

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ИХ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ

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,
korolev@geol.msu.ru

Ключевые слова: неопределенность, опасность, риск, эколого-геологическая система, экологическая геология, прогнозирование

Аннотация: В статье анализируется новое понятие – «неопределенность в эколого-геологических системах» (ЭГС), вводится определение этого понятия, рассматриваются виды неопределенностей, обуславливающие риск развития опасностей в ЭГС. Предложены варианты систематизации факторов неопределенности в ЭГС, кратко охарактеризованы возможные (в основном математические) методы прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности

Введение

Моделирование процессов самой разной природы сталкивается, как правило, с проблемой приближительности, неточности и неполноты данных о моделируемой системе. В частности, эта проблема возникает и при моделировании процессов, происходящих в эколого-геологических системах (ЭГС), сложных по своей структуре и происходящим в них явлениям [22]. Эколого-геологическая система состоит из сообщества живых организмов и геологического компонента, как среды их обитания, включает в себя разнообразное 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 ЭГС и законах ее функционирования значительно усложняет задачу прогнозирования тех или иных явлений, происходящих в пределах ЭГС.

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

Описание развития ЭГС в условиях неопределенности – актуальная, важная, трудная и до сего времени неисследованная задача. Близкие по характеру задачи исследовались в работах, посвященных в основном общей теории риска и его прогнозированию, следующих авторов [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 изменении базируется на детерминированных закономерностях, выявлению которых и посвящены эти работы. Что же касается описания ЭГС в условиях неопределенности, то таких работ практически нет.

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

Понятие «неопределенности в эколого-геологической системе»

Понятие «неопределенность» применимо к различным объектам окружающего нас мира, к различным системам и процессам. Неопределенность - понятие, отражающее 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 опасных для экосистем процессов.

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 число философских работ от Гегеля и К.Маркса до современных философов. По проблеме соотношения этих категорий высказывались, по крайней мере, три различные точки зрения: 1) крайняя позиция, отрицающая случайные процессы в окружающем нас мире, отстаиваемая детерминизмом (П.Лаплас и др.); 2) позиция, допускающая наличие одновременно и случайных (стохастических – от греч. *stochasis* – догадка, вероятность), и закономерных процессов, причем степень их вероятности может быть разной, в пределе приближающейся к закономерности; 3) другая крайняя позиция, 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 из вышеперечисленных уделяется основное внимание в геоэкологии и экологической геологии, а вторые остаются практически не изученными. Тем не менее, их познание имеет огромное значение, в том числе для прогнозирования многих опасных процессов в ЭГС и оценки их риска.

Поэтому для целей экологической геологии и геоэкологии в целом нами вводится понятие «неопределенность в эколого-геологической системе», учитывающее и отражающее специфические особенности ЭГС, связанные со стохастическими процессами. *Неопределенность в эколого-геологической системе – особое свойство (качество) ЭГС, обусловленное стохастическим характером имеющихся в ней взаимосвязей и процессов и/или недостатком информации о них и проявляющееся в возможности многовариантных развитий ЭГС, как экологически безопасных, так и экологически опасных.*

Неопределенность обусловливается двумя основными причинами: 1) отсутствием или недостаточностью знаний о закономерностях формирования явлений; 2) стохастическим характером факторов, влияющих на развитие процесса [5]. С первой из указанных причин исследователь сталкивается всякий раз, приступая к изучению ЭГС или оценке её состояния. Эта причина устраняется путем получения и выявления им необходимой информации об ЭГС на базе тех или иных существующих методов и методик, которые постоянно совершенствуются. В итоге этого ЭГС все больше и больше теряет изначальную неопределенность, обусловленную первой причиной. Что же касается устранения второй причины неопределенности – с ней дело обстоит гораздо сложнее.

Описание развития ЭГС в условиях, когда на нее действуют разнообразные неопределенные факторы, предполагает многозначность и многовариантность множества возможных сценариев развития данной системы, причем как экологически благоприятных, так и неблагоприятных. Одной из причин экологически неблагоприятных

изменений в ЭГС является нестабильность условий функционирования ЭГС, которая возрастает с усложнением и неконтролируемым (а потому вероятностным) развитием техносферы.

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» следующим образом (рис.1).

