
**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 624.131

**АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

© 2015 г. В. В. Пендин, Д. Д. Шубина

*Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе,
ул. Миклухо-Маклая д. 23, Москва, 117997 Россия.
E-mail: pendin@yandex.ru, ddshubina@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.05.2014 г.

Рассмотрена разница в аспектах оценки сложности инженерно-геологических условий, даны методические рекомендации по использованию комплексной количественной оценки и мер теории информации для расчета категорий сложности инженерно-геологических условий.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, сложность инженерно-геологических условий, комплексная количественная оценка, энтропия.

Первый и наиболее важный вопрос, возникающий при назначении видов и объемов работ на всех стадиях инженерно-геологических изысканий, – вопрос о сложности условий изучаемого объема литосферы. Сам термин “сложность инженерно-геологических условий” можно рассматривать в нескольких аспектах. Во-первых, насколько сложны данные условия для предполагаемого вида хозяйственной деятельности, например, сложность инженерно-геологических условий для гидротехнического или гражданского строительства будет различной, более того, сложность одних и тех же инженерно-геологических условий может быть различной для разных типов сооружений. Во-вторых, сложность инженерно-геологических условий одного и того же объема литосферы будет различна для трех стадий существования объекта: его строительства, эксплуатации и ликвидации. В-третьих, сложность условий можно оценить собственно для производства изысканий – она будет зависеть от неоднородности изучаемой среды.

В настоящее время сложность инженерно-геологических условий определяется согласно обязательному приложению СП 47.13330.2012 по совокупности факторов инженерно-геологических условий (ИГУ). Помимо обозначенных выше различий в аспектах, относительно которых оценивается сложность инженерно-геологических условий, существует еще один недостаток такой оценки: факторы ИГУ взаимообуславливают друг друга и их следует рассматривать как систему.

К тому же, действуя согласно нормативной таблице, можно неоправданно завысить категорию сложности ИГУ, если хотя бы один из показателей относится к более высокой категории. М.А. Солодухиным [5] было предложено оценивать сложность инженерно-геологических условий в баллах. Такой подход позволил бы более детально и точно выделять категории сложности инженерно-геологических условий, но и он имеет ряд недостатков, основные из которых – субъективность, неизбежная при балльной оценке, и недоучет взаимообусловленности всех компонентов инженерно-геологических условий [1].

На рис. 1 представлены идеализированные примеры различия в аспектах оценки сложности инженерно-геологических условий. Толща слабых по несущей способности грунтов (например, торфа, см. рис. 1а) – плохое основание для сооружения, однако такие инженерно-геологические условия нельзя считать сложными для проведения изысканий, так как состав и свойства однородные. Обратный пример – складчатое кристаллическое основание не осложняет функционирование сооружения, но из-за своей неоднородности такие условия нельзя считать простыми для проведения изысканий (рис. 1б).

В целом сложность ИГУ – очень важное свойство при расчете всех параметров работ и в конечном итоге стоимости проводимых изысканий, поэтому было бы наиболее целесообразно не назначать категорию сложности, а рассчитывать ее, согласно целевому назначению и стадии работ.

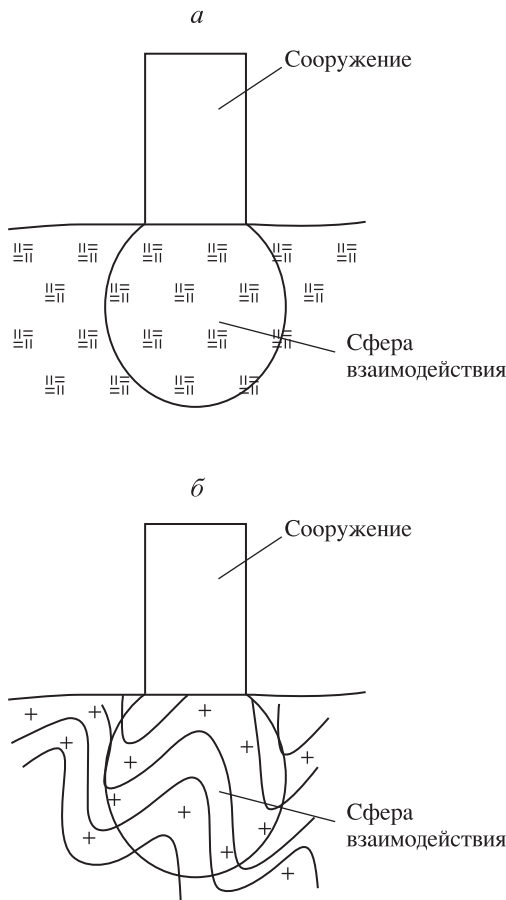


Рис. 1. Сооружение на: *a* – однородной толще слабых по несущей способности грунтов основания, *б* – неоднородных складчатых скальных грунтах основания.

