

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ИХ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ

INDETERMINACIES IN THE ENVIRONMENTAL-GEOLOGICAL SYSTEMS AND THEIR SYSTEMATIZATION

БУСЛАЕВА О.В.

Аспирант геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, buslaeva.ol@gmail.com

КОРОЛЕВ В.А.

Профессор геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.-н., korolev@geol.msu.ru

BUSLAEVA O.V.

Postgraduate student of the geological faculty of the Lomonosov Moscow State University, buslaeva.ol@gmail.com

KOROLEV V.A.

Professor of the geological faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (doctor of science in Geology and Mineralogy), Moscow, korolev@geol.msu.ru

Ключевые слова:

неопределенность; опасность; риск; эколого-геологическая система; экологическая геология; прогнозирование.

Key words:

indeterminacy; danger; risk; environmental-geological systems; environmental geology; prediction.

Аннотация

В статье анализируется новое понятие — «неопределенность в эколого-геологических системах (ЭГС)». Вводится его определение, рассматриваются виды неопределенностей, обуславливающие риск развития опасностей в ЭГС. Предлагаются варианты систематизации факторов неопределенности в ЭГС, кратко характеризуются возможные (в основном математические) методы прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности.

Введение

Моделирование процессов самой разной природы сталкивается, как правило, с проблемой приблизительности, неточности и неполноты данных о моделируемой системе. В частности, эта проблема возникает при моделировании процессов, происходящих в эколого-геологических системах (ЭГС), сложных по структуре и возникающим в них явлениям [22].

Эколого-геологическая система состоит из сообщества живых организмов и геологического компонента как среды их обитания, включает в себя множество связей между отдельными элементами и характеризуется рядом происходящих в ней процессов, таких как обмен веществом и энергией и др.

Недостаток знаний об ЭГС часто носит объективный характер и является следствием сложности этих систем, познание которых составляет одну из основных задач экологической геологии [21]. Отсутствие полноты информации об эколого-геологической системе и законах ее функционирования значительно усложняет задачу прогнозирования тех или иных явлений, происходящих в ее пределах.

Если о механизме формирования (возникновения, распространения) процесса мало что известно, то этот процесс рассматривается как подверженный влиянию неопределенных факторов.

Описание развития ЭГС в условиях неопределенности — актуальная, важная, трудная и до сего времени не исследованная задача. Близкие по характеру задачи рассматривались в работах, посвященных в основном общей теории риска и его прогнозированию [2, 4, 5, 7, 9, 11–14, 22–24 и др.]. Однако в области экологической геологии большинство работ по анализу процессов в ЭГС и их изменениям базируется на детерминированных закономерностях, выявлению которых они и посвящены. Что же касается описания эколого-геологических систем в условиях неопределенности, то таких работ практически нет.

Abstract

This paper analyses such a new concept as «indeterminacy in environmental-geological systems (EGS)», introduces a definition of it, discusses kinds of indeterminacies that contribute to the risk of development of dangers in EGS. Some variants of systematization of indeterminacy factors in EGS are offered, possible (mainly mathematical) methods of prediction of EGS development under the conditions of indeterminacy are briefly characterized.



Поэтому цель настоящей статьи — характеристика неопределенностей в ЭГС и их систематизация для последующей разработки методов прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности.

Понятие «неопределенность в эколого-геологической системе»

Понятие «неопределенность» применимо к различным объектам, системам и процессам окружающего нас мира, отражает отсутствие однозначности в развитии процесса, а также отсутствие или недостаток информации о чем-либо. Неопределенность наряду с другими качествами обуславливает риск развития тех или иных опасностей [5], а применительно к ЭГС — риск развития процессов, опасных для экосистем.

С философской точки зрения понятие «неопределенность» тесно связано с такими важнейшими философскими категориями, как «случайность и необходимость» или «случайное и закономерное», анализу взаимосвязи которых посвящено значительное количество философских работ от Гегеля и К. Маркса до современных авторов. По проблеме соотношения этих категорий были высказаны, по крайней мере, три разные точки зрения (позиции): (1) отрицающая случайные процессы в окружающем нас мире и отстаиваемая детерминистами (П. Лапласом и др.); (2) допускающая одновременное протекание и случайных (стохастических), и закономерных процессов, вероятность наличия которых может быть разной; (3) рассматривающая случайные процессы как особые, имеющие совершенно иную природу, чем детерминированные.

