

УДК 624.131.1

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В КАРСТВЕДЕНИИ

Катаев В. Н., Ерофеев Е. А.

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Геологический факультет, Пермь, Россия (614990, Пермь, ул. Букирева, 15),

e-mail: erofeev-ea@yandex.ru

В настоящей работе представлен краткий историко-аналитический обзор использования математических методов в комплексе наук геологического цикла. В общих чертах приводится характеристика основных этапов математизации геологии и важнейших направлений практического использования математических методов. Дается историческая характеристика внедрения вероятностно-статистических методов в комплекс геологических наук, направленных на изучение тенденций развития карста, закономерностей образования современных (а также древних) карстовых явлений в связи с их практическим изучением при инженерно-строительном освоении закарстованных территорий – карстоведении, инженерном карстоведении и инженерной геологии. Рассматриваются основные течения в научно-практическом применении математических методов, сформировавшихся в карстоведении и инженерном карстоведении в 60–70 гг. Выполненный обзор теоретического и практического применения вероятностно-статистических методов в карстоведении позволяет оценить основные направления развития и эффективность применяемых математических методов для оценки карстовой опасности при строительном освоении закарстованных территорий.

Ключевые слова: математические методы, теория вероятностей, математическая статистика, геология, карстоведение, оценка карстовой опасности.

HISTORICAL OVERVIEW OF THE THEORETICAL AND PRACTICAL EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF PROBABILISTIC AND STATISTICAL METHODS IN KARSTOLOGY

Kataev V. N., Erofeev E. A.

Perm State University

Geological Department, Perm, Russia (614990, Perm, ul. Bukireva, 15)

e-mail: erofeev-ea@yandex.ru

In the work the brief history of use of mathematical methods in a complex of sciences of a geological cycle is presented. In general to be resulted the characteristic of the basic stages of mathematization of geology and the major directions of practical use of mathematical methods. The historical characteristic introduction of probabilistic and statistical methods in a complex of the geological sciences directed on studying of karst development tendencies, laws of formation modern (and also ancient) of karst phenomena, in connection with their practical studying is given at engineering-building development karst territories. The basic currents in scientifically-practical application of the mathematical methods which have generated in common karstology and engineering karstology at 60–70 years of last century are considered the review of theoretical and practical application of probabilistic and statistical methods in karstology allows to estimate the basic directions of development and efficiency of applied mathematical methods for an estimation of karst danger at building development on karst territories.

Key words: mathematical methods, probability theory, mathematical statistics, geology, karst, karst hazard assessment.

Введение

Цель настоящей работы заключается в историческом обзоре использования математических методов в науках геологического цикла, а также непосредственно в анализе современного

теоретического и практического опыта применения вероятностно-статистических методов в карстоведении с целью оценки карстовой опасности на закарстованных территориях при их инженерно-строительном освоении.

Современное развитие наук геологического цикла уже невозможно представить без непосредственного участия точных наук – математики, информатики, логики, изучающих количественно точные закономерности и использующие строгие методы проверки гипотез, основанных на воспроизводимых экспериментах и строгих логических рассуждениях.

Потребность в использовании аналитического и математического аппарата точных наук очевидна и безальтернативна. Накопление и постоянное усложнение геологической информации, получаемой в процессе геологоразведочных и научно-исследовательских работ, требует соответствующих способов ее анализа, обработки и представления, позволяющих существенно дополнять вербальные характеристики математическим обоснованием установленных закономерностей.

В последние десятилетия развитие геологических наук сопровождается целенаправленным и последовательным процессом комплексирования и углубления методов исследований, повсеместным внедрением электронно-вычислительной техники (компьютеризацией) и логически ожидаемым развитием специализированного программного обеспечения. Потребность в математическом обеспечении нередко обуславливает появление так называемых «гибридных» дисциплин, возникающих на стыке естественных и точных наук. Примером такой дисциплины можно назвать математическую или аналитическую геологию, занимающуюся математическим моделированием геологических процессов и примыкающих к этому вопросу задачами [3].

