состояния основания;

– разработка рекомендаций для инженерной защиты территории и для подготовки проектной документации.

Указанные задачи приведены в обобщенном виде и не дают четких указаний для выполнения последовательного прогноза в конкретных условиях и для определенных типов сооружений.

В СП 116.13330.2012 включена классификация по диаметрам и интенсивности провалообразования (таблица 1, 2), достаточно четко устанавливающая качественные и количественные критерии карстоопасности, но также недостаточная для принятия обоснованных проектных решений в части обеспечения безопасности и конструктивной надежности объектов на закарстованных территориях.

Таблица 1 – Устойчивость территории по интенсивности провалообразования
 Table 1 – Stability of the territory in terms of the intensity of sinkhole formation

Категория устойчивости территории	Интенсивность провалообразования (среднегодовое количество провалов на 1 км² территории)
I (очень неустойчивая)	свыше 1,0
II (неустойчивая)	свыше 0,1 до 1,0
III (недостаточно устойчивая)	свыше 0,05 до 0,1
IV (пониженной устойчивости)	свыше 0,01 до 0,05
V (относительно устойчивая)	до 0,01
VI (устойчивая)	провалообразование исключается

Таблица 2 – Устойчивость территории по средним диаметрам карстовых провалов
 Table 2 – Stability of the territory by the average diameters of karst sinkholes

Категория устойчивости территории	Средние диаметры карстовых провалов и локальных оседаний (м)
А	свыше 20
Б	свыше 10 до 20
В	свыше 3 до 10
Г	до 3

В СП 22.13330.2011 приведен раздел с основными принципами проектирования на закарстованных территориях, но также в сокращенном виде. Содержание раздела в целом можно свести к основным требованиям:

1. Основным расчетным параметром при проектировании противокарстовых мероприятий является расчетный диаметр карстового провала.
2. Расчетный диаметр карстового провала должен определяться расчетом.
3. Расчет провала следует осуществлять с учетом:
 - физико-механических свойств грунтов основания и их напластования;
 - конструктивных особенностей сооружения и характера нагрузок, передаваемых на основание;
 - режима подземных вод.

В связи с вышеперечисленными обобщенными требованиями у инженеров и проектировщиков сформировался ряд вопросов к существующим на тот момент нормам, отражающим очевидные недостатки рекомендаций нормативной документации (табл. 3).

Таблица 3 – Недостатки нормативных документов
 Table 3 – Disadvantages of regulatory documents

Документ	Вопросы и комментарии изыскателей и проектировщиков
СП 47.13330.2012	Не указаны требования и порядок районирования
СП 116.13330.2012	Отсутствуют указания к расчету интенсивности провалообразования, особенно для регионов, где не ведется статистика и наблюдения за карстовым процессом
	Не зафиксирован радиус обследования или его критерии, в котором определяется количество провалов
	Отсутствуют указания по принятию качественных показателей карстовых деформаций на территориях, где не зафиксированы поверхностные проявления. Нет требований к расчету среднего диаметра карстовой деформации в зависимости от ее вида – провала или оседания

СП 22.13330.2011	Нет установленной методики расчета или требований к методам расчета. Отсутствует сопоставимый геотехнический опыт для большинства регионов
	Не указаны методы оценки и расчетов для регионов с низкой степенью опасности
	Возможности применения вероятностных методик, основанных на зависимостях и опыте, в различных условиях

Это только ряд первоочередных вопросов, которые обуславливают ошибки в прогнозе карстовой опасности и могут приводить к необоснованным проектным решениям, напрямую влияющим на безопасность или на экономическую целесообразность.

Таким образом, отсутствие четких указаний в нормах РФ по методам районирования территорий и определения расчетных параметров карстовых деформаций диктовали необходимость создания новой системы комплексного и последовательного подхода для обеспечения надежности и экономичности.

В ходе научно-технического сопровождения различных объектов строительства (гражданских, промышленных, линейных), анализа материалов геологических изысканий и рассмотрения проблемных вопросов, возникающих при проектировании на закарстованных территориях, проводилась подготовка и обобщение результатов исследований для создания и включения в СП 22.13330.2016 общего подхода к карстологическому прогнозу, анализу и проектированию.