К тому же применение для решения этой задачи математического аппарата позволит избежать субъективного отношения к оценке сложности ИГУ. Традиционно для оценки ИГУ пользуются содержательным геологическим анализом и качественным прогнозом взаимодействия проектируемых сооружений с приповерхностной частью литосферы. Авторам представляется наиболее

оптимальным использовать в качестве основы расчета категории сложности инженерно-геологических условий аппарат комплексной количественной оценки, который основан на использовании определенных математических функций для корректного решения инженерно-геологических задач. К математической базе, используемой при осуществлении комплексной количественной оценки инженерно-геокриологических условий, относится аппарат теории случайных функций, анализ цепей Маркова, множественный регрессионный и корреляционный анализы. Рациональное сочетание вербального описания взаимодействия сооружения с приповерхностной частью литосферы и строгих математических методов позволит осуществить комплексную количественную оценку инженерно-геологических условий. Особенности комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий состоят, во-первых, в строгом определении цели оценки, не допускающем двойного ее толкования (в обоснованном выборе так называемого целевого предиката), и, во-вторых, в системном подходе к изучению инженерно-геологических условий, который реализуется в построении содержательной концептуальной модели. Содержательная концептуальная модель – это схематизированное представление системы “сооружение – сфера взаимодействия”, в котором необходимо выделить главные взаимосвязи между компонентами системы и наиболее значимые из них, затем анализировать процесс функционирования системы, например см. рис. 2.

Как было сказано выше, сложность одних и тех же условий для разных типов хозяйственной деятельности может быть различной. Если основная задача хозяйственной деятельности – строительство и безаварийное функционирование конкретного сооружения, то комплексная количественная оценка инженерно-геологиче-

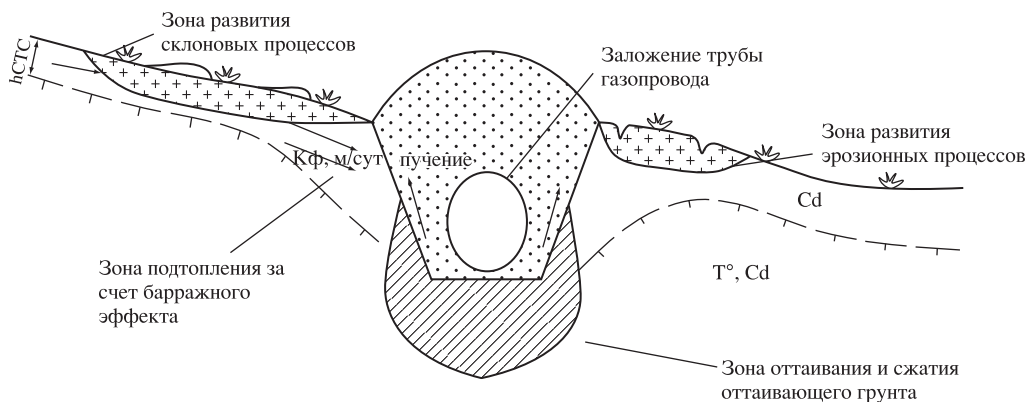


Рис. 2. Схема конструкции литотехнической системы “трубопровод – мерзлый грунт”.

ских условий осуществляется относительно тех показателей, которые характеризуют состояние сооружения, т.е. в качестве целевого предиката можно выбрать величины деформаций сооружения, коэффициенты удорожания строительства, меры пораженности территории негативными инженерно-геологическими процессами и т.д. Результатом комплексной количественной оценки является расчет интегрального показателя ИГУ, построение модели его поля и его геологическая интерпретация. Следует уточнить, что для осуществления комплексной количественной оценки ИГУ все показатели этих условий, а также целевые предикаты должны быть выражены в *количественной* форме. Потенциально существует возможность представить любую геологическую информацию в численном виде [3].

