

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

PROBABILITY-STATISTIC ESTIMATION OF GEOLOGICAL ENGINEERING CONDITIONS FOR SPECIAL ZONING

СЕРЕДИН В.В.

Заведующий кафедрой инженерной геологии Пермского государственного университета, д.г.-м.н., профессор, nedra@nedra.perm.ru

ГАЛКИН В.И.

Заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского государственного технического университета, д.г.-м.н., профессор, Vgalkin@pstu.ru

ПУШКАРЕВА М.В.

Профессор кафедры охраны окружающей среды Пермского государственного технического университета, д.мед.н., pushkareva@nedra.perm.ru

ЛЕЙБОВИЧ Л.О.

Директор департамента экологии научно-исследовательского, проектного и производственного предприятия по природоохранной деятельности «Недра», к.т.н., leibovich@nedra.perm.ru

СМЕТАНИН С.Н.

Инженер-геолог научно-исследовательского проектного и производственного предприятия по природоохранной деятельности «Недра», nedra@nedra.perm.ru

SEREDIN V.V.

The head of the department of geological engineering of Perm State University, doctor of geological-mineralogical sciences, professor, nedra@nedra.perm.ru

GALKIN V.I.

The head of the department of oil-and-gas geology of Perm State Technical University, doctor of geological-mineralogical sciences, professor, Vgalkin@pstu.ru

PUSHKAREVA M.V.

A professor of the department of environmental protection of Perm State Technical University, doctor of medical sciences, pushkareva@nedra.perm.ru

LEIBOVICH L.O.

The director of the ecology department of the Research, Design and Production Enterprise for Nature Conservation Activity «Nedra», candidate of technical sciences, leibovich@nedra.perm.ru

SMETANIN S.N.

A geological engineer of the ecology department of the Research, Design and Production Enterprise for Nature Conservation Activity «Nedra», nedra@nedra.perm.ru

Ключевые слова:

вероятностно-статистические методы; инженерно-геологическое районирование; геологический признак; таксон; ранжирование; классификационный показатель; модель «геологическая среда — сооружение».

Key words:

probability-statistic methods; engineering-geological zoning; geological feature; taxon; ranking; classification indicator; the system «geological environment — construction».

Аннотация

В статье предложен метод вероятностно-статистической оценки инженерно-геологических условий для задач специального районирования, которое предполагает разделение исследуемого участка на таксономические элементы, характеризующиеся внешними различиями и внутренней общностью инженерно-геологических условий. Представлены результаты апробирования предложенной методики на конкретном объекте, реализованные в виде проектных решений.

Для рационального освоения какой-либо территории следует проводить оценку ее инженерно-геологических условий и на этой базе выполнять районирование (под которым понимается разделение исследуемого участка на соподчиненные таксономические элементы, характеризующиеся внутренней общностью и внешними различиями этих условий).

Анализ исследований в этой области показал, что результаты районирования не всегда сопоставимы между собой [2, 3, 4]. Это обусловлено, прежде всего, субъективизмом в выборе классификационного показателя и тем, что оценка инженерно-геологических условий часто производится в основном только на качественном уровне [1].

В данной работе изложена методика районирования, основанная на формализованном (вероятностном) подходе к оценке инженерно-геологических условий.

В методическом плане районирование начинается с составления модели «геологическая среда — сооружение», которая представляет собой совокупность геологических признаков, оказывающих существенное влияние на устойчивость сооруже-

Abstract

The article offers a method of probability-statistic estimation of geological engineering conditions for special zoning purposes (the zoning means that a survey area is divided into taxon elements which are characterized by external distinctions and internal generality of geological engineering conditions). The paper presents the results of approbation of the proposed method for a concrete object realized in the form of project solutions.