Неопределенность выступает как проявление случайности, случайных (стохастических) процессов, для которых, однако, может быть выявлена не детерминированная причинно-следственная связь, а закономерность особого рода — вероятностная.

В эколого-геологических системах осуществляются как детерминированные, так и вероятностные процессы. Изучению первых уделяется основное внимание в геоэкологии и экологической геологии, а вторые остаются практически неизученными. Тем не менее их познание имеет огромное значение, в т.ч. для прогнозирования многих опасных процессов в ЭГС и оценки их риска.

Поэтому для целей экологической геологии и геоэкологии в целом авторами вводится понятие «неопределенность в эколого-геологической системе», учитывающее и отражающее специфические особенности ЭГС, связанные со стохастическими процессами.

Неопределенность в эколого-геологической системе — это ее особое свойство (качество), обусловленное стохастическим характером имеющихся в ней взаимосвязей и процессов и/или недостатком информации о них и проявляющееся в возможности многих вариантов развития данной системы, экологически как безопасных, так и опасных.

Неопределенность обуславливается двумя основными причинами: (1) отсутствием или недостаточностью знаний о закономерностях возникновения явлений; (2) стохастическим характером факторов, влияющих на развитие процесса [5]. С первой из указанных причин исследователь сталкивается всякий

раз, приступая к изучению ЭГС или к оценке ее состояния. Эта причина устраняется путем получения и выявления необходимой информации об ЭГС на базе использования тех или иных постоянно совершенствуемых методов и технологий. В итоге ЭГС все больше и больше теряет исходную неопределенность, обусловленную первой причиной.

С устранением же второй причины дело обстоит гораздо сложнее. Описание развития эколого-геологической системы в условиях, когда на нее действуют разнообразные неопределенные факторы, предполагает многозначность и многовариантность большого количества возможных сценариев ее развития, экологически как благоприятных, так и неблагоприятных.

Одной из причин экологически неблагоприятных изменений в ЭГС является нестабильность условий функционирования данной системы, которая возрастает с усложнением техносферы и ее неконтролируемым (а потому вероятностным) развитием.

Неопределенность в ЭГС как категория экологической геологии может быть проанализирована на базе «пирамиды понятий» [3]. В ее основе, как известно, лежит логический анализ объема понятий и их содержания. Применяя логические приемы сравнения понятий неопределенности, различающихся по объему и содержанию, можно систематизировать категорию «неопределенность в ЭГС» так, как показано на рис.

1. «Неопределенность в ЭГС» как понятие наибольшего объема делится в данном случае на два понятия меньшего объема: (I) «природная неопределенность в ЭГС»; (II) «природно-техногенная неопределенность в ЭГС». На следующем, более низком по объему уровне, в каждом из них выделяются еще по два понятия меньшего объема — «внешняя неопределенность» и «внутренняя неопределенность», первая из которых обусловлена внешними причинами и воздействиями на ЭГС, а вторая — внутренними процессами, происходящими в пределах ЭГС. Таким образом, на третьем уровне выделяются следующие четыре понятия: (1) «внешняя природная неопределенность в ЭГС»; (2) внутренняя природная неопределенность в ЭГС»; (3) «внешняя природно-техногенная неопределенность в ЭГС»; (4) «внутренняя природно-техногенная неопределенность в ЭГС». На четвертом уровне эти понятия подразделяются по природе обуславливающих их процессов на два типа категорий еще меньшего объема: (а) случайные (стохастические) имеющие вероятностный характер; (б) неслучайные (нестохастические). Таким образом, на этом уровне выделяется восемь понятий неопределенности в ЭГС — меньшего объема, но большего содержания, чем предыдущие (см. рис. 1). Далее пирамида понятий «неопределенности в ЭГС» может достраиваться вниз в соответствии с логическими принципами определения понятий.