В качестве примера применения метода комплексной количественной оценки ИГУ с помощью интегрального показателя осуществлено функциональное районирование участка трассы железной дороги Обская – Бованенково. Рассматриваемый объект располагается на п-ве Ямал в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Строительство линейных сооружений в криолитозоне требует значительных материальных затрат, которые возрастают прямо пропорционально сложности инженерно-геологических условий, а природные условия тундры очень чувствительны к любому рода техногенным взаимодействиям. Наиболее сильно осложняет эксплуатацию системы развитие негативных экзогенных процессов, в частности, термокарста и заболачивания. Поэтому цель оценки – районирование территории на основе прогноза развития негативных экзогенных геологических процессов. В качестве целевого предиката выбрано приращение площади, пораженной негативными ЭГП, поскольку этот показатель напрямую влияет на условия и стоимость эксплуатации железной дороги, а также отражает условия окружающей среды. Любые взаимодействия с окружающей средой неизбежно находят проявления в инженерно-геологических процессах, поэтому для их предотвращения проектом предусмотрены определенные конструктивные особенности: отсыпка полотна твердомерзлым грунтом и сохранение его отрицательной температуры на протяжении периода эксплуатации для предупреждения отепляющего воздействия; сооружение водопропускных труб для устранения барражного эффекта; сооружение специальных дорог для передвижения строительной техники для сохранения целостности почвенного покрова и предотвращения термокарста и прочие. Тем не менее процессы

заболачивания и термокарста получили широкое распространение практически по всей протяженности трассы. На интенсивность развития данных процессов наиболее сильно влияют следующие показатели компонентов инженерно-геологических условий:

- геоморфологические особенности территории: расчлененность рельефа, глубина до базиса эрозии, уклон рельефа;
- литологический состав пород (коэффициент дисперсности отложений первого от поверхности ИГЭ);
- геокриологические условия: глубина до кровли многолетнемерзлых пород, льдистость за счет ледяных включений, устойчивость (температура) многолетнемерзлых пород.

Расчлененность рельефа обратно пропорционально связана с заболачиванием, поскольку дренированность территории способствует отводу влаги. Соответственно, чем больше расчлененность рельефа, тем ниже риск образования болота (при прочих равных условиях). Глубина до базиса эрозии взаимосвязана с предыдущим показателем и также связана обратно пропорционально с целевым предикатом: чем больше глубина до базиса эрозии, тем ниже вероятность заболачивания. Это обуславливается тем, что большая глубина до базиса эрозии создает больший градиент потока, и скорость течения жидкости увеличивается.

Коэффициент дисперсности отражает литологический состав пород. Чем выше коэффициент дисперсности, тем более глинистыми являются грунты, соответственно ниже их фильтрационные свойства и выше возможность заболачивания. Таким образом, здесь имеется прямая зависимость с целевым предикатом.

Многолетнемерзлые породы – фактический водоупор для вод сезонно-талого слоя, поэтому глубина до кровли многолетнемерзлых пород имеет обратную связь с целевым предикатом, т.е. чем глубже они залегают на данном участке, тем ниже скорость заболачивания.

Льдистость за счет ледяных включений имеет прямую взаимосвязь с развитием термокарста и заболачивания, так как чем больше ледяных включений содержится в породе, тем интенсивнее будет происходить протаивание и просадка.

Температура многолетнемерзлых пород на глубине нулевых колебаний температур характеризует устойчивость мерзлоты. Чем она ниже, тем ниже скорость развития термокарста.

Применение аппарата математического анализа к какой-либо природно-технической системе возможно только когда система имеет соответствующие координаты – параметры природно-технической системы, выраженные в количественной форме [2]. Потенциально существуют способы количественного выражения каждого параметра, в той или иной мере характеризующего систему. Для наиболее важных из них предложено множество различных способов количественного выражения. Рассмотрим некоторые из них, касающиеся линейных сооружений в криолитозоне.

Литологический состав пород. Принимая во внимание тот факт, что породы интересующей толщи имеют осадочный генезис, наиболее удобной и наглядной количественной характеристикой выражения литологического состава будет коэффициент дисперсности отложений (C_d) [3]. Он представляет собой средневзвешенную по мощности приведенную плотность частиц грунта различных литологических разностей пород и вычисляется по формуле:

$$C_d = \frac{\sum \rho_{si}^* \cdot m_i}{\sum m_i},$$

где m_i – мощность i -й литологической разности в разрезе, ρ_{si}^* – приведенное среднее значение плотности частиц грунта, вычисляемое по формуле $\rho_{si}^* = (\rho_{si} - 2.60) \cdot 100$, где ρ_{si} – плотность частиц грунта. Плотность частиц – наименее изменчивый показатель, является по сути плотностью порообразующих минералов и отражает петрографический состав пород. Приведенные значения плотности частиц грунта для четырех основных литологических разностей данной на изучаемой территории сведены в таблицу.

