

ПНИИИС Госстроя СССР

# Руководство

по составлению  
региональных  
таблиц  
нормативных  
и расчетных  
показателей  
свойств грунтов



Москва 1981

Рекомендовано к изданию секцией методики, экономики и техники инженерных изысканий НТС ПНИИИС Госстроя СССР.

**Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов / ПНИИС Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1981. — 55 с.**

Предназначено для составления таблиц, прогнозирующих нормативные и расчетные значения показателей механических свойств грунтов различных геолого-генетических комплексов в районах их распространения. Содержит общие теоретико-методические положения, касающиеся выбора объекта исследования (региона, типа грунтов и пр.) и методов обработки экспериментального материала, а также описание основных этапов процедуры составления таблиц, включая математические формулы для ручного и машинного счета.

Приведены примеры составления региональных таблиц по конкретным регионам, даны описание и текст программы для ЭВМ «Наира-2».

Для инженеров-геологов, занимающихся проблемой многократного использования материалов инженерно-геологических изысканий.

Табл. 9, ил. 4.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Действующая в настоящее время глава СНиП II-15-74 допускает для предварительных расчетов оснований зданий и сооружений всех классов, а также для окончательных расчетов оснований зданий и сооружений II—IV класса и ряда других сооружений определение нормативных и расчетных значений прочностных и деформационных характеристик по их физическим показателям (табл. 1—3 прил. 2). Для отдельных районов указанная глава СНиП позволяет вместо таблиц прил. 2 использовать специально разработанные и согласованные с Госстроем СССР **региональные таблицы характеристики грунтов**, учитывающие инженерно-геологическую специфику этих районов.

В настоящем Руководстве изложена методика статистического обобщения фоновых данных по физико-механическим свойствам рыхлых грунтов с целью составления региональных таблиц для прогноза прочностных и деформационных свойств грунтов по показателям их состояния, состава и строения (физическим свойствам). Методика позволяет построить оптимальные уравнения для косвенной оценки нормативных (средних) и расчетных (гарантированных с заданной надежностью) показателей механических свойств, характерных для грунтов определенных геолого-генетических комплексов в определенных районах их распространения, а также исследовать устойчивость и область применимости найденных зависимостей. В приложениях приведены необходимые статистические таблицы, рекомендуемая методика расчленения неоднородных выборок классификационных показателей свойств грунтов, а также описание программ для ЭВМ «Наира-2», реализующих основные моменты изложенной методики.

В Руководстве изложен разработанный в последние годы новый подход (исследование так называемых структурных зависимостей), направленный на изучение связей между показателями механических и физических свойств грунтов, обобщенными в пределах инженерно-геологических элементов — макроскопически однородных геологических тел, размеры которых (в плане) соизмеримы с размерами инженерных сооружений. Такая постановка задачи наилучшим образом соответствует поставленной цели — обеспечить косвенный прогноз нормативных и расчетных характеристик грунтов, применяемых при расчетах взаимодействия инженерных сооружений и естественных оснований.

В Руководство включены методические положения, прошедшие к моменту выпуска достаточную практическую апробацию. Ряд методов, важных с точки зрения обобщения материалов изысканий прошлых лет, в настоящее время находится в стадии разработки. К ним относятся, в частности, методы прогноза прочностных характеристик грунтов на основе сопоставления величин сопротивления сдвигу т. и параллельных определений физических свойств.

Объектами для проведения исследований, предусмотренных настоящим Руководством, являются грунты определенных геолого-генетических комплексов, имеющих достаточно широкое распространение. Разрабатывая региональные таблицы, следует рассматривать эти комплексы грунтов в пределах таксономических единиц инженерно-геологического районирования: регионов, областей, районов.

С учетом практических потребностей допустимо выделение регионов по условным признакам: территория города, области, район работ крупной территориальной изыскательской организаций и т. п., но и в этом случае таблицы составляются для одного генетического типа грунтов.

Настоящее Руководство может использоваться двояко. Первый путь, вполне доступный геологу,— непосредственное использование программы для машины «Наира-2», приведенной в прил. 4, а также других программ, рекомендованных в тексте. Второй путь — использование разработанного алгоритма для составления программы для другого типа ЭВМ — осуществляется математиком.

Руководство составлено в Лаборатории математических методов ПНИИГС канд. геолого-минерал. наук Б. Г. Слепцовыми при участии кандидатов техн. наук О. И. Игнатовой (НИИОСП), М. Т. Ойзермана и канд. геолого-минерал. наук Н. М. Хайме, под общим руководством д-ра геолого-минерал. наук М. В. Раца. В примерах прил. 3 использованы материалы изысканий института Эстпромпроект (гл. геолог А. Вило).