Систематизация неопределенных факторов

Неопределенные факторы в ЭГС можно систематизировать, используя различные признаки, характеризующие те или иные стороны неопределенности [5]. На взгляд авторов, наиболее естественными выглядят классификации, построенные: (1) по происхождению



неопределенности; (2) по отношению неопределенности к изучаемой ЭГС; (3) по природе неопределенности; (4) по источнику неопределенности; (5) по степени (мере) неопределенности и по другим критериям.

По **происхождению** неопределенности в ЭГС могут быть природными или техногенно-природными. Природная неопределенность чаще всего обусловлена недостаточной изученностью природных явлений в ЭГС, тогда как природно-техногенная обусловлена в т.ч. и неопределенным развитием техногенеза, техносферы, вероятностным характером научно-технического прогресса.

Одним из центральных вопросов экологической геологии является неопределенность влияния неживого на живое (биоту), или неопределенность взаимодействия абиотических и биотических компонентов ЭГС.

Развитие популяций в экосистемах подчиняется законам больших чисел и имеет стохастический характер [17]. В то же время многие процессы в абиотических компонентах экосистем часто носят детерминированный характер. Отсюда вытекает сложный характер взаимодействия и взаимосвязей между «живым» и «неживым». Поэтому исходя из структуры эколого-геологической системы [21] также можно выделить ряд специфических неопределенностей, обусловленных ее отдельными составляющими.

Так, например, по **отношению к изучаемым системам** можно выделить: (1) внутренние неопределенности в ЭГС, которые обусловлены внутренними особенностями и незакономерными изменениями экотопа и его составляющих (климатопа, гидротопа, литотопа и эдафотопа), а также биоценоза и его составляющих (фитоценоза, зооценоза, микробиоценоза, человеческого сообщества); (2) внешние неопределенности в ЭГС, обусловленные внешними незакономерными природными и (или) техногенными воздействиями на ЭГС различного характера.

По **природе** неопределенности выделяются факторы стохастической (случайные) и нестохастической (неслучайные) природы. И стохастические, и нестохастические факторы могут быть подвергнуты следующему уточнению и разделению в соответствии со степенью (мерой) неопределенности каждого из них (рис. 2).

К **случайным (стохастическим)** относятся неопределенные факторы, обладающие свойством статистической устойчивости, которая чаще всего описывается в терминах функций распределения вероятностей. Функция распределения $f(x)$ случайной величины ζ определяется как $f(x) = P\{\zeta \leq x\}$, где $P\{\zeta \leq x\}$ — вероятность того, что случайная величина ζ примет значение, не превосходящее x . Вероятность понимается как степень возможности реализации случайного процесса и изменяется в интервале от 0 до 1. Это означает, в частности, что функция распределения случайной





величины является неубывающей по x функцией, областью значений которой является отрезок $[0, 1]$. Из определения функции распределения и свойства аддитивности вероятностей следует, что $P\{x < \zeta \leq y\} = f(y) - f(x)$, т.е. вероятность того, что случайная величина ζ примет значение, превосходящее x , но не превосходящее y при $x \leq y$, равна разности $f(y)$ и $f(x)$ (где $f(y) = P\{\zeta \leq y\}$ — вероятность того, что случайная величина ζ примет значение, не превосходящее y).

Если известно, что событие произойдет наверняка, то оно называется достоверным и его вероятность полагается равной 1. Если же известно, что событие никогда не произойдет, то оно называется невозможным и его вероятность полагается равной 0.

В случае, когда известен закон распределения случайной величины, характеризующей процесс, процесс происходит в условиях *стохастической неопределенности*. Такой вид неопределенности является «наименее неопределенным», т.к., зная закон распределения случайной величины и пользуясь формулами теории вероятностей, можно вычислить все характеристики процесса, среди которых наиболее важными являются математическое ожидание $M[\zeta] = \int xdf(x)$ и дисперсия $D[\zeta] = \int (x - M[\zeta])^2 df(x)$.

В случае, когда закон распределения неизвестен, процесс происходит в условиях *статистической неопределенности*, которая, в свою очередь, делится на две большие группы: (1) с известным типом (видом) распределения (пуассоновским, нормальным или др.), но неизвестными его параметрами; (2) с неизвестным типом распределения. Статистическая неопределенность имеет более выраженный характер неопределенности по сравнению со стохастической. При этом она более ярко проявляется во второй группе и менее ярко — в первой. В условиях статистической неопределенности для определения закона распределения и вычисления вероятностей желателен (но не всегда возможен) сбор дополнительной статистической информации.