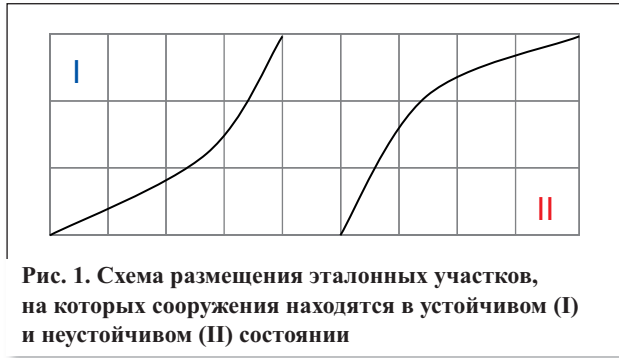


Рис. 1. Схема размещения эталонных участков, на которых сооружения находятся в устойчивом (I) и неустойчивом (II) состоянии

ний. Затем путем экспертных оценок, методами корреляционного или дисперсионного анализа производится ранжирование и отбор геологических признаков, которые будут использоваться при районировании в дальнейшем.

После этого выбираются эталонные участки, на которых сооружения находятся в устойчивом (I) и неустойчивом (II) состоянии (рис. 1), и составляются выборки для этих участков по каждому геологическому признаку. Отбраковка «выделяющихся» значений и проверка гипотезы о соответствии распределения исследуемых величин нормальному закону проводится по стандартным методикам [1].

Затем для каждого исследуемого геологического признака находится интервальная вероятность P^i , под которой понимается вероятность, с которой точка наблюдения относится либо к первому эталонному участку (P^I), либо ко второму (P^{II}). Для этого выполняется следующая последовательность операций: рассчитывается длина интервала по наблюдениям для каждой из двух выборочных совокупностей, определяется частота попадания в эти интервалы наблюдений выборок I и II, рассчитывается P^i . Это позволяет оценить геологические признаки через вероятность, т.е. формализовать инженерно-геологические условия.

По значениям интервальных вероятностей для каждого эталонного участка строится график: по оси абсцисс откладываются значения исследуемого геологического признака x , а по оси ординат — вероятность отнесения их к первому (P^I) или второму (P^{II}) эталонному участку. На рисунке 2 представлен график P^I в зависимости от численного значения геологического признака x .

На практике довольно часто встречаются случаи, когда численные значения геологического признака варьируют незначительно, поэтому и значения интервальных вероятностей не дают возможности отнести точки опробования к тому или иному эталонному участку, т.е. в любой точке наблюдения $P^I_x < 0,5$ (см. рис. 3). Такие геологические признаки следует исключать из расчетов.

Достаточно часто встречаются случаи, когда ни один из геологических признаков в отдельности не дает возможности надежно классифицировать подобласти по эталонным участкам (рис. 4). В этом случае необходимо усилить сигнал, что достигается путем включения в расчеты нескольких геологических признаков, т.е. осуществляется вы-

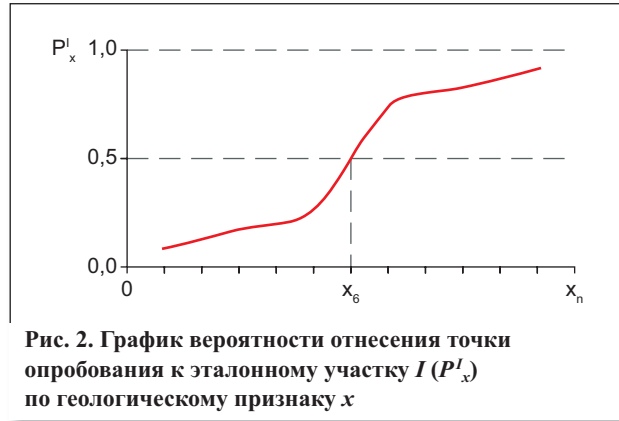


Рис. 2. График вероятности отнесения точки опробования к эталонному участку I (P^I_x) по геологическому признаку x