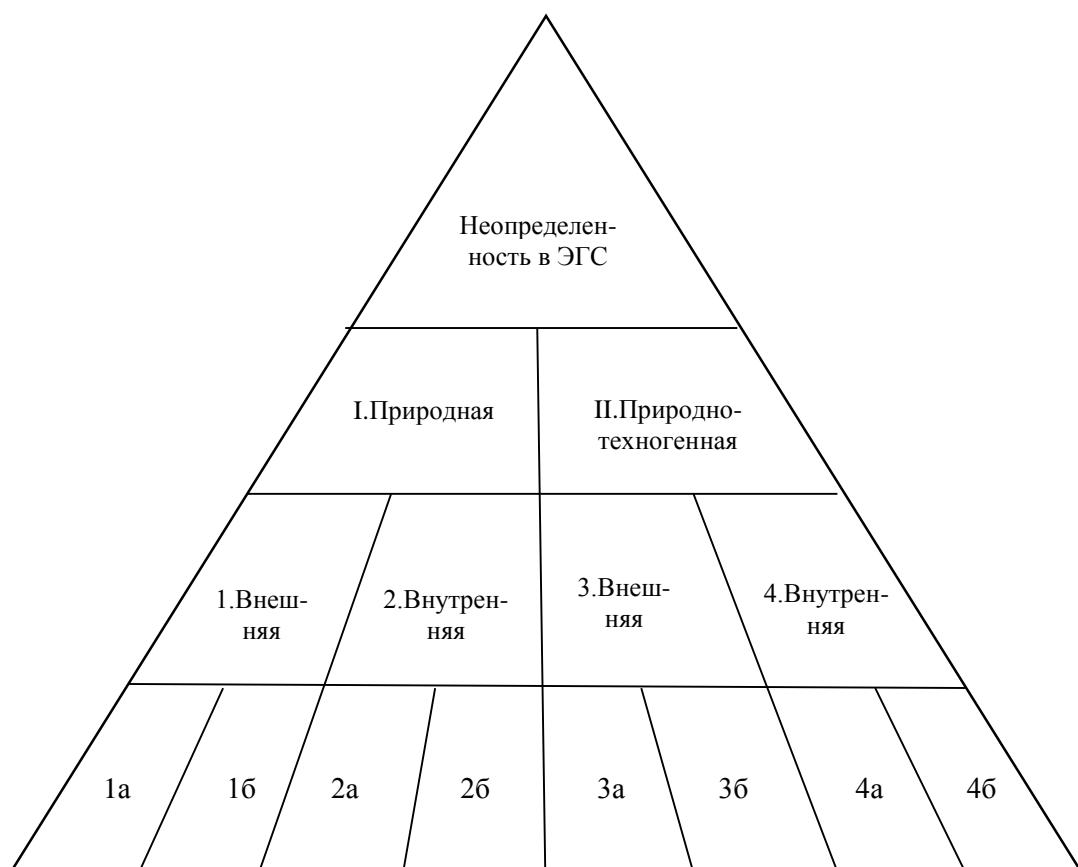


Рис.1. Пирамида понятий «неопределенность в эколого-геологической системе»
(объяснения в тексте)

Здесь «неопределенность в ЭГС», как понятие наибольшего объема, делится на два меньшего объема – «I. Природная неопределенность в ЭГС» и «II. Природно-техногенная неопределенность в ЭГС».

На следующем, более низком по объему уровне в каждом из этих понятий выделяются еще по два понятия меньшего объема – «внешняя неопределенность» и «внутренняя неопределенность», первая из которых обусловлена внешними причинами и влияниями на ЭГС, а вторая – внутренними процессами, происходящими в пределах ЭГС. Таким образом, на третьем уровне выделяется следующие четыре понятия: 1) «внешняя природная неопределенность в ЭГС»; 2) внутренняя природная неопределенность в ЭГС»; 3) «внешняя природно-техногенная неопределенность в ЭГС»; и 4) «внутренняя природно-техногенная неопределенность в ЭГС».

Далее на четвертом уровне понятия неопределенности в ЭГС подразделяются по природе обуславливающих их процессов на категории еще меньшего объема. При этом они могут быть двух типов: а) случайные или стохастические, имеющие вероятностный

характер; б) неслучайные или 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 в виде классификаций, используя различные признаки, характеризующие те или иные стороны неопределенности [5].

