

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.131.3

РАЗРАБОТКА МНОГОМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

© 2017 г. В. И. Галкин, В. В. Середин, П. А. Красильников, А. В. Растегаев

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990 Россия.
E-mail: seredin@nedra.perm.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2016 г.

В статье описана методика инженерно-геологического районирования. Для повышения надежности классификации геологической информации предлагается в качестве классификационного признака использовать комплексный многомерный вероятностный показатель. Разработаны алгоритмы расчета многомерного нормированного классификационного показателя для инженерно-геологического районирования территорий. Для разработки этого метода использован вероятностный подход. Представлены статистические характеристики нормированных значений геологических показателей, проведены анализ и сравнение корреляционных полей, распределение частот. Разработана оценка правильной классификации точек наблюдения по определенным критериям. Проведена апробация предложенной методики, составлена схема районирования.

Ключевые слова: инженерно-геологическое районирование, таксоны, расчет многомерного нормированного классификационного показателя.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих хозяйственных задач требуется проведение инженерно-геологического районирования. Полученные разными методами результаты районирования показали, что они не всегда сопоставимы между собой. Это обусловлено рядом причин и прежде всего выбором и обоснованием интегрального (обобщенного) показателя, который выступает при районировании в качестве классификационного признака.

В практике существуют, по крайней мере, пять способов представления классификационного показателя: геологический [1, 3, 7, 8], гидробиологический [2], балльный [4, 13], нормирования [1, 5] и вероятностно-статистический [10, 12]. Наиболее перспективное направление при определении классификационного показателя – его вероятностно-статистическая оценка. Это позволяет минимизировать субъективизм исследователя на этапах выбора классификационного показателя и обоснования границ таксонов.

Цель работы – разработка алгоритма расчета многомерного нормированного классификационного показателя для инженерно-геологического районирования территорий.

Инженерно-геологическое районирование включает в себя следующие этапы работ:

1. Формулируется цель районирования.
2. Исходя из цели, обосновывается и выбирается классификационный показатель (K_p).
3. Обосновываются граничные значения классификационного показателя (K_p) для выделения таксонов.
4. Формируется модель районирования, в которую входят граничные значения классификационного показателя и наименование таксонов.
5. Исследуемая территория разделяется на подобласти (с равными площадями), каждая из которых характеризуется численными значениями классификационного показателя.
6. Проводится районирование территории и описание таксонов.

Особенность данного подхода к районированию: для каждой точки опробования известны численные значения геологических признаков и эталонные участки (классы), где сооружения находятся в устойчивом ($G-1$) и неустойчивом ($G-2$) состоянии (рис. 1).

При наличии вышеописанных исходных данных районирование сводится к выбору класси-



Рис. 1. Схема расположения участков (классов), где сооружения находятся в устойчивом (G-1) и неустойчивом (G-2) состоянии.

фикационного показателя (K_p), который оценивается (нормируется) многомерными статистическими критериями. В качестве классификационного показателя может выступать показатель ($P_{\text{комп}}$) условных комплексных вероятностей. Кроме того, изучена возможность использования значения Z дискриминантной функции в качестве K_p . Для вычисления Z следует использовать линейную дискриминантную функцию (ЛДФ).

Пример практической реализации. Между пунктами A и B построен и эксплуатируется в течение 35 лет нефтепровод. Его протяженность составляет 20.4 км (см. рис. 1). Анализ состояния трубопровода показал, что на пикетах (ПК) с 25 по 35 он находится в удовлетворительном (G-1), а на ПК 1–11, наоборот, в неудовлетворительном состоянии (G-2), о чем свидетельствуют ежегодные аварийные ситуации на нем.

Формулируется задача – оценить состояние трубопровода по данным инженерно-геологических изысканий. Результаты представить в виде схемы районирования. Исходные данные: трубопровод диаметром 89 мм, материал С-3, глубина заложения 2.8 м.

Инженерно-геологическое изучение территории включало в себя бурение скважин, описание керна, отбор проб и монолитов по пикетам (ПК). Всего пробурено 100 скважин. Нумерация ПК начиналась с пункта A .

Геологическое строение (сверху вниз): песок, средней крупности мощностью до 8.9 м; глина мягкотекучепластичная мощностью до 5.3 м; суглинок мягкопластичный мощностью до 5.2 м; песчаник крепкий, трещиноватый, мощностью (вскрытая) до 5 м.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА МНОГОМЕРНОГО НОРМИРОВАННОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО КЛАССИФИКАЦИОННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ($P_{\text{комп}}$)

1. В расчетах участвуют следующие геологические показатели: абсолютная отметка земной поверхности ($H_{\text{зн}}$), мощность песка (m_p), мощность глины (m_g), мощность суглинка ($m_{\text{суг}}$), абсолютная отметка кровли песчаника (H_n) и общая мощность грунтовой толщи (M_o).

2. Выполняют нормирование изучаемых показателей по двум вариантам.