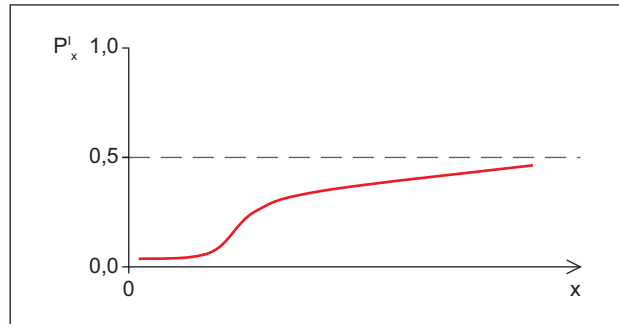


Рис. 3. График вероятности отнесения точки опробования к эталонному участку I (P^I_x) по геологическому признаку x в случае, когда численные значения геологического признака варьируют незначительно

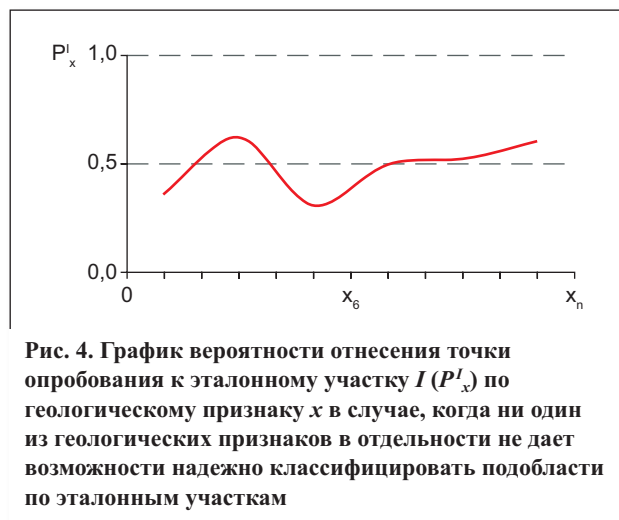


Рис. 4. График вероятности отнесения точки опробования к эталонному участку I (P^I_x) по геологическому признаку x в случае, когда ни один из геологических признаков в отдельности не дает возможности надежно классифицировать подобласти по эталонным участкам

ход на интегральный (обобщенный) показатель $P_{общ}$, который выступит в качестве классификационного. Общую вероятность отнесения точки опробования к эталонному участку I ($P^I_{общ}$) можно рассчитать по следующей формуле:

$$P^I_{общ} = \frac{P^I_x \cdot P^I_y \cdot P^I_z}{P^I_x \cdot P^I_y \cdot P^I_z + (1 - P^I_x) \cdot (1 - P^I_y) \cdot (1 - P^I_z)} \quad (1)$$

где P^I_x, P^I_y, P^I_z — вероятности отнесения точки опробования к эталонному участку I по геологическим признакам x, y, z , участвующим в расчете.

Подчеркнем еще раз, что $P^I_{общ}$ при районировании используется как классификационный показатель, который по своей природе является веро-

Таблица 1

Пример модели районирования					
Таксон первого уровня	Состояние объекта	$P_{\text{общ}}$	Таксон второго уровня	Состояние объекта	$P''_{\text{общ}}$
I	Устойчивое	$> 0,5$	I ^a	Весьма устойчивое	$> 0,5$
			I ^b	Устойчивое	$\leq 0,5$
II	Неустойчивое	$\leq 0,5$	II ^b	Малоустойчивое	$> 0,5$
			II ^c	Неустойчивое	$\leq 0,5$

ятностной характеристикой инженерно-геологических условий территории исследований.

При некоем граничном значении классификационного показателя $P_{\text{общ}}$ происходит качественное изменение состояния объекта исследований, например, когда сооружение переходит из устойчивого состояния в неустойчивое. Граничные величины $P_{\text{общ}}$ определяются и уточняются исходя из задачи исследований. Однако при специальном районировании можно предложить следующий подход: при $P^I_{\text{общ}} > 0,5$ точку наблюдения относят к первому, а при $P^I_{\text{общ}} \leq 0,5$ — ко второму эталонному участку (I уровень). В том случае, когда для выделенных участков (таксонов) требуется провести более детальное деление, т.е. выделить таксоны более низкого порядка, снова проводятся расчеты по описанному выше алгоритму, при этом используют $P^{II}_{\text{общ}}$ второго уровня.