К *нестатистическим* относят такие неопределенные факторы, вероятность возможной реализации которых не имеет физического смысла. Такие факторы не обладают свойством статистической устойчивости (т.к. невозможно определить вероятность их реализации) и не описываются каким-либо законом распределения вероятностей. В этом случае процесс протекает в условиях *нестохастической неопределенности*. В этих условиях законы теории вероятностей неприменимы. Нестохастическая неопределенность — это неизвестность, обусловленная недостаточностью или полным отсутствием информации о процессе.

Для описания неопределенных факторов нестохастической природы иногда используют теорию нечетких множеств. Под нечетким множеством A понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$, $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, где $\mu_A(x)$ — функция принадлежности (характеристическая функция), указывающая, в какой степени (мере) элемент x принадлежит нечеткому множеству A . Множества X и A определяются некоторыми конкретными критериями.

Неопределенные факторы нестохастической природы можно условно разделить на две группы: (1) с известными функциями принадлежности (диапазоном изменения переменных); (2) с неизвестными функциями принадлежности. Нестохастическая неопределенность имеет более выраженный характер неопределенности по сравнению со статистической и тем более со стохастической и при этом более ярко проявляется во второй группе и менее ярко — в первой.

Таким образом, случайные факторы представляют собой наиболее «легкий» вид неопределенности, поскольку они подчиняются определенным закономерностям и становятся предсказуемыми в среднем, подчиняясь закону больших чисел. Однако в каждом конкретном проявлении такие случайные факторы остаются непредсказуемыми.

Наиболее «тяжелый» вид неопределенности имеют факторы нестохастической природы. Для их описания иногда вводят субъективные вероятности (с помощью экспертного оценивания) и затем применяют аппарат теории вероятностей. Однако надо иметь в виду, что при использовании субъективных вероятностей некоторые положения теории вероятностей, в частности закон больших чисел, перестают действовать.

Рассмотренная выше классификация неопределенных факторов, описывающих ЭГС, также может быть представлена в виде «пирамиды понятий» на основе логического деления (рис. 3).

На первом уровне пирамиды выделяются понятия наибольшего объема: (I) «случайные неопределенные факторы»; (II) «нестатистические (нестохастической природы) неопределенные факторы». На следующем, более низком, уровне располагаются понятия меньшего объема, но более содержательные по степени неопределенности, а именно: (1) «стохастическая неопределенность»; (2) «статистическая неопределенность»; (3) «неопределенность с известными функциями принад-



Рис. 3. Пирамида понятий «неопределенные факторы в эколого-геологической системе, выделяемые по их природе» (объяснения в тексте)

лежности»; (4) «неопределенность с неизвестными функциями принадлежности». При уточнении и логическом делении понятий (1) и (2) можно далее выделить еще один уровень, в который войдут понятия: (1а) «стохастическая неопределенность с известным законом распределения случайной величины»; (2а) статистическая неопределенность с неизвестным законом распределения случайной величины, но его известным типом (видом); (2б) «статистическая неопределенность, при которой ничего не известно о законе распределения случайной величины».

Можно выделить следующие виды неопределенностей по *источникам их возникновения* в ЭГС (см. таблицу):

- связанная с недостаточной изученностью явлений в ЭГС;
- ответных реакций в ЭГС;
- восстановительных процессов в ЭГС;
- метрологическая;
- связанная с невозможностью получения информации;
- временная;
- экономическая;
- политическая.

Дадим краткие комментарии к основным видам неопределенностей, фигурирующим в таблице.

В качестве примера недостаточной изученности природных явлений, происходящих в ЭГС, можно привести неполную изученность строения геологической среды, свойств горных пород, геологических процессов, эволюции земной коры, геомагнитных инверсий, влияния геомагнитного поля на биосферу и др. К этому же виду неопределенностей можно отнес-

ти и недостаточную изученность экологических функций литосферы [20].