Среди возможных классификаций, на наш взгляд, наиболее естественными выглядят классификации, построенные по следующим критериям: 1) по происхождению неопределенности; 2) по отношению неопределенности к изучаемой ЭГС; 3) по природе неопределенности; 4) по источнику неопределенности; а также 5) по степени (мере) неопределенности и др. 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 том числе 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 ЭГС [21] также можно выделить ряд специфических неопределенностей, обусловленных отдельными составляющими ЭГС.

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 факторы) и нестохастической природы (неслучайные факторы). В дальнейшем и стохастические и нестохастические факторы могут быть подвергнуты последующему уточнению и разделению в соответствии со степенью (мерой) неопределенности каждого из них (рис. 2).



Рис.2. Классификация неопределенных факторов, описывающих ЭГС, по их природе

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 , характеризующей процесс, 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 $P\{x < \zeta \leq y\} = f(y) - f(x)$, то есть вероятность того, что случайная величина ζ примет значение, превосходящее x , но не превосходящее y , где $x \leq y$, равна $f(y) - f(x)$.

Если известно, что событие произойдет наверняка, то такое событие называется достоверным и его вероятность полагается равной 1. Если же известно, что событие никогда не произойдет, то такое событие 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», так как, зная закон распределения случайной величины и пользуясь формулами теории вероятностей, можно вычислить все характеристики процесса, среди которых наиболее важными являются математическое ожидание $M\zeta = \int x df(x)$ и дисперсия $D\zeta = \int (x - M\zeta)^2 df(x)$.

Во втором 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 (Пуассоновское, нормальное и др.), но неизвестными его параметрами; 2) с неизвестным типом распределения.

Статистическая неопределенность имеет более выраженный характер неопределенности, по сравнению со стохастической. При этом статистическая неопределенность 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 *неслучайным* 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 не применимы. Нестохастическая неопределенность это неизвестность, обусловленная недостаточностью или полным отсутствием информации о процессе.

Для описания неопределенных факторов нестохастической природы иногда используют теорию нечетких множеств, в которой вводятся нечеткие переменные, определяемые как тройки $\langle \alpha, X, A \rangle$, где α – имя переменной, X – область определения, A – нечеткое множество на X , характеризующееся набором функций принадлежности $\mu_A(x)$. 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) и 2) с неизвестными функциями принадлежности.

Нестохастическая неопределенность имеет более выраженный характер неопределенности, по сравнению со статистической, и тем более со стохастической. При этом нестохастическая неопределенность 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 применяют затем аппарат теории вероятностей. Однако надо иметь в виду, что при использовании субъективных вероятностей некоторые утверждения 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).



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

На первом уровне пирамиды выделяются: «I. Случайные неопределенные факторы» и «II. Неслучайные (нестохастической природы) неопределенные факторы» - понятия наибольшего объема. На следующем более низком уровне выделяются понятия меньшего объема, но более содержательные по степени неопределенности, а именно: «1. Стохастическая неопределенность», «2. Статистическая неопределенность», «3. Неопределенность с известными функциями принадлежности» и «4. Неопределенность с неизвестными функциями принадлежности». При уточнении и логическом делении понятий «стохастическая неопределенность» и «статистическая неопределенность» 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 известным его типом (видом)» и «2б». Статистическая неопределенность, при которой ничего не известно о законе распределения случайной величины».

По *источнику возникновения* неопределенности в ЭГС можно выделить следующие виды неопределенностей (табл. 1):

Таблица 1

Виды неопределенностей по источнику возникновения в ЭГС

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

- 1) неопределенность, связанная с недостаточной изученностью явлений в ЭГС;
- 2) неопределенность ответных реакций в ЭГС;
- 3) неопределенность восстановительных процессов ЭГС;
- 4) метрологическая неопределенность;
- 5) неопределенность, связанная с невозможностью получения информации;
- 6) временная неопределенность;
- 7) экономическая неопределенность;
- 8) политическая неопределенность.

Дадим краткий комментарий к основным видам неопределенностей, фигурирующим в таблице 1. 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 и влияния геомагнитного поля на биосферу и т.п. К этому же виду неопределенностей можно отнести и недостаточную изученность экологических функций литосфера [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 геологических исследований и экологической геологии. При этом получение необходимой информации во многих случаях позволяет оценивать состояние ЭГС на базе детерминированных закономерностей.