Коэффициент дисперсности позволяет сравнивать литологический состав пород различных разрезов или стратиграфо-генетических комплексов не визуальным, а с использованием статистических критериев [3, 4].

Значения приведенной плотности частиц грунта для различных литологических разностей

Литологические разности	Плотность частиц грунта, г/см ³	Приведенная плотность частиц грунта, г/см ³
Песок	2.65	5
Супесь	2.67	7
Суглинок	2.70	10
Глина	2.72	12

В приведенной таблице отсутствует такая литологическая разность, как торф. Мощность слоя торфа свидетельствует о наличии и возрасте болота. Здесь следует уточнить важную особенность криолитозоны – интенсификация процесса заболачивания происходит намного быстрее, чем развитие процесса “с нуля”. Поэтому такой компонент инженерно-геологических условий, как *наличие болота и его возраст*, предлагается рассматривать отдельно от литологического состава, его количественное отображение – мощность слоя торфа в метрах.

Геоморфологические особенности территории наиболее легко поддаются количественному выражению. В качестве показателя *расчлененности рельефа* целесообразно использовать энтропию абсолютных отметок, вычисляемую по формуле

$$P = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \lg P_i.$$

Размерность энтропии зависит от основания логарифма. При использовании десятичного логарифма энтропия измеряется в хартли [1]. Чем ниже значение энтропии, тем поверхность менее расчлененная.

Уклон рельефа (показатель крутизны земной поверхности) наиболее просто вычислить по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h \cdot \sum l}{S},$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – средний уклон земной поверхности в пределах i -го квадрата; h – высота сечения рельефа горизонталями; $\sum l$ – сумма длин горизонталей по площади квадрата, S – площадь квадрата.

Глубина до базиса эрозии – есть разница высотных отметок исследуемого квадрата и ближайшей по направлению максимального изменения уклона точки естественной дрены (оврага, временного или постоянного водотока).

Геокриологические условия в основном также не требуют определенных приемов и выражаются просто. В частности, *глубина до кровли многолетнемерзлых пород* – мощность сезонно-талого слоя, а *степень устойчивости мерзлоты* – температура многолетнемерзлых грунтов на глубине нулевых колебаний температур. Эти данные получают в процессе инженерно-геокриологической съемки. Остальные показатели относятся к физическим свойствам мерзлых грунтов, которые получают в процессе лабораторных исследований.

Также следует отметить, что именно количественное выражение компонентов инженерно-

геологических условий позволяет применять ГИС-технологии для расчетов, моделирования, районирования и картирования.

После того как определены геологические параметры – координаты системы, следует произвести построение предсистемных моделей, отражающих региональные и локальные особенности пространственной изменчивости каждого компонента инженерно-геологических условий. Для линейных сооружений такие модели будут иметь вид графиков изменчивости параметра по оси сооружения, по которым удобно определять региональные максимальные и минимальные значения параметров инженерно-геологических условий, дать геологическую интерпретацию распределения величин, выбраковать очевидно неверные показатели [3]. Далее производят построение экспериментальной основы поля геологического параметра, получая его модель по выбранной программе на ЭВМ, оценивают качество аппроксимации выбранной функцией и производят геологическую интерпретацию полученных результатов. При построении экспериментальной основы моделируемую территорию разбивают на квазиоднородные области, каждой из которых можно поставить в соответствие одно значение показателя компонента инженерно-геологических условий и определить соответствующую величину целевого предиката. В качестве аппроксимирующей функции обычно используют полиномы различных порядков, а для оценки качества аппроксимации – величину поглощения дисперсии полиномами различных порядков. Если приращение поглощения дисперсии при переходе к более высокой степени полинома незначимо (не превышает 5–10%), можно говорить о достаточной степени приближения модели поля к экспериментальной основе. В процессе геологической интерпретации моделей проводят их содержательный анализ, оценивают соответствие данных геологической гипотезе и на этой основе выявляют закономерности пространственной изменчивости компонентов инженерно-геологической системы (ИГС). На основе опыта функционирования аналогичных сооружений в сходных условиях для выявления системообразующих связей ИГС значения параметров инженерно-геологических условий (независимые переменные) и целевого предиката (зависимая переменная) строят корреляционную матрицу.