К недостаточной изученности антропогенных процессов можно отнести неполную изученность техногенных химических, физических и биологических процессов, происходящих в ЭГС. Этот вид неопределенности, как отмечалось выше, — самый распространенный и устраняется известными методами геологии и экологической геологии. При этом получение необходимой информации во многих случаях позволяет оценивать состояние ЭГС на базе детерминированных закономерностей.

Неопределенность ответных реакций в эколого-геологической системе объясняется диспропорциональностью причинно-следственных явлений в ней. Слабые воздействия на ЭГС могут иметь сильные непредвиденные экологические последствия и наоборот.

Неопределенность восстановительных процессов в эколого-геологической системе имеет очень большое значение для оценки ее функционирования и эволюции и обусловлена различными возможными механизмами обеспечения ее устойчивости при различных воздействиях. В неопределенность восстановительных процессов включается, в частности, неопределенность перехода ЭГС в новое качество после того, как система была выведена по тем или иным причинам из положения равновесия. Неопределенность этого вида проявляется в множественности как путей перехода, так и новых качеств ЭГС, а также в случайности их реализации. С ней исследователь сталкивается всякий раз, например, оценивая устойчивость ЭГС при техногенных воздействиях.

Таблица

Виды неопределенностей по источнику возникновения в ЭГС		
Вид неопределенности	Проявление неопределенности	
	природной	природно-техногенной
Связанная с недостаточной изученностью явлений в ЭГС	Недостаточная изученность природных процессов и явлений в ЭГС	Недостаточная изученность антропогенных процессов и механизмов их протекания в ЭГС
Ответных реакций в ЭГС	Недостаточная изученность прямых и обратных связей в природной ЭГС	Недостаточная изученность прямых и обратных связей в природно-техногенной ЭГС
Восстановительных процессов в ЭГС	Недостаточная изученность самоорганизации и самовосстановления ЭГС	Многовариантность принятия решений по восстановлению природно-технических ЭГС
Метрологическая	Неопределенность, связанная с неизбежными ошибками результатов наблюдений, характеризующих природные компоненты ЭГС	Неопределенность, связанная с неизбежными ошибками результатов измерений показателей, описывающих функционирование природно-техногенного объекта в ЭГС
Связанная с невозможностью получения информации	Объективная невозможность получения информации о компонентах ЭГС в труднодоступных для исследования районах	Закрытость информации для ряда техногенных объектов
Временная	Неопределенность времени и места регулярно происходящих природных опасных событий в ЭГС	Неопределенность времени и места регулярно происходящих природно-техногенных опасных событий в ЭГС
Экономическая	Неопределенность экономической оценки природных ЭГС и экономического ущерба от опасных природных процессов	Неопределенность экономической оценки природно-техногенных ЭГС и экономического ущерба от опасных природно-техногенных процессов
Политическая	Неопределенность влияния политических событий на развитие природных ЭГС	Неопределенность влияния политических событий на развитие природно-техногенных ЭГС



Метрологическая неопределенность в ЭГС проявляется, например, в погрешностях при измерении значений факторов, описывающих данную систему.

Неопределенность, связанная с невозможностью получения информации об эколого-геологической системе и ее компонентах, — также один из распространенных видов неопределенностей, с которыми сталкивается экогеолог или геоэколог. Часто за «закрытой» информацией о тех или иных техногенных объектах их руководством скрываются различные факты экологических нарушений и нанесенного ущерба. Устранить эту неопределенность, к сожалению, во многих случаях бывает сложно без привлечения прокуратуры или экологической полиции.

Временную неопределенность природных процессов в ЭГС можно выделить, когда развитие природных процессов в ЭГС контролируется, но время, место и сила их проявления определены лишь в некоторых приблизительных диапазонах. Такого рода неопределенность характерна, например, для наводнений, паводков, землетрясений, оценка риска проявления которых имеет огромное экологическое значение.

Временная неопределенность в природно-техногенной ЭГС включает в себя и компонент, обусловленный неопределенным развитием во времени техногенеза, техносферы, вероятностным характером научно-технического прогресса в целом.

Экономическая неопределенность в ЭГС имеет важное значение при оценке ущерба от экологически опасных процессов и риска их возникновения и развития. Она обусловлена общей неопределенностью экономического развития как в глобальном масштабе, так и в рамках отдельного государства. Неопределенность колебаний курсов валют, стоимости природных ресурсов и пр. затрудняет длительное экономическое прогнозирование ущерба, экологического риска и др.