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

Неопределенность восстановительных процессов в ЭГС имеет важнейшее 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. Эта неопределенность проявляется в множественности как путей перехода, так и в множественности новых качеств ЭГС, а также в случайности их реализации. С этим видом неопределенности исследователь сталкивается всякий раз, например, оценивая устойчивость ЭГС при техногенных воздействиях.

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

Неопределенность, связанная с невозможностью получения информации об ЭГС и ее компонентах – также один из распространенных видов неопределенностей, с которыми сталкивается экогеолог или геэколог. 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 сроки проявления событий, место и их сила 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 неопределенность, обусловленную неопределенным развитием во времени техногенеза, техносферы, вероятностным характером научно-технического прогресса в целом.

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

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.

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

1. Нулевая степень – отражает отсутствие неопределенности, система полностью определена на базе детерминированных закономерностей. Является чаще всего допущением, принимаемым для упрощения расчетов.
2. Квазидетерминированная неопределенность – система определена лишь частично.
3. Стохастическая неопределенность классического типа.
4. Неопределенность с известным типом распределения, но неизвестными параметрами.
5. Неопределенность с неизвестной функцией распределения при достаточно большой накопленной статистике.
6. Неопределенность с неизвестной функцией распределения при малой накопленной статистике.
7. Нестохастическая неопределенность, исключающая вероятностные закономерности.

Таким образом, исходя из 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 методы.
- Методы теории нечетких множеств.
- Методы теории принятия решений и теории игр.
- Методы теории распознавания образов.
- Эвристические методы.

Вероятностно-статистический метод позволяет оценить вероятность возможной реализации процесса в пределах ЭГС в условиях неопределенности, чаще всего, случайной природы. Основные ограничения метода 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 геологии, так и в экологической геологии. Различные методики прогнозирования в зависимости от имеющейся исходной информации об особенностях ЭГС в условиях неопределенности делятся на следующие:

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

Метод теории нечетких множеств состоит в том, что в отличие от классической теории множеств функции принадлежности $\mu_A(x)$ могут принимать не только значения 0 (если x не принадлежит множеству A) или 1 (если x принадлежит множеству A), но и произвольное значение 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.

Дополнительно к вероятностно-статистическому методу и методу теории нечетких множеств могут быть использованы математические методы теории принятия решений и теории игр, методы теории распознавания образов, а также эвристический метод.

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

Методы теории распознавания образов позволяют классифицировать ЭГС в условиях неопределенности или их компоненты, а также картографические модели ЭГС по некоторым категориям и классам, основанных на прецедентах - ранее классифицированных объектах, принимаемых, как образец 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 ЭГС носят, как правило, случайный характер и развиваются в условиях неполноты (вплоть до ее отсутствия) объективной информации о причинах их возникновения и способах функционирования под влиянием недостаточно контролируемых и неопределенных факторов. В этом случае говорят о развитии ЭГС в условиях неопределенности.

Введено понятие «неопределенность в ЭГС» и дано его определение.

Исходя из проведенного анализа неопределенностей в ЭГС, предложены возможные варианты систематизации неопределенных факторов в ЭГС (в соответствии с природой неопределенности, с происхождением и с источником неопределенности, а также в соответствии со степенью их выраженности 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 / Дальневост. мат. 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 / Под редакцией В.Т.Трофимова // Колл. авторов: Трофимов В.Т., Королёв В.А., Харькина М.А. и др. - 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. - 2-е изд., испр. - М.: Изд. центр «Академия», 2008. - 368 с.
6. Горский и др. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. - М.: Экономика и информатика, 2002. - 260 с.
7. Дубров А.М. Моделирование рисковых ситуаций в экономике и бизнесе. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 176 с.
8. Космическое землеведение: информационно-математические основы / Под. ред. В.А. Садовничего. – М: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 571 с.
9. Кузьмин И.И., Махутов Н.А., Хетагуров С.В. Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты. - СПб.: СПб. гос. ун-т 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.: Издательская фирма «КРУК», 2003. – 320 с.
15. Руководство по гидрологическим прогнозам: Вып.1: Долгосрочное прогнозирование элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 357 с.
16. Савчук В. П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. - М.: Наука, 1989. – 328 с.

-
17. Свирежев 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. и др. 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 Моск. ун-та .Серия 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.

Выходные данные: *Инженерная геология*. 2013. № 6. С. 56–62.