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Таблицы для прогноза характеристик механических свойств по показателям состава, структуры и состояния грунтов следует разрабатывать для наиболее характерных для данного региона геолого-генетических комплексов пород, широко использующихся в качестве естественных оснований зданий и сооружений. Сбор фактического материала должен осуществляться таким образом, чтобы в статистическую совокупность, предназначенную для обработки, включались опытные данные, относящиеся, как правило, к грунтам одного и того же генезиса, полученные единным методом при стандартных условиях проведения эксперимента. Приборы и оборудование, используемые при испытаниях грунтов, должны удовлетворять требованиям получения равноценных результатов. Фактический материал должен представляться в форме специальных стандартных бланков или таблиц, удобных для перевода информации на носители ЭВМ (перфокарты, перфоленты и т. п.).

1.2. Для прогноза прочностных и деформационных свойств грунтов настоящим Руководством предусматривается использование экспериментальных определений модуля деформации  $E$  или коэффициента сжимаемости  $a$ , а также величины угла внутреннего трения  $\phi$  и удельного сцепления  $c$ , полученных при обработке результатов сдвиговых испытаний на отдельных монолитах. При этом таблицы составляются для тех показателей, которые фактически определяются при изысканиях и аргументировано используются при проектировании оснований на площадках данного региона. В тех случаях когда прогнозируемые показатели получены по несовершенной (с точки зрения проектирования) методике, прогнозные характеристики должны быть пересчитаны с помощью переходных коэффициентов, установленных специальным статистическим исследованием (например, коэффициентами перехода от компрессионного модуля деформации к штамповому).

1.3. Сфера практического применения табличных характеристик механических свойств грунтов определяется качеством и количеством фактического материала, используемого для построения таблиц, и характером статистической обработки этого материала. Для предварительных расчетов на стадии технико-экономического обоснования проекта можно ограничиться нормативными табличными характеристиками, дающими прогноз механических свойств грунтов в среднем (п. 1.4); таблицы нормативных характеристик могут быть получены достаточно стандартными и почти полностью автоматизированными методами обработки данных. Для окончательных расчетов оснований на стадиях технического проекта и рабочих чертежей (либо на стадии техно-рабочего проекта) следует пользоваться расчетными (гарантированными) характеристиками, величина которых учитывает точность косвенного прогноза обобщенных показателей механических свойств грунтов на отдельных площадках изысканий (п. 1.6). Для получения расчетных характеристик необходимо более детальный геолого-статистический анализ фактического материала (включая выделение инженерно-геологических элементов на представленных в нем объектах изысканий) и введение соответствующей структуры массива исходных данных.

**1.4.** Нормативным значением показателя некоторого механического свойства грунтов (фактора-функции) при фиксированных значениях показателей одного или нескольких физических свойств (факторов-аргументов) следует считать величину, которая дается уравнением регрессии данной функции по данным аргументам. Это уравнение строится методами корреляционно-регрессионного анализа на основе параллельных определений физических и механических характеристик — обобщенных (пп. 4.8—4.10) или индивидуальных (пп. 4.5—4.7). Составляя таблицы нормативных характеристик, можно сводить в одну таблицу результаты прогноза по нескольким уравнениям регрессии, охватывающим разные диапазоны изменения аргументов.

**1.5.** Необходимым условием применения таблицы нормативных характеристик является статистическая значимость зависимости, положенной в ее основу, и значимость каждого из факторов-аргументов (пп. 4.11—4.12). Количество параллельных индивидуальных наблюдений для построения уравнения регрессии должно быть порядка нескольких сотен (при условии представительности данных для всего изучаемого комплекса грунтов).

**1.6.** Точность косвенного прогноза обобщенных показателей механических свойств грунтов обусловлена в первую очередь природными особенностями корреляции между свойствами грунтов, специфичными для данного регионального геолого-генетического комплекса. Она связана с существованием некоторого остаточного разброса истинных обобщенных показателей механических свойств при одних и тех же показателях состава, состояния и строения грунтов для разных инженерно-геологических элементов в пределах всего изучаемого комплекса; характеристикой этого разброса является так называемая остаточная дисперсия нормативных характеристик (п. 5.2). Поэтому расчетным значением фактора-функции при фиксированных значениях факторов-аргументов следует считать величину, которая определяется как толерантный предел для наблюдений функций, имеющих вышеупомянутую остаточную дисперсию (п. 5.4).

**1.7.** Для вычисления расчетных значений фактора-функции дополнительным требованием к количеству и качеству фактического материала является достаточная представительность входящих в него данных по отдельным инженерно-геологическим элементам (минимум 5—10 определений фактора-функции в среднем на элемент).

**1.8.** Общая схема проведения геолого-статистического исследования с целью составления региональных таблиц включает в себя следующие элементы:

предварительный геологический анализ и статистическая обработка фактического материала;

исследование информативности косвенных признаков и выбор оптимального набора аргументов;

выбор вида прогнозирующего уравнения и его построение;

оценка остаточного разброса прогнозируемого показателя, построение толерантных пределов для прогноза расчетных показателей;

исследование устойчивости и области применения найденных зависимостей путем проведения экзамена на независимом материале; построение таблиц на основе найденных зависимостей.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ГЕОЛОГО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**2.1.** В ходе предварительного геологического анализа экспериментальных данных необходимо прежде всего отбраковать сомнительные индивидуальные значения всех показателей, вызванные повреждением монолитов при транспортировке и хранении, лабораторными ошибками или другими причинами.