Одной из главных задач при подготовке СП 22.13330.2016 являлась разработка требований и указаний для обеспечения прочности и устойчивости зданий и сооружений с учетом образования карстовых деформаций непосредственно под фундаментами и на прилегающей территории, ограниченной расстоянием, за пределами которого негативное влияние на сооружение исключено.

Проектирование на закарстованной территории можно свести к следующей последовательности действий:

1. Установить категорию опасности участка строительства в карстово-суффозионном отношении на основании инженерно-геологических изысканий.
2. Определить необходимость проведения противокарстовых мероприятий.
3. Определить расчетные параметры карстовых деформаций.
4. Запроектировать противокарстовые мероприятия с учетом установленных расчетом параметров карстовых деформаций.

Далее рассмотрим более подробно ключевые моменты и дополнения предложенных этапов проектирования на закарстованных территориях.

Дополнения к проведению инженерно-геологических изысканий и определению категорий

Для исключения ошибок в прогнозе и установления соответствующих категорий карстовой опасности СП 22.13330.2016 дополнен существенными требованиями к содержанию инженерных изысканий:

- данные о поверхностных проявлениях карстовых деформаций (воронки, оседания земной поверхности, карры, поноры и т. п.) с указанием их геометрических параметров;
- данные о подземных проявлениях карстовых процессов (полостях, кавернах, наличия в них заполнителя и его материала), в том числе сведения о зафиксированных в ходе бурения провалах бурового инструмента в водорастворимых горных породах;
- количественная оценка скорости растворения водорастворимых горных пород;
- результаты геофизических исследований;
- данные о гидрогеологической обстановке (агрессивность подземных вод, температура, гидравлические градиенты, напоры и скорости потоков подземных вод).

Для классификации участков по категориям составлена таблица, разделяющая на неопасные, потенциально-опасные и опасные участки в зависимости от основных определяющих признаков (табл. 4).

Таблица 4 –Признаки карстовой опасности

Table 4 – Signs of karst danger

Признаки	Неопасные	Потенциально опасные	Опасные
Поверхностные проявления карстовых деформаций	отсутствуют	отсутствуют	присутствуют
Подземные проявления карстовых процессов	отсутствуют	средней интенсивности	высокой интенсивности
Водоупор, перекрывающий горные породы, при толщине, h_w , м	$h_w > 10$	$10 \geq h_w \geq 3$	$h_w < 3$
Градиент вертикальной фильтрации, i	$i < 1$	$1 < i < 3$	$i > 3$

При этом к показателям-признакам сформированы основные ограничения, позволяющие оценивать конкретные условия.

Поверхностные проявления выявляются в ходе изысканий в пределах площадки строительства и прилегающей территории. Радиус зоны исследования прилегающей территории ограничивается в зависимости от изученности территории.

Подземными проявлениями карстовых процессов считаются провалы бурового инструмента и древние карстовые формы с заполнителем, обнаруженные в ходе бурения водорастворимых горных пород. При этом средняя интенсивность подземных проявлений должна оцениваться по наличию полостей и зон дробления в зависимости от их количества и мощности.