Для первого варианта вычисляются характеристики ($dH_{\text{зн}}$), (dH_n) и (dM_o):

$$dH_{\text{зн}} = (H_i - H_{\text{ср}}) / H_{\text{ср}},$$

$$dH_n = (H_{i1} - H_{\text{ср}1}) / H_{\text{ср}1},$$

$$dM_o = (M_{oi} - M_{\text{оср}}) / M_{\text{оср}},$$

где H_i и H_{i1} – значения абсолютной отметки земной поверхности и кровли пласта песчаника в точке опробования; $H_{\text{ср}}$ и $H_{\text{ср}1}$ – средние значения абсолютных отметок земной поверхности и кровли пласта песчаника; M_{oi} – общая мощность грунтовой толщи в точке опробования, $M_{\text{оср}}$ – среднее значение мощности грунтовой толщи.

Для второго варианта вычисляю

$$n_p = m_p / M_o; \quad n_g = m_g / M_o; \quad n_{\text{суг}} = m_{\text{суг}} / M_o,$$

где n_p , n_g , $n_{\text{суг}}$ – нормированные значения мощности пластов соответственно песка, глины и суглинка в точке опробования; M_o – общая мощность грунтовой толщи в точке бурения скважины.

Отметим, что сумма $n_p + n_g + n_{\text{суг}} = 1$.

3. Выделяют эталонные участки (классы G-1 и G-2). Для этого отмечают пикеты, где трубопровод находится в устойчивом (G-1) и неустойчивом (G-2) состояниях. Количество пикетов, используемых для классов G-1 и G-2, равно 50.

4. Оценивают корректность выделения эталонных участков (классы G-1 и G-2). Для этого, используя нормированные значения геологических признаков по классам G-1 и G-2, выполняют сравнение средних значений показателей (табл. 1). В результате выявляется, что участки, где сооружения находятся в устойчивом и неустойчивом состояниях, различаются между собой по $dH_{\text{зн}}$, dM_o , n_p , n_g , $n_{\text{суг}}$ и dH_n .

Это свидетельствует о правомерности выделения эталонных участков G-1 и G-2. Для подтверждения этого вывода вычислим значение коэффициента парной корреляции (r) между изучаемыми характеристиками для классов G-1 и G-2 (табл. 2). Из таблицы видно, что для изучаемых классов достаточно часто наблюдаются

Таблица 1. Статистические характеристики нормированных значений геологических показателей

Показатели	Линейные модели вероятности устойчивости территорий	Средние значения показателей (в числителе нормированное значение, в знаменателе вероятность отнесения к устойчивым сооружениям)		Статистические оценки
		устойчивое состояние сооружений, $G-1$	неустойчивое состояние сооружений, $G-2$	Стьюдента, t_p
$dH_{зп}$	$P(dH_{зп}) = 0.451 + 24.179 dH_{зп}$	$\frac{0.009 \pm 0.008}{0.676 \pm 0.180}$	$\frac{-0.009 \pm 0.007}{0.227 \pm 0.197}$	$\frac{11.7322}{0.000000}$
dM_o	$P(dM_o) = 0.504 + 0.84739 dM_o$	$\frac{0.067 \pm 0.116}{0.509 \pm 0.009}$	$\frac{-0.066 \pm 0.233}{0.498 \pm 0.019}$	$\frac{-3.6275}{0.000457}$
$n_{п}$	$P(n_{п}) = 0.065 + 1.2191 n_{п}$	$\frac{0.446 \pm 0.105}{0.633 \pm 0.109}$	$\frac{0.227 \pm 0.089}{0.342 \pm 0.119}$	$\frac{12.2130}{0.000000}$
$n_{г}$	$P(n_{г}) = 0.996 - 444 n_{г}$	$\frac{0.294 \pm 0.112}{0.570 \pm 0.162}$	$\frac{0.401 \pm 0.134}{0.416 \pm 0.193}$	$\frac{-4.3176}{0.000038}$
$n_{суг}$	$P(n_{суг}) = 0.395 - 1.333 n_{суг}$	$\frac{0.238 \pm 0.061}{0.626 \pm 0.081}$	$\frac{0.370 \pm 0.126}{0.450 \pm 0.168}$	$\frac{-6.6617}{0.000000}$
$dH_{п}$	$P(dH_{п}) = 0.500 - 2.772 dH_{п}$	$\frac{0.009 \pm 0.007}{0.676 \pm 0.180}$	$\frac{-0.009 \pm 0.008}{0.332 \pm 0.227}$	$\frac{0.9919}{0.323671}$

Таблица 2. Корреляционная матрица

	$dH_{зп}$	dM_o	$n_{п}$	$n_{г}$	$n_{суг}$	$dH_{п}$
$dH_{зп}$	1.00 1.00	-0.22 -0.32	-0.51 -0.08	0.67 -0.22	-0.47 0.31	0.73 -0.13
dM_o		1.00 1.00	0.12 0.75	-0.25 -0.00	0.29 -0.62	-0.57 0.06
$n_{п}$			1.00 1.00	-0.84 -0.47	0.08 -0.34	-0.39 0.08
$n_{г}$				1.00 1.00	-0.60 -0.68	0.64 0.47
$n_{суг}$					1.00 1.00	-0.62 -0.56
$dH_{п}$						1.00 1.00