Иными словами специфика современной геологии заключается уже не в том, что практическое использования математических методов является характерной особенностью, а в том, что они являются ее неотъемлемой частью. Современная геологическая база настолько многообразна, а поступление геологической информации настолько интенсивно, что ее анализ с необходимой детальностью в заданные сроки без применения математических методов и услуг электронно-вычислительных машин становится невозможным [30].

Р. Миллер и Дж. Кан указывали: «...овладеть математическими методами решения геологических задач, значит получить способ действий, управляемый набором правил, применение которых всеми заинтересованными исследователями сведет к минимуму ошибки интерпретации, уменьшит неясность и неопределенность в выводах при обработке данных» [22].

Краткая историческая характеристика использования математических методов в геологии

Начало применения математических методов можно отсчитывать со времени становления геологии. Первые попытки использования математических методов для обработки геологической информации относятся к XVIII–XIX векам. В этот период они применялись в основном для группировки данных в минералогии, палеонтологии. Систематический характер такие исследования приобретают с конца XIX века [5]. Так, например, Фишер отмечал, что «расчленение третичного периода Лайелем на основе относительной распространенности современных организмов было статистической процедурой» [8].

Применение вероятностно-статистических методов в минералогии и петрографии на рубеже XIX–XX вв. связано с именами Г. Нигли и Ф. Ю. Левинсона-Лессинга. Именно «методами математической статистики они установили границы выделенных главных семейств горных пород, парагенетические типы породообразующих минералов...» [10].

В XX–XXI веке можно условно выделить четыре периода математизации геологии [5, 10].

Первый период с начала XX века до середины 30-х годов характеризуется лишь единичными работами ученых с применением методов математической статистики. Методы использовались преимущественно при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. С. Ю. Деборжинский предложил решение задачи об отыскании средних значений элементов залегания пласта. П. Е. Чирвинский, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг применили методы статистики при группировке анализов горных пород и минералов, а Д. В. Наливкин для характеристики изменчивости свойств ископаемых организмов. К. Л. Пожарицкий опубликовал работу, согласно которой критерием геолого-экономической оценки месторождения является его денежная оценка, определяемая на основе дисконтированного чистого дохода, полученного за весь срок эксплуатации месторождения. Л. И. Шаманский, один из пионеров математизации геологии, разрабатывал и совершенствовал методы поисков и разведки полезных ископаемых, активно внедрял математические методы в работу геолога. В. К. Котульский, профессор, доктор наук, выдающийся специалист по полиметаллическим месторождениям, был одним из инициаторов внедрения геофизических методов поисков и разведки рудных полезных ископаемых.

Второй период с 1930 по 1960–1965 гг. – это период накопления значительного фактического материала по геологическим исследованиям и наблюдениям. Именно с этого времени началось широкое применение простейших статистических методов для систематизации и анализа геологических данных.

Серьезные исследования с использованием методов статистики при обработке инженерно-геологической информации начали применяться в начале 50-х годов XX века и несколько позднее в США и некоторых странах Европы. Первые работы в этом направлении принадлежат Б. П. Попову. К этому же периоду относятся работы Н. К. Разумовского, Д. А. Родионова, Л. Аренса по изучению закономерностей распределения элементов в породах; А. Б. Вистелиуса по анализу пористости нефтеносных пород в кернах скважин с помощью математического аппарата теории случайных функций; Л. И. Шаманского, Д. А. Казаковского и др.

С 50-х годов происходит активная математизация геологии, в результате которой появляется большое количество работ по применению математических методов в различных отраслях геологических наук. Кроме теории вероятностей и математической статистики в теорию и практику геологоразведочных работ стали привлекаться методы из других разделов математики: многомерного статистического анализа, теории случайных функций и гармонического анализа, теории множеств и многих других. Появление электронно-вычислительной техники как важнейшего компонента процесса вычислений и обработки данных в значительной мере способствовало всеобщей математизации. Вся последующая история развития наук теснейшим образом будет неразрывно связана с математизацией и компьютеризацией.