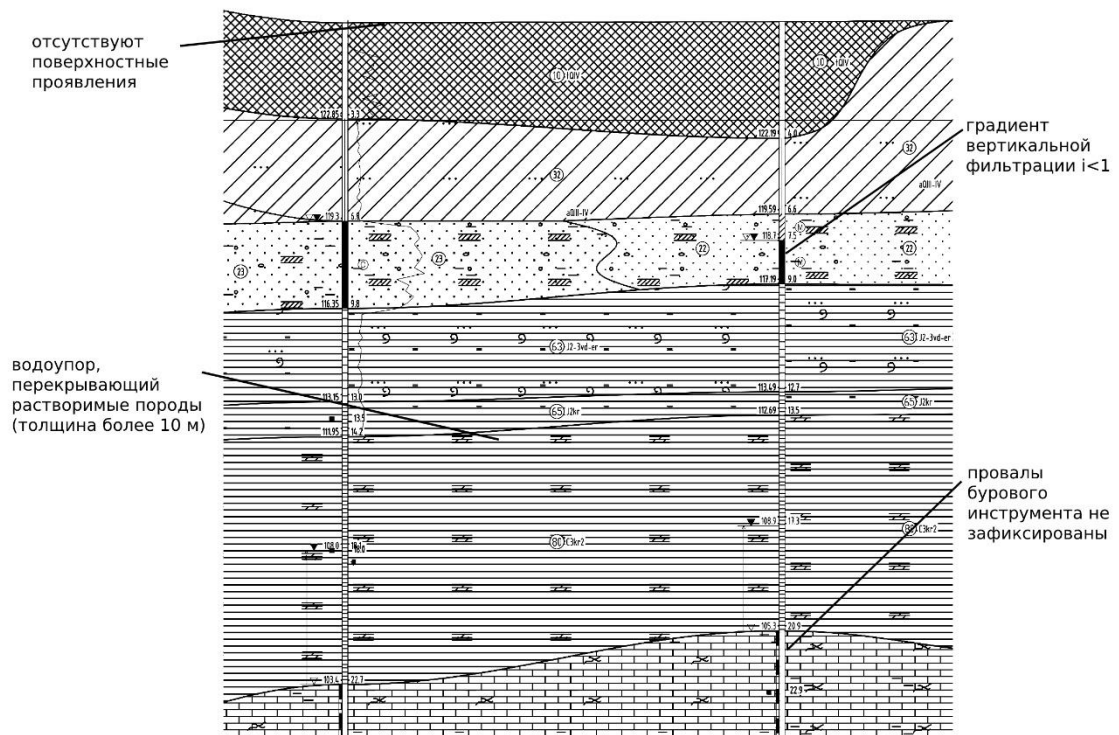


Рисунок 9 – Пример геологического строения неопасного в карстово-суффuzionном отношении участка

Figure 9 – An example of the geological structure of a site that is not dangerous in karst-suffusion relation

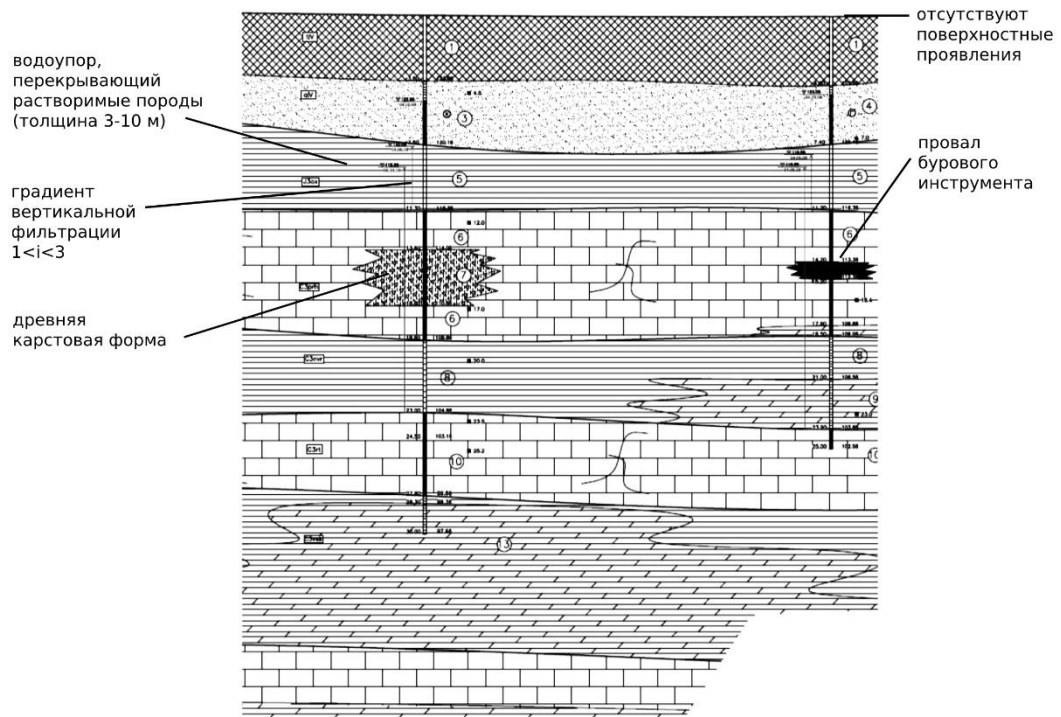


Рисунок 10 – Пример геологического строения потенциально опасного в карстово-суффозионном отношении участка