На основании граничных значений классификационного показателя $P_{\text{общ}}$ разрабатывается модель районирования (в табл. 1 представлен пример такой модели для оценки устойчивости трубопровода) и определяется величина этого показателя для каждой точки наблюдения. Затем путем использования модели районирования и численных значений $P_{\text{общ}}$ по всей территории исследований производится выделение таксонов и их описание.

Следует отметить, что очень важным этапом районирования является получение исходных данных, прежде всего определение схемы расположения точек опробования, а также получение информации для каждой из них. Схема их расположения должна быть регулярной. Из рисунка 5 видно, что все рассматриваемые подобласти имеют одинаковую площадь ($S_1 = S_2 = \dots = S_n$) и одинаковую плотность точек опробования ($n_1 = n_2 = \dots = n_n$). Кроме того, каждая подобласть исследуемой территории (в т.ч. и эталонные уча-

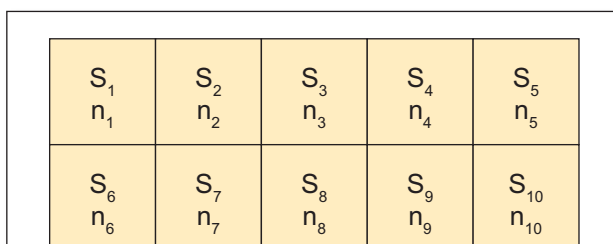


Рис. 5. Схема опробования, где S — площадь подобласти опробования; n — количество точек опробования в каждой подобласти

стки) должна иметь численную информацию по геологическим признакам.

Апробация предложенной методики районирования проводилась по результатам изысканий на участке «ПК145 — ПК263» (протяженностью 118 км) трассы строящегося нефтепровода «Восточная Сибирь — Тихий океан». Целью исследований была оценка инженерно-геологических условий на данном участке в отношении степени надежности работы указанного объекта.

Анализ природно-техногенной системы «трубопровод — массив грунта» показал, что надежная работа нефтепровода во многом определяется состоянием его тела, которое, в свою очередь, связано с величинами деформаций грунтового основания. Напомним, что эти деформации контролируются литологией и геологическими процессами (карстовыми, суффозионными, эрозионными, оползневыми и др.).

В процессе изысканий было установлено, что исследуемый участок сложен различными типами грунтов, которые подвержены в основном карстовым и оползневым процессам (а эрозионным — в меньшей степени). Поэтому из всего комплекса инженерно-геологических условий трассы трубопровода для решения поставленной задачи были выделены следующие ведущие геологические признаки: мощность глинистых и крупнообломочных грунтов; глубина залегания кровли некарстующихся и карстующихся грунтов; крутизна склонов земной поверхности; абсолютные отметки кровли карстующихся грунтов и земной поверхности; плотность, пористость и прочность на сжатие скальных грунтов, залегающих в основании трубопровода. Численные значения каждого из этих признаков определялись в каждой пикетной точке (всего было 118 точек опробования).

Исследования показали, что в отношении работы нефтепровода инженерно-геологические условия наиболее благоприятны на отрезках «ПК151 — ПК169» и «ПК213 — ПК223», которые были приняты за эталонный участок I. В основании здесь залегают малодеформируемые некарстующиеся грунты.

Отрезок «ПК235 — ПК253» характеризуется неблагоприятными инженерно-геологическими условиями (здесь в основании трубопровода залегают карстующиеся грунты), поэтому он был принят за эталонный участок II.