Примечание: верхняя строка для $G-1$, нижняя – для $G-2$

различные виды корреляций. В ряде случаев эти корреляции различаются даже по знаку. Наиболее значительные отличия наблюдаются между $dH_{зп}$ и $n_{п}$, $n_{г}$, $n_{суг}$, $dH_{п}$. Корреляционные поля между $dH_{зп}$ и $n_{г}$ приведены на рис. 2. Видно, что корреляционные поля между $dH_{зп}$ и $n_{г}$ различаются не

только по силе статистической связи, но и по местонахождению значений для устойчивых ($G-1$) и неустойчивых ($G-2$) участков. В первом случае большинство значений по $dH_{зп}$ и $n_{г}$ находится в верхнем левом углу, во втором случае – в нижнем правом углу.

Корреляционные поля между $dH_{зп}$ и $dH_{п}$ приведены на рис. 3, на котором также видно, что корреляционные поля между $dH_{зп}$ и $dH_{п}$ различаются не только по значениям r , но и по местонахождению значений для устойчивых и неустойчивых участков. Для $G-1$ большинство значений по $dH_{зп}$ характеризуется величиной больше 0, а для $G-2$ наоборот – меньше 0.

Таким образом, по средним значениям исследуемых геологических признаков, коэффициентам корреляции и расположению точек опробования на графиках рассеивания можно утверждать, что эталонные участки $G-1$ и $G-2$ имеют существенные различия и выделены надежно.

5. Для разработки метода многомерного нормированного классификационного показателя K_p использован вероятностный подход, суть

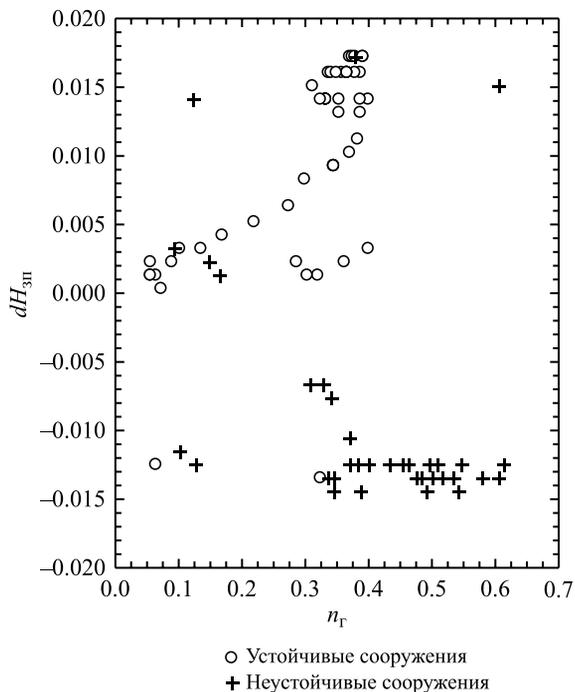


Рис. 2. Корреляционные поля между dH_{3n} и n_r .

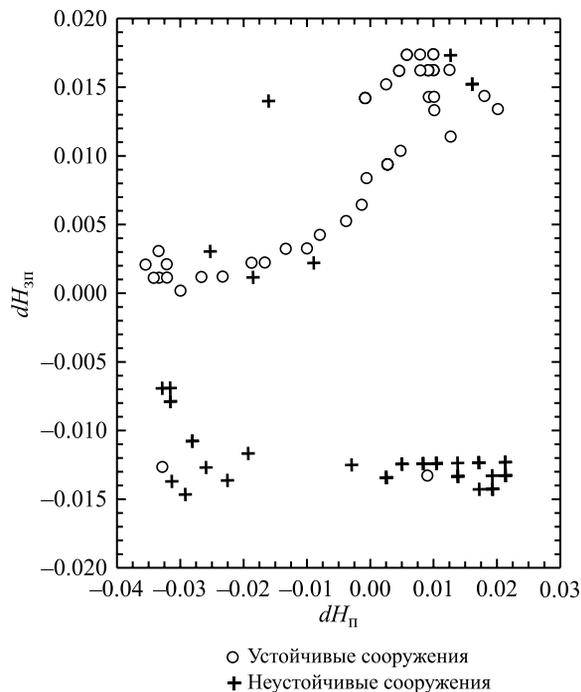


Рис. 3. Корреляционные поля между dH_{3n} и dH_n .

которого сводится к определению вероятности отнесения точек опробования к классам $G-1$ или $G-2$.

Для реализации данного подхода первоначально изучим распределения изучаемых показателей в классах $G-1$ и $G-2$. Для этого вычислим значения интервалов по формуле Стерджесса:

$$\Delta X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3.321 \lg N},$$

где X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значение показателя, N – количество скважин.