**2.2.** Удобным способом предварительного анализа данных является изучение парных корреляционных точечных графиков показателей. В частности, на этих графиках бывают видны отдельные экспериментальные значения, резко выделяющиеся из общей тенденции зависимости. Наличие таких точек на нескольких графиках (т. е. по нескольким парам показателей) является достаточным основанием для того, чтобы информация, относящаяся к соответствующим образцам, была исключена из дальнейшего рассмотрения.

**2.3.** Необходимой составной частью предварительной обработки данных для оценки расчетных показателей свойств грунтов, помимо описанных выше процедур, является расчленение исходного массива информации на части, отвечающие опробованию отдельных инженерно-геологических элементов, т. е. частей массивов горных пород с чисто случайной изменчивостью основных физико-механических показателей, сравнимых по площади с размерами проектируемых инженерных сооружений. Весь изучаемый комплекс должен рассматриваться как объединение инженерно-геологических элементов. Выделение инженерно-геологических элементов на каждой площадке изысканий, представленной в экспериментальном материале, производится в соответствии с установками нормативных документов (ГОСТ 20552—75).

**2.4.** Последовательной формальной методикой расчленения неоднородных массивов горных пород в настоящее время еще нет. Для небольших площадок изысканий (площадью порядка 1 га) можно ограничиться исследованием генетической однородности толщи и анализом изменчивости свойств по глубине. На больших площадках необходимо подвергать выборки основных физических характеристик грунтов (число пластичности, коэффициент пористости, влажности и т. п.) анализу на статистическую однородность распределения. Рекомендуемая методика такого анализа изложена в прил. 2.

**2.5.** Вновь объединять выделенные на каждой площадке инженерно-геологические элементы, сходные по физико-механическим свойствам (например, используя известные критерии сравнения средних значений показателей), рекомендуется лишь для близко расположенных площадок (с расстоянием не более 1 км).

**2.6.** В результате предварительной обработки экспериментальных данных формируется массив для дальнейшей статистической обработки. Прогнозируя какой-либо конкретный показатель механического свойства грунтов, удобно представлять этот массив в виде матрицы:

$$\left( \begin{array}{cccccc} x_{11}, & x_{21}, & \dots, & x_{l1}, & \dots, & x_{n1}, & y_1 \\ x_{12}, & x_{22}, & \dots, & x_{l2}, & \dots, & x_{n2}, & y_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{1j}, & x_{2j}, & \dots, & x_{lj}, & \dots, & x_{nj}, & y_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{1m}, & x_{2m}, & \dots, & x_{lm}, & \dots, & x_{nm}, & y_m \end{array} \right). \quad (1)$$

Здесь  $x_{ij}$  — результат определения  $i$ -го физического свойства на  $j$ -м образце; если проведено расчленение исходного массива информации (п. 2.3), то  $x_{ij}$  есть среднее арифметическое значение показателей  $i$ -го свойства в пределах  $j$ -го инженерно-геологического элемента:

$$x_{ij} = \frac{1}{m_{ij}} \sum_{l=1}^{m_{ij}} x_{lij}; \quad (2)$$

$y_j$  — соответствующие значения (индивидуальные или обобщенные) показателя механического свойства;  $n$  — число факторов-аргументов;  $m$  — число образцов (или число элементов);  $m_{ij}$  — число определений  $i$ -го физического свойства в пределах  $j$ -го элемента.

2.7. В случае перехода к обобщенным характеристикам грунтов необходимо сохранить для дальнейших вычислений (п. 5.2) величину так называемой внутриэлементной дисперсии фактора-функции:

$$s_{\text{вн}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m m_i - m} \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{m_i} (y_{il} - \bar{y}_i)^2, \quad (3)$$

где  $m_i$  — число определений механического свойства, а  $\bar{y}_i$  и  $y_{il}$  — соответственно среднее и частные значения показателя этого свойства в пределах  $j$ -го элемента.

### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОСВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ (ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД)

3.1. Отбор информативных показателей физических свойств грунтов должен осуществляться как на основе геологических соображений (пп. 3.2—3.7), так и методами корреляционного анализа (пп. 3.9—3.12). Рациональное сочетание формальных методов и геологического подхода при подборе информативного набора показателей позволяет сократить время машинного счета и приводит к более эффективному результату.

3.2. Имеющийся опыт показывает, что все показатели физических свойств грунтов могут быть условно разделены на три группы, внутри которых они тесно скоррелированы между собой.

К первой относятся показатели плотности, являющиеся в известной мере характеристиками структуры породы: объемная масса  $\gamma$  скелета грунта, объемная масса грунта  $\gamma_0$  при естественной влажности, пористость  $n$  или коэффициент пористости  $e$ . Если грунт

находится в водонасыщенном состоянии (степень влажности близка к единице), сюда же следует отнести естественную влажность  $W$ .