Для выделенных эталонных участков рассчитывались интервальные вероятности по таким признакам, как: (1) мощность глинистых ($m_{\text{гл}}$) и

Таблица 2

Определение интервальной вероятности для эталонных участков по признаку «крутизна склонов земной поверхности» (α)							
Интервал исследуемого признака h , град.	Частота m для эталонного участка		Частота $f = m^* / n$ для эталонного участка			Интервальная вероятность	
	I	II	I	II	I+II	P^I_α	P^{II}_α
0–5	12	1	0,42	0,05	0,47	0,91	0,09
5–0	6	1	0,21	0,05	0,26	0,82	0,18
10–15	6	1	0,21	0,05	0,26	0,82	0,18
15–20	2	1	0,08	0,05	0,13	0,61	0,49
20–25	1	1	0,04	0,05	0,09	0,44	0,56
25–30	1	8	0,04	0,45	0,49	0,08	0,92
30–35	0	3	0,00	0,16	0,16	0,00	1,00
35–40	0	2	0,00	0,14	0,14	0,00	1,00
Σ	28	18	1,00	1,00	-	-	-

* n — объем исследуемой выборки.

крупнообломочных ($m_{кр}$) грунтов; (2) глубина залегания кровли карстующихся грунтов ($h_{кар}$); (3) крутизна склонов земной поверхности (α); (4) аб-

солютная отметка кровли земной поверхности ($A.O.$). Затем строились графики. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчетов (h — интервал исследуемого признака, определенный по [6]), а на рис. 6 — соответствующий график для признака α .

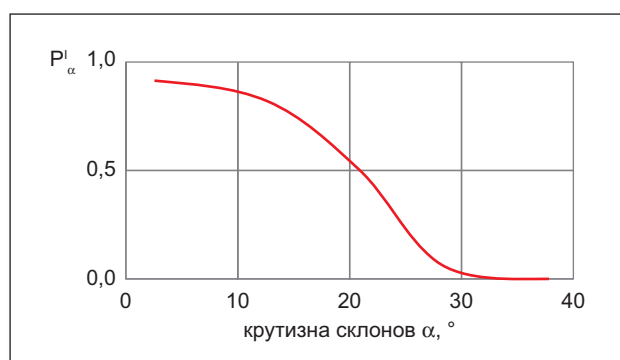


Рис. 6. График вероятности (P^I_α) отнесения точки опробования по признаку «крутизна склонов» (α) к эталонному участку I

Затем, используя экспериментальные данные для признаков и полученные графики, определяли вероятности отнесения каждой точки опробования к эталонному участку I. Таким образом, были вычислены величины классификационных показателей для крутизны склонов земной поверхности (P^I_α), мощности глинистых ($P^I_{m_{гл}}$) и крупнообломочных ($P^I_{m_{кар}}$) грунтов, глубины залегания кровли карстующихся грунтов ($P^I_{h_{кар}}$) и абсолютной отметки кровли земной поверхности ($P^I_{A.O.}$). После этого для каждой точки опробования рассчитывался обобщенный показатель $P^I_{общ}$ по следующей формуле:

$$P^I_{общ} = \frac{P^I_\alpha \cdot P^I_{m_{гл}} \cdot P^I_{A.O.} \cdot P^I_{m_{кар}} \cdot P^I_{h_{кар}}}{P^I_\alpha \cdot P^I_{m_{гл}} \cdot P^I_{A.O.} \cdot P^I_{m_{кар}} \cdot P^I_{h_{кар}} + (1 - P^I_\alpha) \cdot (1 - P^I_{m_{гл}}) \cdot (1 - P^I_{A.O.}) \cdot (1 - P^I_{m_{кар}}) \cdot (1 - P^I_{h_{кар}})} \quad (2)$$

Таблица 3

Средние численные значения признаков для таксонов первого уровня			
Признак	Таксоны I уровня		
	1	2	
Мощность глинистых грунтов, м	1,87	0,63	
Мощность крупнообломочных и песчаных грунтов, м	0,65	0,41	
Глубина залегания кровли некарстующихся грунтов, м	2,53	0,95	
Глубина залегания кровли карстующихся грунтов, м	12,79	2,66	
Крутизна склонов земной поверхности, град.	17,39	49,07	
Абсолютная отметка земной поверхности, м	579,41	511,56	
Абсолютная отметка кровли карстующихся грунтов, м	566,65	508,91	
Свойства скальных грунтов, залегающих в основании трубопровода	плотность, г/см ³	2,02	2,42
	прочность на сжатие, МПа	15,96	48,28
	пористость, %	27,11	17,17