После чего в каждом интервале определяются частоты

$$P(X) = \frac{N_k}{N_g},$$

где $P(X)$ – частота в k -ом интервале для группы $G-1$ соответствует классу устойчивых территорий,

для группы $G-2$ – неустойчивых территорий, N_k – число случаев содержания показателя $P(X)$ в k -ом интервале, N_g – объем выборки для классов $G-1$ и $G-2$. Распределение частот $P(n_n)$ в исследуемых классах по n_n приведено в табл. 3.

Аналогичные распределения построены и по другим показателям. После этого по данным распределения определены интервальные вероятности принадлежности каждого исследуемого геологического показателя, например $Pi(n_n)$, к классу устойчивых территорий $G-1$ [11]. Далее средние значения интервалов варьирования, например интервал первый $n_{n\text{ ср.}} = 0.05$ (см. табл. 3), сопоставлялись с вероятностями в этом же интервале $Pi(n_n)$. По полученным данным высчитывались парные коэффициенты корреляции r и строились уравнения регрессии по всем изучаемым показателям (см. табл. 1).

Таблица 3. Распределение частот $P(n_n)$

Интервалы варьирования	0.0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.5–0.6	0.6–0.7
	Частоты, $P(n_n)$						
Устойчивое состояние территории $G-1$	0	0	0.02	0.14	0.58	0.14	0.12
Неустойчивое состояние территории $G-2$	0.18	0.28	0.24	0.28	0.02	0	0

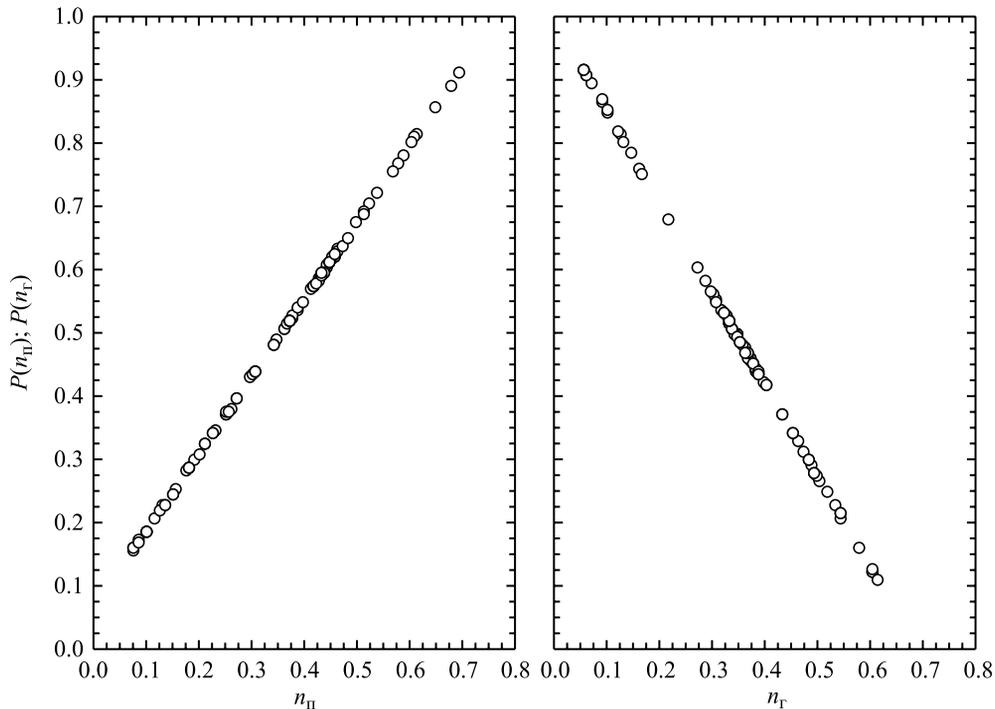


Рис. 4. Зависимости $P(n_{\text{п}})$ от $n_{\text{п}}$ и $P(n_{\text{r}})$ от n_{r} .

При построении моделей выполняется их корректировка из условия, что значение вероятностей для класса устойчивых территорий $G-1$ должно быть $P(X) > 0.5$, а для класса неустойчивых – $P(X) < 0.5$. Графическое отображение взаимосвязи между $P(n_{\text{п}})$ и $n_{\text{п}}$, а также $P(n_{\text{r}})$ и n_{r} приведены на рис. 4.

Таким образом, проводится нормирование каждого изучаемого геологического показателя через интервальную вероятность $P(X)$, которая позволяет отнести точку опробования к классу $G-1$ или $G-2$.

Для повышения надежности классификации геологической информации предлагается в качестве классификационного признака использовать комплексный многомерный вероятностный показатель $P_{\text{КОМП}}$.

Для расчета $P_{\text{КОМП}}$ использована формула условных комплексных вероятностей:

$$P_{\text{КОМП}} = \frac{\prod_{j=1}^m P(W_1 / X_j)}{\prod_{j=1}^m P(W_1 / X_j) + \prod_{j=1}^m (1 - P(W_1 / X_j))},$$

где $P(W_1/X_j)$ – соответственно вероятности: $P(dH_{\text{зн}})$, $P(dM_{\text{o}})$, $P(n_{\text{п}})$, $P(n_{\text{r}})$, $P(n_{\text{суг}})$, $P(dH_{\text{п}})$.