В политическую неопределенность включается отсутствие четко сформулированной экологической политики государства, возможность влияния политических кризисов, проявлений сепаратизма, экстремизма, терроризма и пр. на состояние и функционирование ЭГС.

Неопределенности в ЭГС стохастической и нестохастической природы были уже выше частично упорядочены по степени (мере) их неопределенности. Более полная классификация неопределенностей по степени их выраженности была предложена К. Борхом [19], который выделил следующие семь степеней неопределенности (по мере ее возрастания):

- нулевая, отражающая отсутствие неопределенности (система полностью определена на базе детерминированных закономерностей) и чаще всего являющаяся допущением, принимаемым для упрощения расчетов;
- квазидетерминированная (система определена лишь частично);
- стохастическая «классического» типа;
- с известным типом распределения, но неизвестными параметрами;
- с неизвестной функцией распределения при достаточно большой накопленной статистике;
- с неизвестной функцией распределения при малой накопленной статистике;
- нестохастическая, исключая вероятностные закономерности.

В этой классификации степень выраженности неопределенности возрастает от позиции 1 к позиции 7. Последняя характеризуется самой высокой неопределенностью и, соответственно, сложнее всего поддается оценке.

Возможные методы прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности

Наиболее желательный способ определения вероятности случайных событий — это использование объективной информации. В этом случае вероятности называются объективными, и их значения вычисляются с помощью математических методов на основе известной функции распределения случайной величины либо путем обработки статистической информации. Однако в геоэкологии и экологической геологии исследователь часто сталкивается с субъективной информацией, к которой трудно применить математические методы.

Степень неопределенности природных и природно-техногенных явлений в ЭГС можно понизить путем более глубокого и детального изучения механизмов возникновения и развития процессов (в т.ч. и опасных), происходящих в ЭГС. Этому и посвящено большинство работ в области экологической геологии. Более глубокое и детальное изучение ЭГС позволяет сделать процессы менее случайными и, соответственно, более закономерными. Решение этой задачи проводится в рамках исследований в соответствующих областях знаний [1, 2, 6, 8, 10, 15, 16, 18, 19].

Для получения достаточно достоверных прогнозов развития ЭГС в условиях неопределенности можно использовать в зависимости от задачи те или иные, главным образом математические, методы:

- вероятностно-статистические;
- основанные на теории нечетких множеств;
- основанные на теории принятия решений и теории игр;
- основанные на теории распознавания образов;
- эвристические.

Вероятностно-статистический метод позволяет оценить вероятность возможной реализации процесса в пределах ЭГС в условиях неопределенности чаще всего случайной природы. Его основные ограничения связаны с недостаточной статистикой данных об особенностях ЭГС. Тем не менее вероятностный метод в настоящее время считается одним из наиболее перспективных для целей прогнозирования как в инженерной, так и в экологической геологии. Имеются следующие методы прогнозирования в зависимости от имеющейся исходной информации об особенностях ЭГС в условиях неопределенности:

- *статистический*, когда вероятности определяются по имеющимся статистическим данным (при их наличии) об особенностях ЭГС;
- *теоретико-вероятностный* для изучения редких событий в отсутствие статистических данных об особенностях ЭГС;
- *метод Монте-Карло* (метод рандомизации), основанный на создании последовательности псевдослучайных чисел и моделирующий развитие того или иного процесса в пределах ЭГС.

Методы теории нечетких множеств состоят в том, что в отличие от классической теории множеств функции принадлежности $\mu_A(x)$ в них могут принимать не только значения 0 (если x не принадлежит множеству A) или 1 (если x принадлежит множеству A), но и произвольные из отрезка $[0, 1]$. Функции принадлежности $\mu_A(x)$ определяются теми или иными критериями, которые обосновываются для конкретной ЭГС. При помощи методов нечетких множеств также можно формально определить неточные и многозначные понятия ЭГС в условиях неопределенности. Методы теории нечетких множеств применяются к неопределенным факторам нестохастической природы.

В дополнение к вероятностно-статистическому и основанному на теории нечетких множеств могут быть использованы методы теории принятия решений и теории игр, теории распознавания образов, а также эвристический.