Таблица 4

Определение интервальной вероятности по показателю «мощность глинистых грунтов» ($m_{гн}$) для таксонов второго уровня							
Интервал	Частота m для эталонного участка		Частость ($f = m^* / n$) для эталонного участка			Интервальная вероятность	
	I ^a	I ^b	I ^a	I ^b	I ^{a+I^b}	P^{I^a}	P^{I^b}
0,0–0,5	12	1	0,25	0,02	0,27	0,93	0,07
0,5–1,0	26	1	0,54	0,02	0,56	0,96	0,04
1,0–1,5	6	1	0,13	0,02	0,15	0,87	0,13
1,5–2,0	2	1	0,04	0,02	0,06	0,66	0,44
2,0–2,5	1	5	0,02	0,10	0,12	0,16	0,84
2,5–3,0	1	8	0,02	0,15	0,17	0,11	0,89
3,0–3,5	0	13	0,00	0,25	0,25	0,00	1,00
3,5–4,0	0	22	0,00	0,42	0,41	0,00	1,00
Σ	48	52	1,00	1,00	-	-	-

При $P^I_{общ} > 0,5$ точку опробования относили к эталонному участку I, а при $P^I_{общ} \leq 0,5$ — к участку II.

В пределах исследуемой части трассы было выделено два таксона первого уровня. Первый расположен на участке «ПК145 — ПК224», где карстующиеся грунты залегают в среднем на глубине 12,8 м, а крутизна склонов земной поверхности изменяется от 0 до 17°. Непосредственно под трубопроводом здесь залегают преимущественно некарстующиеся грунты. Второй таксон расположен на участке «ПК225 — ПК263», где карстующиеся грунты залегают в основании трубопровода на средней глубине 2,66 м, а крутизна склонов составляет 49°. Характеристика таксонов первого уровня приведена в табл. 3.

Для того чтобы выяснить, не требуется ли выделение таксонов второго уровня, был проведен анализ изменчивости исследуемых признаков в пределах таксонов первого уровня. Было установлено, что в пределах второго таксона первого уровня в основании нефтепровода залегают карстующиеся грунты, а крутизна склонов земной поверхности в основном превышает 40°. Поэтому было принято решение в данном случае не выде-

лать таксоны второго уровня. В пределах же первого таксона первого уровня в основании трубопровода залегают как крупнообломочные (низкодеформируемые), так и глинистые (высокодеформируемые) грунты, поэтому для данного участка было решено выделить таксоны второго уровня. В качестве классификационного геологического признака был выбран показатель «мощность глинистых грунтов» ($m_{гн}$). Для него были рассчитаны интервальные вероятности. Результаты расчетов приведены в табл. 4. По этим данным был построен график вероятностей отнесения точек опробования к эталонному участку второго уровня I^a (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что по мощности глинистых грунтов можно достаточно надежно выделить таксоны второго уровня, поэтому нет необходимости рассчитывать обобщенный показатель $P^I_{общ}$. С использованием графика, представленного на рис. 7, были рассчитаны вероятности отнесения точек опробования к эталонным участкам второго уровня I^a и I^b.

Таксон I^a представлен на участках трассы нефтепровода «ПК156 — ПК169», «ПК175 — ПК190»,

Таблица 5

Средние численные значения признаков для таксонов второго уровня			
Признак	Таксоны I уровня		
	I ^a	I ^b	
Мощность глинистых грунтов, м	1,62	2,11	
Мощность крупнообломочных и песчаных грунтов, м	0,74	0,57	
Глубина залегания кровли некарстующихся грунтов, м	2,36	2,74	
Глубина залегания кровли карстующихся грунтов, м	15,67	10,25	
Крутизна склонов земной поверхности, град.	11,73	22,32	
Абсолютная отметка земной поверхности, м	594,28	565,67	
Абсолютная отметка кровли карстующихся грунтов, м	578,61	555,41	
Свойства скальных грунтов, залегающих в основании трубопровода	плотность, г/см ³	2,02	2,42
	прочность на сжатие, МПа	2,01	2,01
	пористость, %	11,15	19,62