Следует отметить, что при вычислении $P_{\text{КОМП}}$ необходимо использовать такое сочетание условных вероятностей геологических признаков (m), при котором средние значения вероятностей $P_{\text{КОМП}}$ наиболее значительно различаются в изучаемых классах $G-1$ и $G-2$. Количество сочетаний определяется по следующей формуле:

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!},$$

где n – количество всех геологических показателей, равное 6; m – количество используемых в расчетах геологических показателей.

Средние значения этих вероятностей при разных сочетаниях геологических признаков (m) приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что при $m = 2$ использовались вероятности $P(dH_{\text{зн}})$ и $P(n_{\text{п}})$, при $m = 3$ к ним присоединилась вероятность $P(n_{\text{суг}})$, далее $P(n_{\text{r}})$, $P(dM_{\text{o}})$ и на завершающем шаге – $P(dH_{\text{п}})$. При этом средние значения вероятностей $P_{\text{КОМП}}$ наиболее значительно различаются в изучаемых классах $G-1$ и $G-2$ при $m = 6$. Для $G-1$ вероятность составляет $P_{\text{КОМП}} = 0.891$, а для $G-2$ соответственно – $P_{\text{КОМП}} = 0.127$.

Таким образом, предложен алгоритм расчета многомерного нормированного вероятностного показателя $P_{\text{КОМП}}$, который может выступать в качестве классификационного признака K_p при инженерно-геологическом районировании.

Таблица 4. Обоснование прогноза устойчивого состояния территории по геологическим данным

Вероятности		Сочетание геологических признаков, m				
		$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 6$
$P(dH_{зп})$		+	+	+	+	+
$P(dM_0)$					+	+
$P(n_p)$		+	+	+	+	+
$P(n_r)$				+	+	+
$P(n_{суг})$			+	+	+	+
$P(dH_n)$						+
Среднее значение $P_{\text{компл}}$	Устойчивое состояние территории- $G-1$	0.784±0.141	0.841±0.142	0.887±0.145	0.890±0.137	0.891±0.127
	Неустойчивое состояние территории- $G-2$	0.152±0.167	0.131±0.162	0.109±0.139	0.127±0.169	0.127±0.167
Процент правильной классификации, %	Устойчивое состояние территории- $G-1$	94.0	94.0	94.0	96.0	96.00
	Неустойчивое состояние территории- $G-2$	92.0	94.0	96.0	98.0	100.00

6. Модель районирования приведена в табл. 5.

7. Рассчитывая численные значения $P_{\text{компл}}$ в каждой точке наблюдения и используя модель районирования (см. табл. 5), типизируем трассу нефтепровода.

Выделяются два таксона:

таксон G-1 представлен участком трассы трубопровода “ПК1 – ПК18”. На этом участке в основании трубопровода залегает глина мягкотекучепластичная;

таксон G-2 представлен участком “ПК19 – ПК51”. На этом участке в основании трубопровода залегает песок средней крупности.

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА
МНОГОМЕРНОГО НОРМИРОВАННОГО
КЛАССИФИКАЦИОННОГО
ПОКАЗАТЕЛЯ (Z)**

1. В расчетах участвуют вышеприведенные геологические показатели: абсолютная отметка земной поверхности ($H_{зп}$), мощность песка (m_p), мощность глины (m_r), мощность суглинка ($m_{суг}$), абсолютная отметка кровли песчаника (H_n) и общая мощность грунтовой толщи (M_0).

2. Составляется единая выборка, включающая в себя значения геологических показателей из классов $G-1$ и $G-2$.

3. Проводится оценка надежности выделения эталонных участков $G-1$ и $G-2$ по критерию “хи-квадрат”. Расчетное значение составляет $\chi_p^2 = 154.1$. Затем вычисляется табличное значение $\chi_t^2 = 9.5$ при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и степенях свободы $K = \Gamma - 3 = 7 - 3 = 4$, где Γ – число интервалов. Отсюда $\chi_p^2 = 154.1 > \chi_t^2 = 9.5$. Это свидетельствует о том, что эталонные участки $G-1$ и $G-2$ различаются между собой.

4. После чего по данным обобщенной выборки рассчитывается линейная дискриминантная функция:

$$Z = 0.988H_{зп} + 0.935m_p + 0.23m_r - 0.391m_{суг} - 100.189$$

при $r = 0.893$.

5. Затем, используя дискриминантную функцию, рассчитывается значение Z для каждой точки наблюдения. Для класса $G-1$ среднее значение составляет $Z_1 = +1.973$, а для класса $G-2$ $Z_2 = -1.973$.