Ко второй группе относятся показатели состава, или «глинистости» грунта: пределы  $W_p$ ,  $W_L$  и число пластичности  $I_p$ , показатели граносостава, показатель консистенции  $I_L$ .

В тех случаях, когда грунт находится в состоянии неполного водонасыщения ( $G < 0.8$ ), можно выделить третью группу — показатели влажности, к которым относится естественная влажность  $W$  и степень влажности  $G$ .

3.3. Показатели свойств грунтов внутри каждой группы (как непосредственно определяемые, так и рассчитываемые) в известной мере дублируют друг друга, поэтому в рациональный набор аргументов прогнозирующего уравнения, как правило, целесообразно включать не более одного показателя из каждой группы. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать показателям, непосредственно определяемым в лаборатории.

3.4. Для глинистых водонасыщенных грунтов наиболее тесные связи прочностных показателей (по опыту исследований) наблюдаются с показателями второй группы (в частности, с содержанием глинистой фракции — например, для аллювия) и несколько менее тесные — показателями первой группы.

3.5. Для глинистых неводонасыщенных грунтов или грунтов с переменной степенью влажности (например, лесса) оптимальный набор показателей должен включать наряду с показателями первой и второй группы также степень влажности  $G$  или естественную влажность  $W$ .

3.6. Для песчаных грунтов прочностные и деформационные показатели наиболее тесно связаны с коэффициентом пористости при одновременном учете номенклатурного вида песка.

3.7. В необходимых случаях в качестве возможных аргументов прогнозирующих уравнений регрессии должны быть исследованы степень засоленности грунтов, содержание органического вещества и т. п.

3.8. Для предварительного визуального анализа степени и характера взаимосвязей между показателями целесообразно построение точечных графиков парных зависимостей прогнозируемого показателя от каждой из физических характеристик.

3.9. Формальное исследование информативности косвенных признаков основано на анализе парных и частных коэффициентов корреляции, характеризующих тесноту связи каждого из аргументов  $x_i$  с прогнозируемым харрактеристикой  $y$ .

3.10. Парные коэффициенты корреляции между индивидуальными значениями показателей вычисляются по формуле

$$r(x_i, x_l) = \frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{lj} - \bar{x}_l)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^m (x_{lj} - \bar{x}_l)^2}} \quad (i, l = 1 \div n), \quad (4)$$

где  $m$  — общее число параллельных определений показателей, а

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (i = 1 \dots n). \quad (5)$$

Аналогично вычисляются и коэффициенты корреляции  $r(x_i, y)$ . 3.11. Парные коэффициенты корреляции между обобщенными характеристиками инженерно-геологических элементов вычисляются по формуле

$$r^*(x_i, x_l) = \frac{\sum_{j=1}^m m_j (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)(\bar{x}_{lj} - \bar{x}_l)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m m_j (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^m m_j (\bar{x}_{lj} - \bar{x}_l)^2}} \quad (6)$$

( $i, l = 1, 2, \dots, n$ ; аналогичная формула справедлива и для  $r^*(x_i, y)$ . В формуле (6) средние поэлементные значения  $\bar{x}_{ij}$  и  $\bar{y}_j$  вычисляются по всем индивидуальным значениям показателей  $x$  и  $y$ , входящим в  $j$ -й элемент [формулы (2), (3)]; общие средние значения вычисляются по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_j} \sum_{j=1}^m m_j \bar{y}_j; \quad \bar{x}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_j} \sum_{j=1}^m m_j \bar{x}_{ij} \quad (i = 1 \dots n). \quad (7)$$

Во всех случаях веса  $m_j$  в формулах (6) и (7) равны числу определений механического свойства  $y$  в пределах  $j$ -го элемента.

3.12. Важными характеристиками связи являются частные коэффициенты корреляции, характеризующие для любых двух показателей степень их зависимости, очищенной от влияния остальных показателей.

Для их вычисления рассматривается симметричная матрица парных коэффициентов корреляции:

$$R = \begin{pmatrix} r(x_1, x_1) r(x_1, x_2) \dots r(x_1, x_n) r(x_1, y) \\ r(x_2, x_1) r(x_2, x_2) \dots r(x_2, x_n) r(x_2, y) \\ \vdots \\ r(x_n, x_1) r(x_n, x_2) \dots r(x_n, x_n) r(x_n, y) \\ r(y, x_1) r(y, x_2) \dots r(y, x_n) r(y, y) \end{pmatrix}; \quad (8)$$

в случае обобщенных показателей элементами матрицы  $R$  являются величины  $r^*$  (6). Тогда частные коэффициенты корреляции  $\rho(x_i, y)$  фактора  $x_i$  с функцией  $y$  вычисляются по формуле

$$\rho(x_i, y) = \frac{\| R^{(i, n+1)} \|}{\sqrt{\| R^{(i, i)} \| \cdot \| R^{(n+1, n+1)} \|}}, \quad (9)$$

где  $\| R^{(i, j)} \|$  — минор матрицы  $R$ , получаемый после вычеркивания  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца.