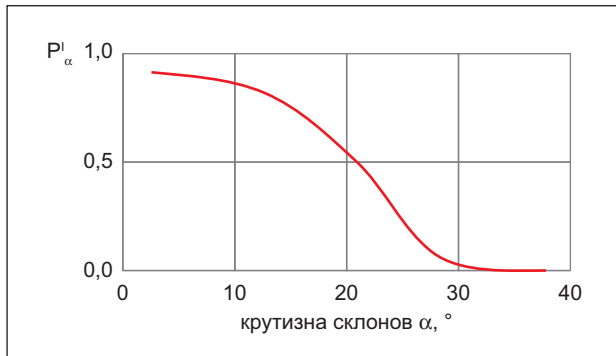


Рис. 7. График вероятности ($P_{\alpha}^{I^a}$) отнесения точки опробования к эталонному участку I^a по признаку «мощность глинистых грунтов» ($m_{гл}$)

«ПК210 — ПК214» и «ПК219 — ПК221», где карстующиеся грунты залегают на глубине h_k , в среднем равной 15,67 м, крутизна склонов земной поверхности α составляет 12° , а непосредственно в основании трубопровода залегают преимущественно некарстующиеся грунты.

Таксон I^b представлен на участках «ПК145 — ПК155», «ПК170 — ПК174», «ПК191 — ПК209», «ПК215 — ПК218», «ПК222 — ПК224», где $h_k = 10,25$ м, $\alpha = 22^\circ$, а непосредственно в основании трубопровода также залегают некарстующиеся грунты.

Характеристика таксонов второго уровня приведена в табл. 5.

На основании полученной информации были выработаны следующие рекомендации:

- на участке 1 (таксон I^a второго уровня), где трубопровод находится в весьма устойчивом состоянии, мероприятия по его укреплению и улучшению его грунтового основания проводить не следует;
- на участке 2 (таксон I^b второго уровня), где нефтепровод находится в устойчивом состоянии, а

карстующиеся грунты залегают ниже его влияния, следует провести мероприятия по организованному сбросу поверхностных вод и частичному укреплению тела трубопровода;

- на участке 3 (таксон II первого уровня), где нефтепровод находится в малоустойчивом состоянии, необходимо провести комплекс противокарстовых мероприятий, включающий укрепление тела трубопровода.

Таким образом, предложенная методика позволяет уменьшить субъективность оценки инженерно-геологических условий при проведении специального районирования и повысить надежность принимаемых проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г.К., Пендин В.В. Методика количественной оценки инженерно-геологических условий и специального инженерно-геологического районирования // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 82–89.
2. Круподеров В.С., Трофимов В.Т., Чекрыгина С.Н. Научно-методические подходы и принципы составления современной инженерно-геологической карты России масштаба 1:2 500 000 // Разведка и охрана недр. 2008. № 6. С. 24–26.
3. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ПНИИИС, 2009. 236 с.
4. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
5. Трофимов В.Т. Теоретические вопросы инженерно-геологического районирования // Вестник МГУ. Сер. Геология. 1979. № 1. С. 94–106.
6. Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики. М.: ИНФРА-М, 2000. 416 с.

Журнал «Инженерная геология»
стал одним из наиболее востребованных печатных изданий в нашем профессиональном сообществе. Сотрудники редакции постоянно работают над дальнейшим повышением качества журнала. Все статьи проходят рецензирование членами редакционной коллегии и внешними рецензентами, научное и литературное редактирование. Вы, читатели, можете внести свой вклад в развитие журнала, присылая в редакцию свои статьи, подписываясь на «Инженерную геологию».

Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095
E-mail: geo@pniis.ru

Реклама