С помощью таких обучающих выборок производится оценка важности отдельных компонентов инженерно-геологических условий в комплексной оценке. Используя корреляционную матрицу, мож-

но рассчитать стандартизированные коэффициенты множественной регрессии. А также с помощью корреляционной матрицы вычисляются множественные коэффициенты детерминации и корреляции, которые можно рассматривать как показатели эффективности регрессионной модели и как меру тесноты связи при линейной регрессии [3, 1].

Следующим шагом выполняется “взвешивание” компонентов по вкладу в оценку. Затем выполняется проверка адекватности предложенной содержательной концептуальной модели поставленной цели. Отсутствие такой проверки существенно снижает надежность полученных выводов. Практически это контролируется превышением порогового значения множественного коэффициента корреляции (>0.71), так как при этом поглощается более 50% общей дисперсии целевого предиката.

Необходимая операция для ведения математических расчетов – операция *нормирования* количественных характеристик компонентов с целью приведения их к единой размерности. Наиболее подходящим способом нормирования при комплексной количественной оценке инженерно-геологических условий является отнесение каждой конкретной величины к региональному максимуму. При таком способе нормирования осуществляется дополнительное взвешивание значений того или иного показателя условий в зависимости от его распределения, и все значения заключаются в интервал от 0 до 1 (при этом 0 соответствует наиболее благоприятное значение данного компонента, а 1 – наименее благоприятное).

Завершающий этап – вычисление *интегрально-го показателя инженерно-геологических условий, который представляет собой линейную аддитивную функцию взвешенных по вкладу в оценку нормированных значений компонентов инженерно-геологической системы:*

$$J\Sigma = \sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i^n,$$

где g_i – весовой коэффициент; R_i^n – нормированная оценка i -го компонента инженерно-геологической системы; n – число значащих компонентов инженерно-геологической системы. В качестве целевого предиката может быть использован, например, коэффициент удорожания строительства или пораженность территории негативными геологическими процессами. Все значения $J\Sigma$ благодаря процедуре нормирования будут изменяться от 0 до 1, при этом 0 будут соответствовать максимально благоприятные условия для функционирования сооружения, а 1 – максимально



Рис. 3. Схематическое районирование участка железной дороги по сложности условий функционирования.

неблагоприятные (в зависимости от способа нормирования!). После чего можно будет выделить пять градаций сложности инженерно-геологических условий относительно выбранного целевого предиката.

Этот показатель может служить мерой эмергентности ИГС, поэтому математическую модель его поля можно рассматривать как системную модель инженерно-геологических условий. Модель поля интегрального показателя наряду с предсистемными моделями дает возможность выявить закономерности пространственной изменчивости ИГУ и формально произвести процедуру районирования территории в соответствии с планируемой хозяйственной деятельностью [3, 4]. Пример функционального районирования трассы железной дороги Обская – Бованенково приведен схематически на рис. 3.

Если речь идет о сложности инженерно-геологических условий для проведения изысканий, например, для инженерно-геологической съемки, то основное определяющее категорию сложности литосферы свойство – ее неоднородность. Для характеристики неоднородности могут быть использованы меры теории информации, например, такой показатель, как энтропия. Факторы для оценки энтропии выбираются на основе анализа содержательной концептуальной модели рассматриваемой области литосферы. $H = -\sum p_i \cdot \log p_i$, где p_i – вероятность нахождения i -разновидности в квадрате (параметры сетки квадратов зависят от масштаба съемки, а оптимальные значения количества определений находятся по статистическим критериям). Для расчета энтропии инженерно-геологических условий можно воспользоваться следующими факторами: геоморфологическим уровнем (стратиграфо-генетическим комплек-

сом), литологическим составом пород, типом ландшафта, абсолютными отметками или уклоном поверхности, показателями льдистости пород, мощностью слоя сезонного протаивания и другими составляющими содержательной концептуальной модели. При расчете энтропии возможно использование как количественных, так и качественных показателей, так как основным понятием, используемым в расчетах, является вероятность события (под событием понимается отнесение наблюдаемой точки к какому-либо классу). Если значения какого-либо фактора были измерены точно, то для получения необходимого множества значений по площади квадрата следует построить поле данного геологического параметра в изолиниях (аналогично горизонталям, изображающим рельеф), и под событием следует понимать попадание точки в определенный интервал значений. Значения энтропии по независимым факторам просто суммируются, однако большинство компонентов инженерно-геологических условий тесно взаимосвязаны, поэтому для расчета энтропии в таком случае пользуются следующей формулой

$$H\left(\frac{Y}{x_i}\right) = -\sum_{j=1}^m \frac{P(y_j)}{x_i} \times \log P\left(\frac{y_j}{x_i}\right),$$

где $H\left(\frac{Y}{x_i}\right)$ – условная энтропия компонента Y , при условии что X находится в состоянии x_i ; $P(y_j/x_i)$ – вероятность нахождения объекта Y в состоянии y_j , при нахождении объекта X в состоянии x_i .