3.13. Выбор оптимального набора факторов-аргументов, как правило, осуществляется с применением ЭВМ в ходе построения прогнозирующего уравнения. Наиболее употребительные методы выбора описаны далее.

Если в используемой программе отсутствует формализованная процедура отбора информативных показателей, они могут быть выбраны на основе изучения и сопоставления величин парных и частных коэффициентов корреляции, рассчитанных автоматически или вручную.

3.14. Независимо от того, использовалась ли автоматизированная система отбора информативных показателей или они были выбраны на основе анализа парных и частных коэффициентов корреляции, полученный набор аргументов может быть откорректирован на основе содержательных соображений.

Например, если парные и частные коэффициенты корреляции нескольких факторов-аргументов с фактором-функцией в пределах одной группы (см. п. 3.2) имеют близкие выборочные значения, то допустимо выбрать в качестве аргумента уравнение регрессии любой из этих факторов, руководствуясь соображениями о точности их определения, увеличении объема массива исходных данных, стандартизации входа в таблицы и т. п.

Следует помнить, что окончательный выбор прогнозирующего уравнения может быть сделан только после процедуры «экзамена» (см. разд. 6). До этого момента рекомендуется рассматривать несколько различных уравнений, если они дают примерно одинаковую точность прогноза механической характеристики.

3.15. Наряду с показателями самих физических свойств аргументами прогнозирующего уравнения в принципе могут быть и их простейшие преобразования (логарифмы, степени, смешанные произведения и пр.), поэтому набор аргументов  $X_1, X_2, \dots, X_p$  (см. разд. 4) может не совпадать с исходным набором показателей физических свойств  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (см. п. 2.6).

## 4. ВЫБОР И ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ УРАВНЕНИЙ

4.1. Построение прогнозирующего уравнения для того или иного механического показателя, как правило, сводится к оценке параметров линейных зависимостей

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p, \quad (10)$$

где  $Y, X_1, \dots, X_p$  — либо исходные показатели механического и нескольких физических свойств ( $y, x_1, \dots, x_n$ ), либо простейшие преобразования этих показателей (например, логарифмы).

4.2. Выбор конкретного вида зависимости типа (10) осуществляется на основе предварительного анализа точечных корреляционных графиков либо путем пробной аппроксимации имеющихся данных кривыми разного вида с последующим сравнением качества прогноза. Как показывает опыт, непосредственная оценка параметров криволинейных зависимостей (в частности, полиномиальных) не вполне корректна, так как природная криволинейность зависимости тех или иных показателей, как правило, сопровождается изменчивостью остаточного разброса. Поэтому в таких случаях рекомендуется путем преобразования исходных факторов подбирать для аппроксимации возможно лучшие линейные зависимости типа (10).

4.3. Практика показывает, что применять преобразования исходных факторов чаще всего приходится при прогнозе модуля деформации

ции (*E*) и удельного сцепления (*c*). В частности, удовлетворительное качество прогноза обычно дают уравнения вида:

$$\lg E = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n; \quad (11)$$

$$\lg c = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n, \quad (12)$$

где  $x_1, \dots, x_n$  — исходные показатели физических свойств.

4.4. Для оценки параметров  $a_0, a_1, \dots, a_p$  зависимости (10) применяется в той или иной модификации метод наименьших квадратов (МНК). Ниже в пп. 4.5—4.7 приводятся основные расчетные методы для построения зависимостей между индивидуальными значениями показателей с помощью традиционного МНК, в пп. 4.8—4.10 — методы построения зависимостей между обобщенными значениями показателей, для которых рекомендуется использовать взвешенный МНК. Все формулы приводятся в обычном и матричном виде. Использование матричной записи значительно упрощает алгоритм вычислений, однако для некоторых типов ЭВМ такие возможности ограничены размерами оперативной памяти и недостатками математического обеспечения.

4.5. При исследовании зависимостей между индивидуальными значениями показателей исходят из модели

$$Y_j = a_0 + a_1 X_{1j} + a_2 X_{2j} + \dots + a_p X_{pj} + \varepsilon_j, \quad (13)$$

где  $j = 1, 2, \dots, m$  — индекс индивидуальных значений ( $m$  — общее число параллельных определений показателей),  $\varepsilon_j$  — случайные ошибки, подчиняющиеся нормальному распределению, не зависящие от факторов-аргументов и друг от друга,  $M\varepsilon_j = 0$ ,  $D\varepsilon_j = \sigma^2$  ( $\sigma^2$  — так называемая условная дисперсия показателя  $Y$ ).