Figure 10 – An example of the geological structure of a potentially dangerous karst-suffusion site

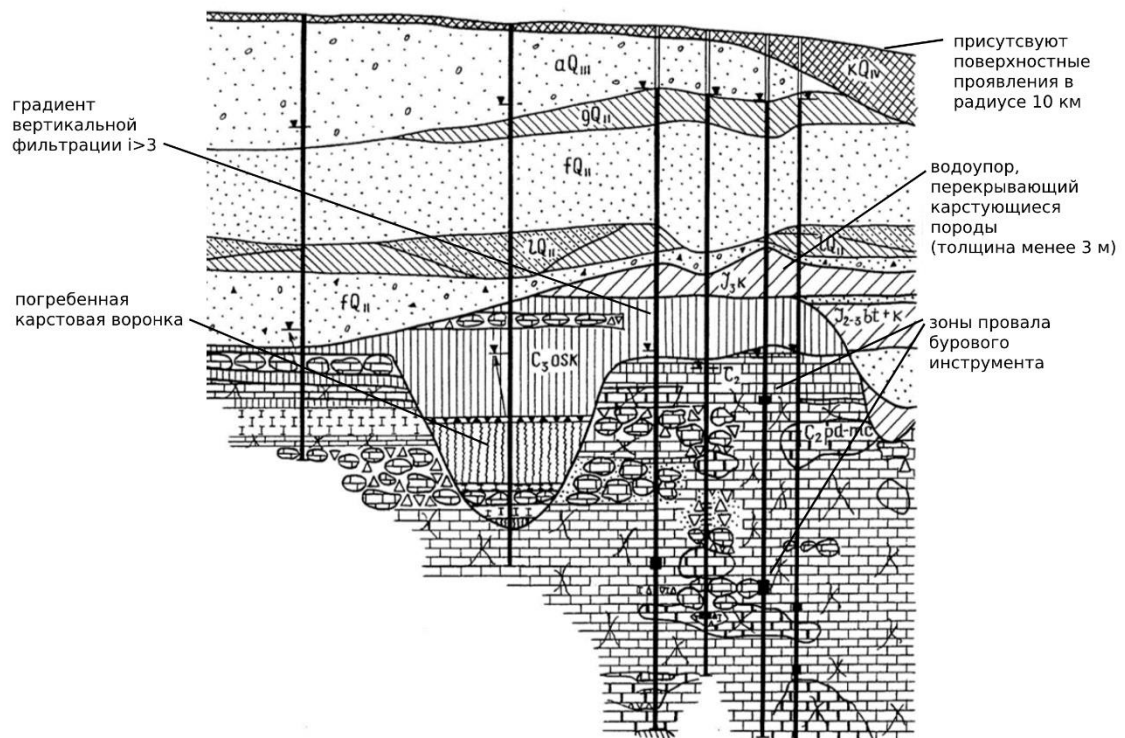


Рисунок 11 – Пример геологического строения опасного в карстово-суффозионном отношении участка

Figure 11 – An example of the geological structure of a dangerous karst-suffusion site

Необходимость противокарстовых мероприятий

Исходя из категории карстово-суффозионной опасности, определяется необходимость выполнения противокарстовых мероприятий и их объем.

На неопасных территориях полностью исключается необходимость применения противокарстовых мероприятий.

Потенциально-опасная и опасная категории требуют определения расчетных параметров карстовых деформаций и только после этого – назначения противокарстовых мероприятий.

Противокарстовые мероприятия включают следующие основные типы:

- специальные (конструктивные и геотехнические мероприятия);
- водозащитные (предотвращение активизации процессов образования карста);
- технологические (надёжность инженерных сетей и оборудования);
- эксплуатационные (геотехнический мониторинг).

Определение расчетных параметров

Определение расчетных параметров карстовых деформаций является процессом, требующим детального подхода и учета многих факторов.

Главная задача расчета – определить геометрические параметры карстовой полости в водорастворимой горной породе, при образовании которой возникают карстовые деформации. Полученные при этом параметры карстовых деформаций – главные исходные данные для разработки противокарстовых мероприятий.