Математические методы в геологии значительно расширили круг решаемых задач, помимо статистической обработки, теперь они применяются для целей классификации и моделирования.

В работах Н. В. Коломенского и И. С. Комарова отражены вопросы применения вероятностно-статистических методов в инженерной геологии. Ими же в 1959 г на XXIII Геологическом конгрессе в Мехико была изложена общая схема использования вероятностно-статистических методов при изучении естественных оснований крупных инженерных сооружений.

М. Ф. Мирчинк и В. П. Бухарцев использовали корреляционные методы для выявления структурных соотношений в Волго-Уральской области. Д. А. Родионов использовал статистические методы для разграничения геологических объектов. В. Н. Бондаренко проводил исследования по статистическому изучению петрохимических особенностей вулканических пород. А. В. Канцель использовал математические методы для моделирования процессов рудоотложения. В последующие годы вероятностно-статистические методы применялись Л. А. Апродовым, Е. М. Пашкиным, М. К. Погребинским, М. В. Рацем, С. Н. Чернышевым в отношении изучения трещиноватости горных пород.

Третий период математизации охватывает время с середины 60-х и до середины 90-х годов и обусловлен широким внедрением электронно-вычислительных машин в практику геологических исследований.

На рубеже 60-х годов XX столетия в «теоретическом отношении обосновано и в практическом аспекте подтверждено, что вероятностно-статистические методы позволяют наиболее полно и успешно обрабатывать информацию количественного характера и менее эффективны при обработке качественной информации» [16].

Повсеместная компьютеризация начала 90-х практически сняла технические ограничения, препятствующие применению наиболее трудоемких в вычислительном отношении методов [5]. Применение вычислительных машин потребовало изменения методов сбора, анализа, хранения, интерпретации и отображения данных. Появляются методики применения многовариантных анализов исходных данных.

Проблемы общей методологии применения математических методов и программирования в прикладной геологии нашли отражение в работах Ю. А. Воронина, А. Б. Вистелиуса, А. А. Дородницына, А. Н. Дмитриева, Ю. А. Журавлева, Ф. П. Кренделева, Д. А. Родионова, Р. М. Константинова, А. Б. Каждана и других исследователей.

С середины 90-х – начала XXI в. можно выделить четвертый этап, связанный с развитием систем комплексного анализа и прогноза. Научно-технический скачок компьютерной техники, доступность программного обеспечения и технического оборудования только упрочили позиции математических методов и их адаптацию в науках и производстве. Развитие прикладных компьютерных методов, организованных в систему анализа, интерпретации и отображения пространственной геологической, географической и экономической информации получили название «Геоинформационных систем (технологий) – ГИС».

Различные вопросы использования методологии математизации при обработке информации на этом этапе рассматривались многими авторами: В. В. Марченко, Е. Н. Черемисиной; А. В. Веселовским, К. Г. Стафеевым, Т. К. Янбухтиным; В. И. Мишиным; Е. Н. Коломенским, В. Н. Экзарьяном и др. исследователями.

Комплексный качественно-количественный анализ информации, сложившийся в геологических науках конца 80-х и начала 90-х годов XX в. и в начале XXI в., переходит на совершенно иной уровень. В этот период следует отметить работы Г. К. Бондарика, И. С. Комарова, Е. Н. Коломенского, В. В. Пендина и др. По существу, геоинформационные технологии вобрали в себя весь обширный методологический опыт, накопленный ранее. Теоретические вопросы применения математических методов, методология и организация информации, системные принципы и прочие направления, рассматриваемые ранее совместно

с геоинформационными технологиями, позволяют вывести развитие геологии на принципиально новый уровень [16].