Для матричной записи этой модели удобно ввести матрицу независимых переменных  $X$ :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{p1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1m} & X_{2m} & \dots & X_{pm} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

а также вектор-столбец  $\vec{Y}$  механического показателя с координатами  $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), вектор параметров  $\vec{a}$  с координатами  $a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, p$ ) и вектор ошибок  $\vec{\varepsilon}$ . Тогда уравнение (13) записывается так:

$$\vec{Y} = X \vec{a} + \vec{\varepsilon}. \quad (15)$$

4.6. Основное требование обычного МНК заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от эмпирических точек  $\{Y_j, X_{1j}, \dots, X_{pj}\}$  до прогнозирующей плоскости (10):

$$\sum_{j=1}^m [Y_j - a_0 - a_1 X_{1j} - \dots - a_p X_{pj}]^2 \Rightarrow \min. \quad (16)$$

Оценки  $a_1, \dots, a_p$  параметров  $a_1, \dots, a_p$ , доставляющие минимум функционалу (16), являются корнями так называемой системы нормальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{11}\alpha_1 + k_{12}\alpha_2 + \dots + k_{1p}\alpha_p = k_1; \\ k_{21}\alpha_1 + k_{22}\alpha_2 + \dots + k_{2p}\alpha_p = k_2; \\ \vdots \\ k_{p1}\alpha_1 + k_{p2}\alpha_2 + \dots + k_{pp}\alpha_p = k_p, \end{array} \right. \quad (17)$$

коэффициентами которой служат элементы симметричной матрицы  $K$  выборочных ковариаций

$$k_{il} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)(X_{lj} - \bar{X}_l) \quad (i, l = 1 \div p), \quad (18)$$

а также элементы столбца свободных членов

$$k_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)(Y_j - \bar{Y}) \quad (i = 1 \div p). \quad (19)$$

Поэтому величины  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) вычисляются по формуле

$$a_i = \frac{\|K^{(i)}\|}{\|K\|}, \quad (20)$$

где  $\|K\|$  — определитель матрицы  $K$  (18), а  $\|K^{(i)}\|$  — определитель матрицы, которая получается из  $K$  после замены  $i$ -го столбца столбцом свободных членов  $k_i$ .

После этого оценка  $a_0$  свободного члена зависимости (10) определяется по формуле

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X}_1 - \dots - a_p \bar{X}_p. \quad (21)$$

В матричной форме систему (17) можно записать в виде

$$X^T \vec{a} = X^T \vec{Y}, \quad (22)$$

где  $X^T$  — матрица, транспонированная к  $X$ ,  $\vec{a}$  — вектор-столбец оценок  $a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, p$ ). Тогда МНК — оценка вектора  $\vec{a}$  дается выражением

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{Y}. \quad (23)$$

4.7. Оценкой условной дисперсии  $\sigma^2$  является так называемая остаточная дисперсия

$$s^2 = \frac{1}{m-p-1} \sum_{j=1}^m [Y_j - a_0 - a_1 X_{1j} - \dots - a_p X_{pj}]^2, \quad (24)$$

которая служит мерой качества аппроксимации исходных данных.

4.8. При построении уравнения связи между обобщенными характеристиками групповых принадлежностей принимается следующая модель для обобщенных значений:

$$\vec{Y}_j = a_0 + a_1 \bar{X}_{1j} + \dots + a_p \bar{X}_{pj} + \delta_j \quad (j = 1 \div m), \quad (25)$$

где  $\vec{Y}_j$ ,  $\bar{X}_{1j}$ , ...,  $\bar{X}_{pj}$  — средние значения какого-либо из показателей механических свойств  $y$  и показателей физических свойств  $x_i$  (или их преобразований), полученные по всем индивидуальным зна-

чениям в пределах  $j$ -го инженерно-геологического элемента;  $\delta_j$  подчиняются нормальному распределению, не зависят от факторов-аргументов и друг от друга  $M\delta_j = 0$ ,  $D\delta_j = \frac{\sigma^2}{m_j}$ , где  $m_j$  — число определений показателя  $y$  в пределах  $j$ -го элемента.

Введя матрицу обобщенных показателей физических свойств  $X$ , вектор-столбец обобщенных механических показателей  $\vec{Y}$  длины  $m$ , а также вектора  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  аналогично п. 4.5, модель (25) можно записать так:

$$\vec{Y} = X\vec{a} + \vec{b}. \quad (26)$$

4.9. Основное требование взвешенного МНК состоит в минимизации функционала

$$\sum_{j=1}^m m_j [\vec{Y}_j - a_0 - a_1 \vec{X}_{1j} - \dots - a_p \vec{X}_{pj}]^2 \Rightarrow \min. \quad (27)$$

Оценки  $a_0, a_1, \dots, a_p$  параметров  $a_0, a_1, \dots, a_p$ , доставляющие минимум функционалу (27), определяются по формулам (20)–(21), с той разницей, что элементы ковариационной матрицы  $K$  и столбца  $k$  даются формулами:

$$k_{il} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_j} \sum_{j=1}^m m_j (\vec{X}_{ij} - \bar{X}_i) (\vec{X}_{lj} - \bar{X}_l) \quad (i, l = 1 \div n), \quad (28)$$

$$k_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_j} \sum_{j=1}^m m_j (\vec{X}_{ij} - \bar{X}_i) (\bar{Y}_j - \bar{Y}) \quad (i = 1 \div n), \quad (29)$$

а общие средние  $\bar{Y}, \bar{X}_1, \dots, \bar{X}_p$  — формулой (7).