При этом в расчетах должно быть учтено:

- размер и положение карстовой полости определяется для наиболее неблагоприятного участка на геологическом разрезе и скорейшего наступления провалообразования;
- тип и расчетные параметры карстовых деформаций определяются с учетом основных параметров сооружения (глубины котлована, типа сооружения и фундаментов, нагрузок и т. п.).

В настоящее время для расчета параметров карстовых деформаций применяется ряд методик, позволяющих оценить размеры поверхностных и подземных карстовых форм. Каждая

методика обладает рядом недостатков и особенностями применения, при этом основным критерием в выборе методики должен являться механизм провалообразования, характерный для конкретных рассматриваемых условий.

При подготовке СП 499.1325800.2021 для общего понимания критериев и возможностей выбора типа расчета приведены следующие основные методы:

1. Аналитические решения:

- Бирбаумер (1913 г.) – схема смещения «столба» грунта – среза по цилиндрической поверхности над карстовой полостью [13, 14];
- Протодяконов (1933 г.) – свод обрушения [11, 13];
- Кутепов (1986 г.) – оценка устойчивости цилиндра покрывающей толщи [12];
- Шахунянец (1953 г.) – сдвигание монолитного грунтового столба в полость [14, 15].

Аналитические методы получили наибольшее развитие ввиду их изначальной адаптации к решению конкретной задачи по определению диаметра карстового провала. Однако следует учитывать, что большинство аналитических решений схематизированные и могут быть применены только при определенном геологическом строении. Также каждое аналитическое решение подходит только для определенных механизмов провалообразования, в противном случае могут быть получены значительно завышенные или заниженные значения диаметров. При этом определение диаметра провала, с учетом проектных решений и нагрузок, большинством формул не может быть учтено.

2. Численные (реализуемые такими программными комплексами, как Plaxis, Midas и др.)

На основе решений методом конечных элементов стало возможным напрямую оценить изменение напряженного-деформированного состояния покрывающей толщи при образовании карстовой полости [4, 16]. Численное моделирование позволяет учитывать сложное геологическое строение и гидрогеологические условия, наличие проектируемых сооружений и нагрузок. В результате расчетов можно оценивать не только итоговые значения карстовых провалов, но и стадийность возникновения карстовых деформаций или их типы (оседания, вывалы и т. д.).

Следует отметить, что вероятностно-статистические методики на настоящий момент исключены для применения ввиду отсутствия регламентированных требований по сфере, способу и условиям применения. Надежность прогноза вероятностно-статистическими методами строго ограничена количеством и качеством репрезентативной выборки параметров [17, 18], что на данный момент невыполнимо в большинстве регионов страны.

Существенным дополнением СП 22.13330.2016 является учет срока эксплуатации зданий при определении необходимости специальных противокарстовых мероприятий на

карстоопасных участках. В расчетах следует дополнительно учитывать расчетный период эксплуатации сооружения и скорость растворения горной породы за этот период.

Если с учетом скорости растворения горной породы в расчетный период эксплуатации развитие карстовой полости не приводит к карстовым деформациям, то специальные противокарстовые мероприятия не проводятся. В противном случае, если с учетом скорости растворения горной породы в расчетный период эксплуатации развитие карстовой полости вызывает карстовые деформации, влияющие на основание здания, то подтверждается необходимость проведения специальных противокарстовых мероприятий, назначаются расчетные параметры для дальнейшей разработки проектных решений.

На настоящий момент нормами не регламентирован четкий подход к лабораторному определению скорости растворения карстующихся пород. Следует отметить, что такое исследование требует индивидуального подхода и научного обоснования для каждого типа породы и растворителя.

Для решения данной проблемы, на базе литературных источников и исследований прошлых лет, разработана таблица, содержащая ориентировочные показатели степени растворимости и соответствующей скорости растворения в зависимости от химического состава пород, включенная в качестве справочной информации в СП 22.13330.2016.

Породы классифицируются по растворимости от нерастворимых до сильно растворимых (табл. 5).