Таким образом, использование математических методов в геологических исследованиях позволяет обеспечить воспроизводимость результатов, максимально унифицировать форму представления материала и осуществлять его обработку согласно системе строгих, логически непротиворечивых правил.

Применение математических методов в геологии сопряжено с двумя целевыми аспектами: 1) получением практических выводов из существующих теоретических представлений и моделей геологии; 2) совершенствованием теоретических представлений и моделей геологии [4].

Непосредственно практическое использование математических методов в науках геологического цикла, в зависимости от поставленных целей и решаемых задач на всех этапах математизации геологии, реализовывалось по следующим основным взаимосвязанным направлениям:

1) обработка числовых результатов наблюдений (методы теории вероятностей и математической статистики, математический анализ, теория игр, геометрические методы и др.);

2) совершенствование методов классификации геологических объектов (методы теории вероятностей и математической статистики);

3) исследование качественных характеристик (математическая логика, прикладная кибернетика);

4) реконструкция геологических процессов и прогноз (моделирование с использованием различных математических аппаратов);

5) оптимизация процессов сбора, хранения, поиска, обработки и представления различной геологической информации (математическая статистика, теория информации и техническая документалистика).

Эффект математизации целесообразно оценивать по результатам решения двух основных задач – научной (разработка теории, повышение надежности выводов, минимизация субъективного элемента в работе исследователя) и экономической (оперативность заключений, сокращение затрат времени на производимые работы и их удешевление) [6].

Обзор теоретического и практического опыта применения вероятностно-статистических методов в карстоведении

Наиболее активно процесс математизации затронул такие науки, как гидрогеология, инженерная геология и инженерное карстоведение. Очевидно, что высокая степень

математизации вышеуказанных наук обусловлена в первую очередь активным развитием промышленности, строительства и освоением минерально-ресурсной базы страны в до- и послевоенный период, во время которого решение сложнейших практических задач потребовало создания глубокой научной базы.

Исторически сложилось так, что в карстоведении, инженерном карстоведении и некоторых других геологических дисциплинах математические методы были объединены в одну группу с общим названием «количественные» методы, которая в определенном смысле противопоставлялась группе описательных (вербальных) или «качественных» методов. Подобное противопоставление носит скорее условный характер и указывает лишь на тип обрабатываемых геологических данных (информации) – качественной (описательной) и количественной (цифровой).

В том и в другом случае информация имеет свои определенные специфические особенности. «Количественные критерии, ввиду сложности строения и развития геологических объектов, не отражают полностью их свойств, а ввиду погрешности измерений не отражают их достаточно точно» [20]. Но и при помощи качественных (описательных) характеристик показать объективную динамику протекающих в природе процессов и явлений не представляется возможным.

Одними из основных задач научно-практического применения математических методов в карстоведении и инженерном карстоведении являлись оценка и прогноз устойчивости закарстованной территории, а впоследствии – карстовой опасности и характеризующих ее параметров.

В использовании «количественных» (математических) методов, применяемых в разное время в карстоведении и инженерном карстоведении, можно условно выделить несколько направлений.

Первое направление связано с работами проф. В. Д. Слесарева, развивавшего концепции предельных пролётов горных выработок и на основании законов горной механики (теория предельного равновесия) обосновавшего расчет вероятных размеров величины полости, способной вызвать обрушение земной поверхности, а также работами проф. С. Г. Авершина и М. М. Протодьяконова.

С. В. Альбов для объяснения образования провалов и просадок земной поверхности на закарстованных территориях в низовье левобережья р. Оки использовал положения теории горного давления [1]. Прогноз образования единичных провалов посредством обрушения свода карстовой полости получил широкое развитие в работах И. А. Саваренского, И. А. Печеркина, В. П. Хоменко, В. П. Кутепова. В основу расчетов данного направления была положена детерминированная геологическая модель образования провалов, построенная

путем схематизации основных условий (и факторов) развития карста на основе данных бурения и геофизических исследований [2].