6. Граничное значение дискриминантной функции Z_0 , которое делит наблюдения на клас-

Таблица 5. Модель районирования территории

Наименование таксона		Состояние объекта	Значение Z	Значение $P_{\text{КОМП}}$
Таксон 1	$G-1$	Устойчивое	$Z > Z_0=0$	$P_{\text{КОМП}} > 0.5$
Таксон 2	$G-2$	Неустойчивое	$Z < Z_0=0$	$P_{\text{КОМП}} < 0.5$

сы $G-1$ и $G-2$, определяется следующим образом: в дискриминантную функцию (см. выше) подставляем средние значения геологических признаков (см. табл. 1) и рассчитываем Z_0 , которое равно 0. При $Z > Z_0$ точка наблюдения относится к классу $G-1$, а при $Z < Z_0$ к классу $G-2$.

7. Затем составляется модель районирования, которая приведена в табл. 5.

8. После расчета численных значений Z в каждой точке наблюдения и использования модели районирования (см. табл. 5) также типизируем трассу нефтепровода. Выделяются два таксона, которые по пикетам аналогичны схеме районирования, полученной по данным многомерного нормированного вероятностного классификационного показателя ($P_{\text{КОМП}}$, см. выше).

Таким образом, предложен алгоритм расчета многомерного, нормированного показателя Z , который может выступать в качестве

классификационного признака K_p при инженерно-геологическом районировании.

Оценка правильной классификации точек наблюдения приведена по вышеприведенным критериям. Для этого построен график распределения между классификационными показателями $P_{\text{КОМП}}$ и Z (рис. 5). Из рис. 5 видно, что для устойчивых территорий $G-1$ значения $P_{\text{КОМП}}^{m=6} < 0.5$ наблюдаются только в одном случае, т.е. процент правильной классификации составляет 98%. По величине Z неверно выполнены оценки в двух случаях для устойчивых территорий $G-1$ и в одном случае для неустойчивых $G-2$, т.е. процент правильной классификации составляет 94%. Из рисунка также видно, что значения $P_{\text{КОМП}}^{m=6}$ и Z достаточно хорошо контролируются. Значения коэффициента r для всех территорий независимо от устойчивости сооружений равно 0.95, для территорий с устойчивым состоянием объектов $r = 0.89$, для территорий с неустойчивым состоянием $r = 0.59$.

Таким образом, при инженерно-геологическом районировании в качестве классификационных показателей можно применять нормированные, многомерные вероятностные критерии $P_{\text{КОМП}}$ и дискриминантный Z .

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы расчета нормированного многомерного вероятностного критерия $P_{\text{КОМП}}$ и дискриминантного Z , которые могут выступать в роли классификационных показателей при инженерно-геологическом районировании.

2. $P_{\text{КОМП}}$ и Z достаточно хорошо коррелируются между собой. Значения коэффициента корреляции для всех территорий независимо от устойчивости сооружений равно $r = 0.95$, поэтому каждый из них можно использовать при инженерно-геологическом районировании.

3. Проведена апробация предложенной методики, составлена схема районирования. При использовании $P_{\text{КОМП}}$ в качестве классификационного показателя процент правильной классификации точек наблюдения к классам $G-1$ и $G-2$ составляет 98%, а при использовании Z процент правильной классификации составляет 94%.

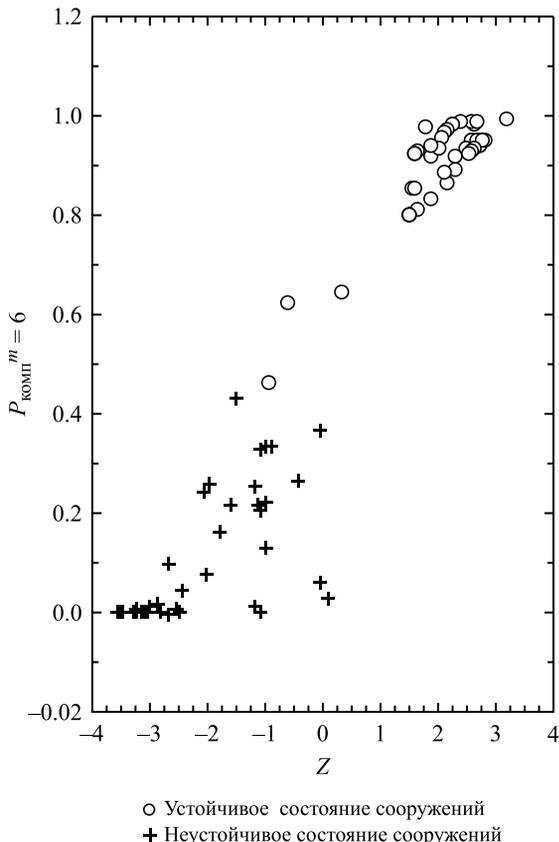


Рис. 5. Поле корреляции между $P_{\text{КОМП}}$ и Z .