В матричной форме система нормальных уравнений имеет вид

$$X^T W \vec{X} \vec{\alpha} = X^T W \vec{Y}, \quad (30)$$

где  $W$  — диагональная матрица:

$$W = \begin{pmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & m_m \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Оценка вектора  $\vec{a}$  дается выражением

$$\vec{\alpha} = (X^T W X)^{-1} X^T W \vec{Y}. \quad (32)$$

4.10. Мерой качества аппроксимации является величина остаточной дисперсии

$$s_1^2 = \frac{1}{m-p-1} \sum_{j=1}^m [\vec{Y}_j - a_0 - a_1 \vec{X}_{1j} - \dots - a_p \vec{X}_{pj}]^2. \quad (33)$$

4.11. Важным пунктом, во многом определяющим окончательный вид прогнозирующего уравнения, является использование критериев проверки статистической значимости зависимости в целом (общий  $F$ -критерий, п. 4.12) и каждого из аргументов в отдельности (частный  $F$ -критерий, п. 4.13). При построении таблиц нормативных характеристик проверка значимости результатов по этим критериям является необходимым условием использования построенных уравнений.

4.12. Для построения общего  $F$ -критерия необходимо вычислить величину

$$\varphi^2 = \sum_{j=1}^m (\vec{Y}_j - \bar{Y})^2, \quad (34)$$

$$\text{где } \hat{Y}_j = a_0 + a_1 \vec{X}_{1j} + \dots + a_p \vec{X}_{pj} \quad (j = 1 \div m) \quad (35)$$

суть прогнозные значения, получаемые по проверяемому уравнению для экспериментальных индивидуальных или обобщенных значений аргументов  $X_{1j}, \dots, X_{pj}$ ;  $\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_j$  при обработке индивидуальных параллельных определений показателей или  $\bar{Y} = \frac{1}{\sum m_j} \sum_{j=1}^m m_j \bar{Y}_j$  — при обработке обобщенных параллельных определений показателей [см. обозначения по формулам (1)–(3)].

Для применения общего  $F$ -критерия необходимо, задавшись надежностью  $(1-\alpha)\%$ , найти односторонний  $(1-\alpha)$ -процентный предел  $F$ -распределения с  $p=p+1$  и  $v=m-p-1$  степенями свободы (табл. 3, прил. I при  $q=\alpha$ ), т. е. число  $F_0(1-\alpha; p, v)$ . Тогда, если отношение

$$F = \frac{\varphi^2}{s^2}, \quad (36)$$

где  $\varphi^2$  вычисляется по формуле (34), а  $s^2$  — остаточная дисперсия [формула (24) для индивидуальных или формула (33) для обобщенных показателей], удовлетворяет условию

$$F > F_0(1-\alpha; p, v), \quad (37)$$

то проверяемая зависимость статистически значима. В противном случае эта зависимость на выбранном уровне  $(1-\alpha)\%$  незначима. Как правило, рекомендуется использовать общий  $F$ -критерий при  $1-\alpha=90\%$ .

4.13. Для построения частного  $F$ -критерия, проверяющего значимость каждого вводимого в зависимость (10) последнего аргумента  $X_p$ , необходимо наряду с величиной (34) иметь величину

$$\varphi_1^2 = \sum_{j=1}^m (\hat{Y}_j - \bar{Y})^2, \quad (38)$$

где прогнозные значения  $\hat{Y}_j$  получены по уравнению

$$\hat{Y}_j = a'_0 + a'_1 X_{1j} + \dots + a'_{p-1} X_{pj},$$

построенному по изложенным в настоящей главе правилам без участия аргумента  $X_p$ . Для признания статистической значимости введения аргумента  $X_p$  в прогнозирующую зависимость необходимо выполнение условия

$$F' = \frac{\varphi^2 - \varphi_1^2}{s^2} > F_0' (1 - \alpha; \mu, v), \quad (40)$$

где  $F_0' (1 - \alpha; \mu, v)$  — односторонний  $(1-\alpha)$ -процентный предел  $F$ -распределения с  $\mu=1$  и  $v=m-p-1$  степенями свободы (табл. 3, прил. 1, левые столбцы,  $q=a$ ).

При использовании критерия (40) также обычно полагают  $1-\alpha=90\%$ .

Аналогичные критерии следуют строить для проверки целесообразности введения в уравнение (10) каждого из аргументов.

**4.14.** В ходе автоматизированного построения прогнозирующих уравнений следует осуществлять ряд операций по определению оптимального набора аргументов. Эти операции производятся двумя наиболее употребительными методами: методом исключения аргументов (п. 4.15) и методом включения аргументов (п. 4.16).

**4.15.** Метод исключения переменных предусматривает расчет исходного уравнения регрессии с учетом всех заранее отобранных независимых переменных. Затем вычисляются частные  $F$ -критерии для оценки вкладов всех переменных. Если минимальное значение меньше порога  $F_0(1-\alpha; \mu, v)$ , то соответствующая переменная исключается. Эта процедура повторяется до тех пор, пока вклад каждого независимого аргумента прогнозирующего уравнения не окажется значимым.