Второе направление связано с широким внедрением вероятностно-статистических методов в конце 60-х начале 70-х годов в геологические исследования. С этого времени начинают появляться специализированные издания по применению математической статистики и теории вероятностей в геологии, из которых наиболее известными являются работы: И. П. Шарапова, Ж. Матерона, У. Крамбейна, Ф. Грейбилл, А. Б. Каждана, О. И. Гуськова, А. А. Шиманского, Г. С. Поротова, Д. А. Родионова, Р. Ф. Чини, Л. Д. Кноринга, В. Н. Деч, Дж. С. Дэвиса и многих других.

Однако исторически первой тематической работой, по-видимому, следует считать – публикацию З. А. Макеева в 1948 г., в которой он изложил принципы инженерно-геологического районирования закарстованных территорий и предложил первую статистическую характеристику (оценку) карстовой опасности – частоту λ образования провалов в год на единицу площади [19]. Публикация имела весьма неоднозначное влияние на дальнейшее развитие методов оценки карстовой опасности, тем не менее показатель частоты образования провалов впоследствии был нормативно закреплён и принят в качестве основного критерия опасности карста.

В практике инженерно-геологических изысканий статистические методы использовались прежде всего для обработки результатов массовых определений (количественной информации) физических и механических (прочностных и деформационных) характеристик всех грунтов, а также при выделении основных грунтовых единиц – инженерно-геологических и расчетных грунтовых элементов, методологические основы расчетов которых изложены в ГОСТ 20522-75 (в настоящее время заменен на ГОСТ 20522-96).

«Первый норматив СНИП 2.02.01-83 по проектированию зданий и сооружений на закарстованных территориях (раздел 13) был введен в действие достаточно поздно с 1986 г. Однако в нем официально были закреплены вероятно-статистические методы определения параметров карстовых провалов и оседаний» [17].

Последующая детализация и расширение использования вероятностно-статистических методов исследований на закарстованных территориях в нормативной литературе произошли с выходом СНиП 1.02.07-87, в котором впервые была утверждена классификация закарстованных территорий по степени устойчивости относительно интенсивности (частоты λ) образования провалов и по их средним диаметрам.

В действительности же вероятностно-статистические методы в практике исследований на закарстованных территориях не отличались существенным разнообразием – это была преимущественно статистическая обработка массовых замеров полевых наблюдений и

экспериментальных данных, выведение статистических закономерностей, эмпирических коэффициентов и оценка точности (достоверности) прогнозных параметров.

С начала 80-х годов появляются работы, направленные на выбор и определение эффективных методов оценки карстовой опасности и прогноза устойчивости закарстованных территорий, в основу которых был положен методический аппарат теории вероятности и математической статистики.

Н. А. Миронов в диссертационной работе, выполненной по материалам исследований автора на территориях гг. Благовещенска, Бирска, г. Кентау Казахской ССР, г. Дзержинска Горьковской области в 1973–1983 гг., разработал методику оценки и прогноза устойчивости закарстованных территорий на основе применения методов исследования карста на разных стадиях проектирования. В качестве основного метода исследований был использован метод многомерного корреляционно-регрессионного анализа для изучения и прогноза устойчивости закарстованных территорий. В результате исследований была дана количественная оценка влияния природных условий и факторов на степень закарстованности и интенсивность провалообразования, а также впервые получены прогнозные уравнения регрессии, характеризующие устойчивость закарстованных территорий для различных условий развития карста. В качестве функций были использованы: удаленность центра участка от ближайшей карстовой воронки, плотность карстовых воронок, площадной и объемный показатели закарстованности [21].

Н. А. Блоцкий, Н. Н. Ковшиков разработали методику прогноза карстовой опасности территории безотносительно во времени, математической основой которой является теорема апостериорных вероятностей Бейеса, предполагающая оценку как информативности, так и в целом при прогнозировании, принадлежности объекта к типу территории, опасной или безопасной в провальном отношении [2].