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. Еникеев Ф.И. Гидробиологические методы картирования гидромерзлотной обстановки в горных районах Восточного Забайкалья // Геоэкология. 2015. № 1. С. 81–90.
3. Круподеров В.С., Трофимов В.Т., Чекрыгина С.Н. Научно-методические подходы и принципы составления современной инженерно-геологической карты России масштаба 1 : 2500 000 // Разведка и охрана недр. 2008. № 6. С. 24–26.
4. Минц А.А. Вопросы комплексной экономической оценки природных условий и естественных ресурсов в свете задач современной географии // Изв. АН СССР. Серия географическая. 1965. № 2. С. 65–76.
5. Новопоселенских Л.А., Середин В.В. Экономическое состояние инженерно-изыскательской отрасли // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2015. № 15. С. 168–171.
6. Оздоева Л.И. Использование интегрального показателя инженерно-геологических условий при крупномасштабном инженерно-геологическом районировании городских территорий // Изв. вузов. Геология и разведка. 1981. № 8. С. 70–74.
7. Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 195–197.
8. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Зонирование территории г. Березники Пермского края РФ по степени опасности развития геологических процессов // Геоэкология. 2014. № 6. С. 518–525.
9. Пендин В.В. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне / В.В. Пендин, С.Д. Ганова. М.: ПНИИИС, 2009. 236 с.
10. Позднякова И.А., Галицкая И.В., Миронов О.К., Костинова И.А., Дорожко А.Л., Батрак Г.И., Матвеева Л.А., Фесель К.И. Выявление гидрогеологических окон на основе крупномасштабного картирования геологического строения и гидрогеологических условий территории г. Москвы // Геоэкология. 2015. № 4. С. 352–364.
11. Середин В.В., Галкин В.И., Растегаев А.В., Лейбович Л.О., Пушкарева М.В. Прогнозирование карстовой опасности при инженерно-геологическом районировании территорий // Инженерная геология. 2012. № 2. С. 40–45.
12. Середин В.В., Галкин В.И., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О., Сметанин С.Н. Вероятностно-статистическая оценка инженерно-геологических условий для специального районирования // Инженерная геология. 2011. № 4. С. 42–47.
13. Середин В.В., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О., Бахарева Н.С. Методика инженерно-геологического районирования на основе балльной оценки классификационного признака // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 20–25.
14. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
15. Трофимов В.Т. Теоретические вопросы инженерно-геологического районирования // Вестник Московского университета. Серия “Геология”. 1979. № 1. С. 94–106.

REFERENCES

1. Bondarik, G.K., Pendin, V.V. *Metodika kolichestvennoi otsenki inzhenerno-geologicheskikh uslovii i spetsial'nogo inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya* [Methods of quantitative assessment of engineering-geological conditions and special engineering geological zoning]. *Inzhenernaya geologiya*, 1982, no. 4, p. 82–89 (in Russian).
2. Enikeev, F.I. *Gidrobiologicheskie metody kartirovaniya gidromerzlotnoi obstanovki v gornykh raionakh Vostochnogo Zabaykal'ya* [Hydrobiological methods of mapping hydrocryologic conditions in mountain areas of Eastern TransBaikalia]. *Geoekologiya*, 2015, no.1, pp. 81–90 (in Russian).
3. Krupoderov, V.S., Trofimov, V.T., Chekrygina, S.N. *Nauchno-metodicheskie podkhody i printsipy sostavleniya sovremennoi inzhenerno-geologicheskoi karty Rossii masshtaba 1:2500000* [Scientific and methodological approaches to and principles of modern engineering geological mapping of Russia to a scale 1 : 2 500 000]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 6, p. 24–26 (in Russian).
4. Mints, A.A. *Voprosy kompleksnoi ekonomicheskoi otsenki prirodnykh uslovii i estestvennykh resursov v svete zadach sovremennoy geografii* [Issues of comprehensive economic evaluation of natural conditions and natural resources as regards to the tasks of modern geography]. *Izv. AN SSSR. Seriya geograficheskaya*, 1965, no. 2, p. 65–76 (in Russian).
5. Novoposelenskikh, L.A., Seredin, V.V. *Ekonomicheskoe sostoyanie inzhenerno-izyskatel'skoi otrasli* [Economic state of engineering and geological surveying industry], *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*, 2015, no. 15, p. 168–171 (in Russian).
6. Ozdoeva, L.I. *Ispol'zovanie integral'nogo pokazatelya inzhenerno-geologicheskikh uslovii pri krupnomasshtabnom inzhenerno-geologicheskoy raionirovaniy gorodskikh territorii* [The use of integral index of engineering geological conditions in large-scale engineering geological zoning of urban areas]. *Izv. vuzov: Geologiya i razvedka*, 1981, no. 8, p. 70–74 (in Russian).
7. Osipov, V.I. *Krupnomasshtabnoe geologicheskoe kartirovanie territorii g. Moskvy* [Large-scale geological mapping