Полная условная энтропия системы, состоящей из двух зависимых компонентов определяется по формуле

$$H(Y, X) = H(X) + H\left(\frac{Y}{X}\right).$$



Рис. 4. График изменения полной условной энтропии.

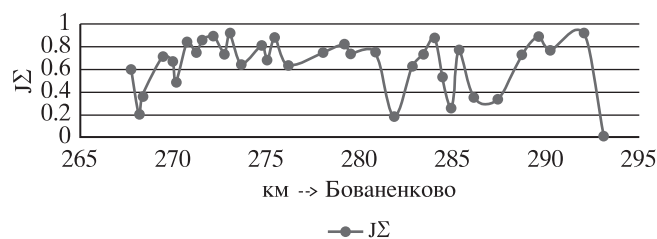


Рис. 5. График изменения интегрального показателя инженерно-геологических условий.

При вычислении энтропии системы, состоящей из большого числа зависимых компонентов, энтропия каждого последующего компонента определяется при условии, что состояние всех предыдущих компонентов определено. После расчета энтропии необходимо нормировать ее значения путем деления на максимум ($H_r = H/H_{max}$), который зависит от количества точек в квадрате. Все множество рассчитанных значений энтропии (где каждому квадрату соответствует свое значение полной относительной энтропии) можно представить в виде поля относительных значений, изменяющихся в интервале от 0 до 1, где нулю соответствуют максимально однородные условия, а единице – максимально неоднородные. При этом можно выделить 5 категорий сложности инженерно-геологических условий: 0–0.2 – весьма простые, однородные; 0.2–0.4 – простые; 0.4–0.6 – средней сложности; 0.6–0.8 – сложные; 0.8–1 – весьма сложные (разнородные) инженерно-геологические условия.

В качестве сравнения для приведенного выше участка железнодорожной ветки, с районированием по типу функционирования литотехнической системы “железнодорожное полотно – многолетнемерзлые грунты”, рассчитана энтропия инже-

нерно-геологических условий с использованием в расчетах всего трех факторов: геоморфологического уровня, литологического состава пород и типа ландшафта.

График изменения полной условной энтропии на участке трассы 267–290 км приведен на рис. 4. График интегрального показателя инженерно-геологических условий, рассчитанного на основе комплексной количественной оценки, приведен на рис. 5.

ВЫВОДЫ

1. Сложность инженерно-геологических условий определяется аспектом, относительно которого она оценивается.
2. Учитывая важность сложности инженерно-геологических условий, ее следует не декларировать, а рассчитывать.
3. Сложность одних и тех же инженерно-геологических условий для функционирования сооружения и производства изысканий может быть полностью различна. Это видно из графиков полной условной энтропии и интегрального показателя инженерно-геологических условий, которые плохо коррелируются между собой, что доказывает принципиальную разность в аспекте оценки сложности инженерно-геологических условий: для строительства и функционирования сооружений или для проведения изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вистелуус А.Б. Основы математической геологии. Л.: Наука, 1980. 389 с.
2. Пендин В.В. К вопросу оценки сложности инженерно-геологических условий // Инж. геология. 1991. № 4. С. 133–137.
3. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. М.: КДУ, 2009. С. 71–96, 244–254.
4. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО “ПНИИИС”, 2009. С. 21–23.
5. Солодухин М.А. Категории сложности инженерно-геологических работ // Инж. геология. 1990. № 4. С. 107–112.

THE ASPECTS OF ASSESSING COMPLEXITY OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS

V. V. Pendin, D. D. Shubina

*Russian State Geological Prospecting University, ul. Miklukho-Maklaya 23,
Moscow, 117997 Russia. E-mail: pendin@yandex.ru, ddshubina@gmail.com*

The article considers different aspects of assessing the engineering-geological conditions complexity. Methodical recommendations are given on using the integrated quantitative assessment and information theory measures for calculating the complexity of engineering geological conditions.

Keywords: *engineering geological conditions, the complexity of engineering geological conditions, integrated quantitative assessment, entropy.*