Значение формулы Байеса состоит в том, что при наступлении события X (образования провала), т.е. при получении новой информации, исследователь может проверить и корректировать выдвинутые до испытания прогнозы (гипотезы). Такой подход носит название байесовского и дает возможность корректировать оценки неизвестных параметров распределения изучаемых признаков.

В. В. Толмачев в 1980 г. обосновал возможность (и целесообразность) использования вероятностно-статистического метода на всех стадиях изысканий и проектирования для оценки карстовой опасности. Ранее он доказал, что возникновение карстовых провалов подчиняется закону распределения редких событий – закону Пуассона, основным параметром которого является интенсивность (частота λ) провалообразования [26, 28].

В 1986 г. выходит монография В. В. Толмачева, Г. М. Троицкого, В. П. Хоменко «Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий», в которой подробно излагаются методические основы применения вероятностно-статистического метода оценки карстовой опасности. Основой метода послужила теория качественных признаков.

Еще одним важным вопросом, который был решен при помощи вероятностно-статистического метода, была «проблема определения параметров конструктивной противокарстовой защиты, основным показателем которой определен средний диаметр карстового провала. Расчетный пролет провала объективно отражает стохастический характер карстового процесса и различные особенности сооружения» [9].

Положения теории вероятностей также были применены в концепции безопасного развития человека на закарстованных территориях. В методике региональной оценки карстовой опасности и риска А. Л. Рагозин и В. А. Елкин в качестве показателей карстовой опасности и карстового риска использовали полную и удельную площадную интенсивность карстовых деформаций (полный и удельный физический риск) [24, 25]. В основу расчета положена формула полной вероятности, которая позволяет вычислить вероятность интересующего события (вероятность образования провала) через условные вероятности этого события в предположении неких гипотез, а также вероятностей этих гипотез.

Весьма перспективным является направление «интегральной» оценки карстовой опасности, развиваемое Д. С. Золотаревым, С. В. Щербаковым [31], В. Н. Катаевым [11, 13]. Оценка осуществляется по комплексу признаков и показателей, характеризующих опасные участки развития карста и выраженных на специальных картографических комплексах. На основе комплексов строится графическая модель вариаций показателей, выступающая базой для математического моделирования (вероятностно-статистического и балльного) и соответственно – оценки карстовой опасности.

Особый практический и теоретический интерес представляет зарубежный опыт применения вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности. Анализ зарубежных публикаций в области оценки опасности выполнен В. В. Толмачевым и подробно изложен в его работах [9, 26, 27, 28]. Укажем только наиболее значимые публикации.

W. Lilly в 1976 г. подтвердил установленное В. В. Толмачевым положение, согласно которому возникновение провалов подчиняется закону редких событий. В качестве параметра распределения была использована плотность воронок, но без взаимосвязи с функцией времени. D. Raghy, E. Tiedeman в 1984 г. определяли вероятность образования провалов с учетом распределения Пуассона.

В конце 80-х начале 90-х годов методы корреляционного анализа использовались в работах М. Thorp, N. Brook при установлении связи между карстопроявлениями и тектоническими нарушениями, J. Dahgleish, E. Alexander при выявлении связи между плотностью воронок, уровнем грунтовых вод и глубины залегания отдельных слоев; J. Littlefield, M. Gubrets, S. Upshurch, M. Stewart оценили связь между образованием провалов в плане и местоположением линейных зон различных тектонических проявлений, Т. Beggs, U. Ruth установили зависимости частоты провалообразования W от глубины залегания известняков.

В конце 90-х годов статистические методы анализа массовых данных применяли J. Gurrin, B. Barfus для обработки параметров карстовых провалов, M. Day, P. Reeder исследовали закономерности ориентации размеров провальных форм, S. Magdalene, E. Alexander исследовали закономерности распределения полей воронок разного возраста, J. Hyatt, H. Wilkes, P. Jakobs исследовали взаимосвязи между различными параметрами старых карстовых воронок и свежих провалов.