Таблица 5 – Характеристики скорости растворения горных пород
 Table 5 – Characteristics of the dissolution rate of rocks

Разновидность скальных грунтов по растворимости	Преобладающий минерал	Степень растворимости, q_{sr} , г/л	Скорость растворения
Нерастворимый	CaCO ₃ MgCO ₃	$q_{sr} \leq 0,01$	0,01–0,1 см/год
Труднорастворимый		$0,01 < q_{sr} \leq 1$	0,1–1,0 см/год
Среднерастворимый	CaSO ₄	$1 < q_{sr} \leq 10$	1,0–10 см/год
Легкорастворимый	NaCl KCl	$10 < q_{sr} \leq 100$	10–100 см/год
Сильно растворимый		$q_{sr} > 100$	➤ 100 см/год

Основные требования к разработке противокарстовых мероприятий

Главным критерием является обеспечение прочности и устойчивости сооружения при расчете по предельным состояниям первой группы на особое сочетание нагрузок с учетом расчетных параметров карстовых деформаций.

Выбор способа устройства противокарстовых мероприятий определяется проектировщиком в зависимости от геологических условий, конструкции сооружения, расчетных параметров карстовых деформаций и т. п.

Рекомендуется применять конструктивные противокарстовые мероприятия для нового строительства, геотехнические – для реконструкции.

При разработке проекта противокарстовых мероприятий следует учитывать размещение в плане карстовых деформаций (с учетом их типа и расчетных параметров) на наиболее неблагоприятных участках основания сооружения с точки зрения обеспечения надежной работы сооружения (под колоннами, пересечением стен, по углам сооружения и т. п.).

Также важно исключить возможность негативного влияния на окружающую застройку при применении тех или иных противокарстовых мероприятий, что особенно актуально при плотной городской застройке в исторических районах мегаполисов.

Выводы

Для повышения точности и эффективности разрабатываемых проектных решений при разработке и уточнении существующих нормативных документов СП 22.13330.2016 и СП 499.1325800.2021, регламентирующих проектирование на карстоопасных территориях, включены основные положения подхода для прогноза и оценки степени карстоопасности и определения расчетных параметров карстовых деформаций.

В настоящий момент ряд разделов дорабатывается и уточняется по мере установления и расширения научной базы. Однако уже на данном этапе применение предложенного подхода позволяет принимать обоснованные решения при изысканиях и проектировании на закарстованных территориях.

Список литературы

1. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Москва: Стандартинформ. 2017.
2. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. Москва: Стандартинформ. 2017.
3. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. Москва: Минрегион России. 2012.
4. СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ. 2021.

5. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Москва: Госстрой России, ГУП ЦПП. 2004.
6. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. Москва: ПНИИС. 1995. 167 с.
7. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. Москва: НИИОСП. 1985. 78 с.
8. *Зверев В.П., Костикова И.А.* Об интенсивности развития карбонатного карста // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2017. № 5. С. 13–18.
9. *Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л.* Карстово-суффuzionные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности // *Инженерная геология*. 2018. № 6. Т. 13. С. 24–35.
10. *Ковалев В. А., Патрикеев А. Б.* О расчете параметров карстового провала. *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 10. С. 36–41.
11. *Толмачев В.В, Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. Москва: Стройиздат. 1986. 176 с.
12. *Кутепов В.М.* Оценка устойчивости закарстованных территорий. Москва: ЦП НТГО. 1986. 68 с.
13. *Аникиев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // *Геоэкология*. 2006. № 6. С. 544–553.
14. *Аникиев А.В.* Об использовании модели Бирбаумера в инженерном карстоведении. Сергеевские чтения. Моделирование при решении геоэкологических задач. Выпуск 11. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2009 г.). Москва: ГЕОС. 2009. С. 257–259.
15. *Шахуняц Г.М.* Земляное полотно железных дорог. Москва: Трансжелдориздат. 1953. 828 с.
16. Plaxis. Руководство пользователя. Версия 9. Перевод на русский язык. Санкт-Петербург: НИП-Информатика. 2008. 228 с.
17. *Щербаков С.В., Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ковалева Т.Г.* Поверхностные деформации в условиях покрытого карста: комплексирование методов оценки морфометрических параметров в инженерных целях // *Инженерная геология*. 2018. Том XIII. № 6. С. 38–50.