- of Moscow]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, p. 195–197 (in Russian).
8. Osipov, V.I., Mamaev, Yu.A., Yastrebov, A.A. *Zonirovanie territorii g. Berezniki Permskogo kraia RF po stepeni opasnosti razvitiya geologicheskikh protsessov* [Territory zoning of Berezniki, Perm Krai, the Russian Federation by geological hazard degree]. *Geoekologiya*, 2014, no. 6, p. 518–525 (in Russian).
 9. Pendin, V.V. *Geoekologicheskii monitoring territorii raspolozheniya ob'ektov transporta gaza v kriolitozone* [Geoenvironmental monitoring of gas transportation facilities located in the permafrost]. Moscow, PNIIS, 2009, p. 236 (in Russian).
 10. Pozdnyakova, I.A., Galitskaya, I.V., Mironov, O.K., Kostikova, I.A., Dorozhko, A.L., Batrak, G.I., Matveeva, L.A., Fesel', K.I. *Vyyavlenie gidrogeologicheskikh okon na osnove krupnomasshtabnogo kartirovaniya geologicheskogo stroeniya i gidrogeologicheskikh uslovii territorii g. Moskvy* [Identification of hydrogeological windows based on large-scale mapping of geological structure and hydrogeological conditions of the territory of Moscow]. *Geoekologiya*, 2015, no. 4, p. 352–364 (in Russian).
 11. Seredin, V.V., Galkin, V.I., Rastegaev, A.V., Leibovich, L.O., Pushkareva, M.V. *Prognozirovanie karstovoi opasnosti pri inzhenerno-geologicheskoi raionirovaniy territorii* [Prediction of karst hazard in engineering geological zoning]. *Inzhenernaya geologiya*, 2012, no. 2, p. 40–45 (in Russian).
 12. Seredin, V.V., Galkin, V.I., Pushkareva, M.V., Leibovich, L.O., Smetanin, S.N. *Veroyatnostno-statisticheskaya otsenka inzhenerno-geologicheskikh uslovii dlya spetsial'nogo raionirovaniya* [Probabilistic and statistical assessment of geotechnical conditions for special zoning]. *Inzhenernaya geologiya*, 2011, no. 4, p. 42–47 (in Russian).
 13. Seredin, V.V., Pushkareva, M.V., Leibovich, L.O., Bakhareva, N.S. *Metodika inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya na osnove bal'noi otsenki klassifikatsionnogo priznaka* [Methodology of engineering geological zoning based on score estimation of classification feature]. *Inzhenernaya geologiya*, 2011, no. 3, p. 20–25 (in Russian).
 14. Tolmachev, V.V. *Veroyatnostnyi podkhod pri otsenke ustoychivosti zakarstovannykh territorii i proektirovaniy protivokarstovykh meropriyatii* [Probabilistic approach in stability assessment of karst areas and sinkholes protection development]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 3, p. 98–107 (in Russian).
 15. Trofimov, V.T. *Teoreticheskie voprosy inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya* [Theoretical issues of engineering geological zoning]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya "Geologiya"*, 1979, no. 1, p. 94–106 (in Russian).

DEVELOPMENT OF THE MULTIVARIATE STATISTIC MODELS FOR ENGINEERING GEOLOGICAL ZONING OF TERRITORIES

V. I. Galkin*, V. V. Seredin**, P. A. Krasil'nikov**, A. V. Rastegaev*

*Perm National Research Polytechnical University, Komsomol'skii pr. 29, Perm, 614990 Russia

**Perm State National Research University, ul. Bukireva 15, Perm, 614990 Russia.

E-mail: seredin@nedra.perm.ru

Engineering geological zoning is often used for achieving various economic targets. The results obtained with different methods show that they are not always comparable. It happens due to a number of reasons, above all, due to a multitude of integral (or essential) indices used as classification features for zoning. Practically, there are at least five methods for substantiating the classification index, i.e., geological, hydrobiological, grading, standardizing, and probabilistic-statistical methods. The probabilistic-statistic estimation appears to be the most promising way for classification index determination. It allows reducing the human factor impact when choosing the classification index and substantiating the taxon boundaries. It also abridges the amount of categories in use. Therefore, this research is aimed at the development of an algorithm for calculating the multivariate rated classification index for engineering geological zoning.

The probabilistic approach is used for developing this system. In order to increase the reliability of geodata classification, a complex multivariate probable ratio $P_{\text{КОМП}}$ is suggested as a classification feature. The multivariate rated classification index Z is the second criterion. Along with $P_{\text{КОМП}}$, these two indices may be used as classification features in engineering geological zoning. The statistical characteristics of rated geological indices are given, scatterplots and the rate frequency distributions have been analyzed and compared. $P_{\text{КОМП}}$ and Z ratios correlate well. The correlation coefficient is equal to $r = 0.95$ for the entire territory (irrespective of the engineering structure stability), so both indices are suitable for engineering geological zoning. The suggested procedure was approved; and the zoning scheme was compiled. The results of using $P_{\text{КОМП}}$ as classification ratio show success in the correct nomination of observation points by their classification categories in 98%. The results of using Z show the success rate of 94%.

Key words: *engineering geological zoning, taxons, calculation of multivariate rated classification index.*