W. Wilson, B. Beck сформулировали принципы количественной оценки карстово-провальной опасности на основе вероятностно-статистических закономерностей провалообразования.

Вероятностно-статистические закономерности распределения были установлены Y. Gao, E. Alexander, R. Tipping в 2001 г. при изучении расстояний между соседними провальными воронками, которые также подчиняются закону Пуассона. Влияние природных факторов на образование провалов выполнено K. Doctor & D. Doctor, B. Kronenfeld и др. в 2008 г. при помощи регрессивного анализа.

В 2008 г. E. Zisman разработал методику сравнительной балльной оценки возможности провалообразования, на основе которой проводил дифференциацию территории, а J. Kaufmann применил балльно-статистический метод для выявления тенденций провалообразования.

F. Krammerer в 1962 г. для оценки провальной опасности предложил принимать удельное среднее частоты провалообразования. J. Fenk в 1981 г. предложил оценивать условную вероятность провала по эмпирической формуле, а также оценивать время образования на земной поверхности после обрушения кровли. F. Router, D. Stoyan, P. Oleikewitz в 1981 г. для оценки условной вероятности образования провала на заданном участке применили теорию точечных процессов.

Заключение

Опыт использования вероятностно-статистических методов в карстоведении достаточно разнообразен, результат применения в большинстве случаев весьма удачен, а также содержит значительный потенциал для дальнейшего их внедрения в теорию и практику карстологических исследований. Несомненны и вполне очевидны перспективы дальнейшего использования вероятностно-статистических методов для оценки карстовой опасности, при этом всегда в исследованиях и прогнозных построениях важно учитывать «природно-геологическую основу» и «техногенную составляющую» собственно карстового процесса.

Во многих случаях использование вероятностно-статистических методов сильно ограничено – исследователи нередко используют в своих целях одну формулу вероятности (полную, условную, геометрическую, Баеса и т.п.), оценивая возможность образования карстовых форм без учета фактора времени и изучения особенностей геологического строения закарстованной территории. Также очень часто оценка образования провалов осуществляется в отрыве от закона распределения случайной величины (закон Пуассона), даже в тех случаях, когда выполнение закона может быть подтверждено. Практически отсутствуют положения, учитывающие влияние техногенных факторов, величину и силу этого влияния, а при достаточно длительном временном ряде наблюдений отсутствуют выводы об эффективности использования вероятностно-статистических методов в условиях значительного техногенного прессинга на закарстованные территории, а соответственно точности и достоверности прогнозов.

Резюмируя, следует отметить, что в настоящее время наиболее теоретически обоснованной, а также, что не менее важно – «геологически и карстологически» адаптированной (с некоторыми допущениями), является вероятностно-статистическая методика оценки карстовой опасности В. В. Толмачева. Других, столь же серьезно проработанных методик, основанных на использовании вычислительного аппарата математической статистики и теории вероятностей, так и не появилось. Настоящее направление развивается преимущественно самим автором, но, к сожалению, широкого распространения в официальной практике инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях так и не получило.

Список литературы

1. Альбов С. В. Объяснение происхождения провалов и просадок поверхности теорией горного давления // Карстоведение. – 1948. – №. 4. – С. 23-36.
2. Блоцкий Н. А., Ковшиков Н. Н. Методические рекомендации по прогнозу карстовой опасности с учетом временного фактора. – Черкассы: ОНИИТЭХИМ, 1989. – 35 с.
3. Вистелиус А. Б. Основы математической геологии. – Л.: Наука, 1980. – 389 с.