Методы теории принятия решений и теории игр позволяют построить математическую модель разрешения некоторых проблемных ситуаций и выбрать наиболее оптимальное из решений (в соответствии с некоторым критерием оптимальности — количественным или качественным, который обосновывается для данной ЭГС).

Методы теории распознавания образов позволяют классифицировать эколого-геологические системы в условиях неопределенности или их компоненты, а также картографические модели ЭГС по нескольким категориям и классам, основанным на прецедентах — ранее классифицированных объектах, принимаемых как образцы при решении задач классификации.

Эвристический метод (экспертное оценивание) заключается в логико-интуитивном анализе ЭГС в условиях неопределенности, разработке альтернатив и количественной оценке их качества на базе принимаемых экологических критериев. Обобщенное мнение экспертов служит основанием для осуществления выбора. Эвристический метод применяется при отсутствии как статистических данных, так и адекватных математических моделей и реализуется в виде экологической экспертизы. В методе возможно использование субъективных вероятностей, получаемых с помощью экспертного оценивания.

Заключение

Процессы в сложных эколого-геологических системах несут, как правило, случайный характер и развиваются в условиях неполноты (вплоть до ее отсутствия) объективной информации о причинах их возникновения, условиях и закономерностях протекания под влиянием недостаточно контролируемых и неопределенных факторов. В этом случае говорят о развитии ЭГС в условиях неопределенности.

В статье введено понятие «неопределенность в эколого-геологической системе» и дано его определение. Исходя из результатов проведенного анализа таких неопределенностей предложены возможные варианты систематизации неопределенных факторов в ЭГС (в соответствии с природой, происхождением и источником неопределенностей, со степенью выраженности их факторов и др.). Кроме того, указаны и кратко описаны возможные (в основном математические) методы прогнозирования ЭГС в условиях неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов А.И.* Неопределенность данных в математической экологии // Дальневосточный математический журнал. 2000. Т. 1. № 1. С. 38–42.
2. *Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. М.: ФИД «Деловой экспресс», 2004. 352 с.
3. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / Трофимов В.Т., Королев В.А., Харькина М.А. и др. (под ред. В.Т. Трофимова). М.: ООО «Геомаркетинг», 2012. 328 с.
4. *Ваганов П.А.* Экологические риски. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 152 с.
5. *Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н.* Общая теория рисков: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 368 с.
6. *Горский В.Г., Моткин Г.А., Петрунин В.А., Терещенко Г.Ф., Шаталов А.А., Швецова-Шиловская Т.Н.* Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. М.: Экономика и информатика, 2002. 260 с.
7. *Дубров А.М.* Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе. М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
8. *Космическое земледелие: информационно-математические основы* / под ред. В.А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 1998. 571 с.
9. *Кузьмин И.И., Махутов Н.А., Хетагуров С.В.* Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та экономики и финансов, 1997. 163 с.
10. *Махутов Н.А. и др.* Особенности применения методов анализа опасностей систем «человек — машина — среда» на базе нечетких множеств // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2001. № 1. С. 99–110.
11. *Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
12. *Мягков С.М.* География природного риска. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
13. *Потапов Б.В., Радаев Н.Н.* Экономика природного и техногенного рисков. М.: Деловой экспресс, 2001. 514 с.
14. *Рагозин А.Л.* Оценка и управление природными рисками. М.: КРУК, 2003. 320 с.
15. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1: Долгосрочное прогнозирование элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 357 с.
16. *Савчук В. П.* Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. М.: Наука, 1989. 328 с.
17. *Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
18. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
19. *Тихомиров Н.П., Потравный И.М., Тихомирова Т.М.* Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 350 с.
20. *Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г.* Экологическая геология: учебник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 415 с.
21. *Трофимов В.Т.* Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
22. *Харченко С.Г., Ананьева Р.В.* Ретроспектива международного опыта анализа рисков // Международная экономика. 2008. № 6. С. 61–69.
23. *Шмаль А.Г.* Факторы экологической опасности и экологические риски. Бронницы: Изд-во МП «ИКЦ БНТВ», 2010. 191 с.
24. *Шоломицкий А.Г.* Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Изд. дом ГУ «ВШЭ», 2005. 400 с.