References

1. SP 22.13330.2016 Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83*. Moscow: Standartinform Publ. 2017 (in Russian).
2. SP 47.13330.2016 Engineering survey for construction. Basic principles. Updated version of SNiP 11-02-96. Moscow: Standartinform Publ. 2017 (in Russian).
3. SP 116.13330.2012 Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic principles. Updated version SNiP 22-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia. 2012 (in Russian).
4. SP 499.1325800.2021 Engineering protection of territories, buildings and structures from karst-suffusion processes. Design rules. Moscow: Standartinform Publ. 2021 (in Russian).

5. SP 11-105-97 Engineering geological site investigations for construction. Moscow: Gosstroy Rossii, GUP TsPP. 2004 (in Russian).
6. *Savarenskiy I.A., Mironov N.A.* Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v rayonakh razvitiya karsta. Moscow: PNIIS. 1995. 167 p. (in Russian).
7. Rekomendatsii po proektirovaniyu fundamentov na zakarstovannykh territoriyakh. Moscow: NIIOSP. 1985. 78 p. (in Russian).
8. *Zverev V.P., Kostikova I.A.* About the intensity of carbonate karst development. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* 2017, no. 5, pp. 13–18 (in Russian).
9. *Kochev A.D., Chertkov L.G., Zayonts I.L.* Karst-suffosion processes in the territory of Moscow and the problem of their hazard assessment. *Engineering geology world.* 2018, no. 6, vol. 13, pp. 24–35 (in Russian).
10. *Kovalev V.A., Patrikeev A.B.* About calculation of parameters of a sinkhole. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering.* 2016, no. 10, pp. 36–41 (in Russian).
11. *Tolmachev V.V., Troitskiy G.M., Khomenko V.P.* Inzhenerno-stroitel'noe osvoenie zakarstovannykh territoriy. Moscow: Stroizdat Publ. 1986. 176 p. (in Russian).
12. *Kutepov V.M.* Otsenka ustoychivosti zakarstovannykh territoriy. Moscow: TsP NTGO. 1986. 68 p. (in Russian).
13. *Anikeev A.V.* Suffosion. Mechanism and kinematics of free suffosion. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* 2006, no. 6, pp. 544–553 (in Russian).
14. *Anikeev A.V.* Ob ispol'zovanii modeli Birbaumera v inzhenernom karstovedenii. Sergeevskie chteniya. Modelirovanie pri reshenii geoekologicheskikh zadach. Vypusk 11. Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii (23–24 marta 2009 g.). Moscow: GEOS Publ. 2009, pp. 257–262 (in Russian).
15. *Shakhunyants G.M.* Zemlyanoe polotno zheleznykh dorog. Moscow: Transzheldorizdat. 1953, 828 p. (in Russian).
16. Plaxis. Rukovodstvo pol'zovatelya. Versiya 9. Perevod na russkiy yazyk. Saint Petersburg: NIP-Informatika. 2008. 228 p. (in Russian).
17. *Shcherbakov S.V., Kataev V.N., Zolotarev D.R., Kovaleva T.G.* Covered karst landforms: complexification of methods to estimation of morphometric parameters in engineering purposes. *Engineering geology.* 2018, vol. XIII, no. 6, pp. 38–50 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Ковалев, канд. техн. наук, заведующий лабораторией естественных оснований и конструкций НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

e-mail: vladimir@olmproekt.ru

Vladimir A. Kovalev, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of The Natural Foundations and Constructions, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

e-mail: vladimir@olmproekt.ru

Антон Борисович Патрикеев*, инженер лаборатории естественных оснований и конструкций НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

e-mail: patrikeev@olimproekt.ru

Anton B. Patrikeev, Engineer of the Laboratory of The Natural Foundations and Constructions, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation
e-mail: patrikeev@olimproekt.ru

Ирина Александровна Пастухова, инженер лаборатории естественных оснований и конструкций» НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация
e-mail: pastuhova@olimproekt.ru

Irina A. Pastuhova, Engineer of the Laboratory of The Natural Foundations and Constructions, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation
e-mail: pastuhova@olimproekt.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Статья опубликована: Труды VII Петрухинских чтений. НИИОСП. Вчера, сегодня, завтра. М., 2023 г.