4. Воронин Ю. А. Еганов Э. А. Методологические вопросы применения математических методов в геологии. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1974. – 86 с.
5. Ворошилов В. Г. Математическое моделирование в геологии: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 124 с.
6. Геологический словарь. Т. 1. – М.: Недра, 1973. – 403 с.
7. Дублянская Г. Н., Дублянский В. Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление / Перм. ун-т. – Пермь, 1998. – 304 с.
8. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии / [под ред. Д. А. Родионова]. – М.: Недра, 1990. – 399 с.
9. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н., Катаев В. Н. Карстоведение. Ч. 3. Инженерное карстоведение: учеб пособие / Перм. ун-т. – Пермь, 2011. – 288 с.
10. Каждан А. Б., Гуськов О. И. Математические методы в геологии: учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 251 с.
11. Катаев В. Н., Кадебская О. И. Геология и карст города Кунгура. – Пермь, 2010. – 236 с.
12. Катаев В. Н. Методология и практика сравнительно-оценочного карстологического районирования: учебное пособие по спецкурсу / Перм. ун-т. – Пермь, 2001. – 85 с.
13. Катаев В. Н. Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении: дис... докт. геол.-мин. наук. – Пермь, 1999. – 451 с.
14. Кноринг Л. Д., Деч В. Н. Геологу о математике. Советы по практическому применению. – Л.: Недра, 1989. – 208 с.
15. Кожевникова В. Н., Кутепов В. М. Устойчивость закарстованных территорий. – М.: Наука, 1989. – 150 с.
16. Козловский С. В. Теория и практика создания геоинформационной системы в инженерной геологии: Автореф. дис... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2010. – 44 с.
17. Костарев В. П. О нормативах и основных документах по инженерно-геологическим изысканиям на закарстованных территориях // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – Пермь, 2003. – С. 253-256.
18. Костарев В. П. Инженерно-карстологические изыскания: нормативы, их исполнение и совершенствование // Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: материалы международного симпозиума (25–30 мая 2004 г., Пермь, Россия). – Пермь, 2004. – С. 201-204.
19. Макеев З. А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей // Карстоведение. – 1948. – №. 4. – С. 43-45.

20. Мартыянова А. Е. Математические методы моделирования в геологии: учебное пособие. – Астрахань: АГТУ, 2008. – 403 с.
21. Миронов Н. А. Методика оценки и прогноз устойчивости закарстованных территорий (на примере некоторых районов карбонатного и сульфатного карста): дис... канд. геол.-минерал. наук. – М., 1984. – 211 с.
22. Миллер Р., Кан. Дж. Статистический анализ в геологических науках. – М., 1965. – 482 с.
23. Рагозин А. Л. Оценка и управление природными рисками: Первые итоги XX века // Геоэкология. – 2001. – № 2. – С. 183-187.
24. Рагозин А. Л. Теория и практика оценки геологических рисков: автореф. дис... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 1997. – 60 с.
25. Рагозин А. Л., Елкин В. А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2003. – № 4. – С. 33-52.
26. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М.: Стройиздат, 1986. – 177 с.
27. Толмачев В. В., Леоненко М. В. Еще раз о классифицировании закарстованных территорий по степени их опасности // Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: материалы международного симпозиума (25–30 мая 2004 г., Пермь, Россия). – Пермь, 2004. – С. 230-234.
28. Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. – М.: Недра, 1990. – 151 с.
29. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов: автореф. дис... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2004. – 38 с.
30. Шестаков Ю. Г. Математические методы в геологии: учеб. пособие для студентов геологических специальностей. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. – 208 с.
31. Щербаков С. В., Золотарев Д. Р. Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий (на примере г. Кунгура) // Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых геологического факультета. – ПГУ, 2008. – С. 164-168.
32. Чини Р. Ф. Статистические методы в геологии. – М.: Мир, 1986. – 189 с.

Рецензенты:

Назаров Николай Николаевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии и ландшафтной экологии географического факультета ГОУ ВПО ПГНИУ. Пермь

Пенский Олег Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры математического анализа механико-математического факультета ГОУ ВПО ПГНИУ. Пермь