**4.16.** Метод включения построен на процедуре последовательного введения переменных в уравнение, что позволяет избежать обработки большего числа переменных, чем это необходимо.

Первым выбирается фактор-аргумент, имеющий максимальный коэффициент парной корреляции с фактором-функцией. В дальнейшем порядок включения (по очереди) оставшихся переменных определяется с помощью частного коэффициента корреляции как меры информативности признаков, еще не включенных в уравнение.

На каждой стадии вычисляется частный  $F$ -критерий, который показывает, вносит ли эта переменная значимый вклад в регрессию по сравнению с ранее введенными в уравнение. Если величина частного  $F$ -критерия оказывается незначимой, переменная в уравнении не включается.

Возможно, что какой-либо показатель, достаточно информативный на ранних стадиях, впоследствии может оказаться излишним за счет взаимосвязи его с другими переменными, дополнительно введенными в модель. В силу этого на каждой стадии необходимо производить перестановку и вычислять частный  $F$ -критерий для каж-

дой переменной, содержащейся в модели, как если бы она была введена последней. На основании такой проверки переменная, которая дает незначимый вклад, исключается из модели. Этот процесс продолжается до тех пор, пока модель не приобретет устойчивый вид и никакие переменные нельзя будет добавить или исключить из нее.

## 5. ПОСТРОЕНИЕ ТОЛЕРАНТНОГО ПРЕДЕЛА ДЛЯ ПРОГНОЗА РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ

**5.1.** Для корректного прогноза расчетных характеристик механических свойств грунтов необходимо иметь уравнение регрессии вида (10), построенное в результате обработки обобщенных показателей, дающее прогноз нормативной характеристики фактора-функции. Кроме того, необходимо располагать экспериментальной величиной остаточной дисперсии  $s_1^2$  (33), а также значением внутриэлементной дисперсии фактора-функции  $s_{\text{ви}}^2$  (3), вычисленной для показателя  $Y$ .

**5.2.** В качестве расчетных характеристик принимаются толерантные пределы для позлементных средних значений показателей свойств грунтов, которые строятся на основе остаточной (условной) дисперсии нормативных характеристик фактора-функции  $Y$ , оцениваемой по формуле

$$\hat{s}_{\text{он}}^2 = s_1^2 - \frac{1}{m} s_{\text{ви}}^2, \quad (41)$$

где  $\bar{m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m m_j$  — среднее число определений механического показателя в инженерно-геологических элементах, представленных в исходной информации.

**5.3.** При малых истинных величинах условной дисперсии нормативных характеристик оценка (41) может быть недостоверной и даже (в силу случайных факторов) отрицательной. В этих случаях рекомендуется пользоваться гарантированной (зашвашенной) оценкой этой дисперсии, которая определяется по формуле

$$\hat{s}_{\text{он}}^2 = s_1^2 - \frac{1}{m} s_{\text{ви}}^2 + \sqrt{8 \left[ \frac{s_{\text{ви}}^4}{m \bar{m}^2 (\bar{m} - 1)} + \frac{s_1^4}{m - n - 1} \right]}. \quad (42)$$

Возможны также другие способы оценки этой дисперсии; все они основаны на исключении лишней внутриэлементной дисперсии механического показателя.

**5.4.** После получения оценки  $\hat{s}_{\text{он}}^2$  односторонний доверительный  $(1-\alpha)$ -процентный толерантный предел строится по формуле

$$Y^*(X_1, \dots, X_p) = \hat{Y}(X_1, \dots, X_p) \pm \hat{s}_{\text{он}} \sqrt{\frac{d^2}{m}}, \quad (43)$$

где  $\hat{Y}$  — прогнозное значение нормативной характеристики, определяемое для данных значений аргументов по уравнению (10);  $t_a$  — односторонний (правый)  $(1-\alpha)$ -процентный предел нормального распределения (табл. 1, прил. 1);  $m_0$  — общее число определений механического показателя  $\left( m_0 = \sum_{j=1}^m m_j \right)$ .

Величина  $d^2$  вычисляется в зависимости от числа независимых переменных. При  $p=1$

$$d^2 = 1 + \frac{m_0 (X - \bar{X})^2}{\sum_{j=1}^m m_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2}, \quad (44)$$

где  $\bar{X}_j$  и  $\bar{X}$  — соответственно позлементные средние и общее среднее аргумента  $X$  в экспериментальном материале; при  $p > 1$

$$d^2 = 1 + \frac{\sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^p \|K^{(i, l)}\| (X_i - \bar{X}_l)(X_l - \bar{X}_i)}{\|K\|}, \quad (45)$$

где  $\|K\|$  — определитель ковариационной матрицы (см. пп. 4.6, 4.9), а  $\|K^{(i, l)}\|$  — алгебраическое дополнение элемента  $k_{il}$  этой матрицы.

В матричном виде величина  $d^2$  при любом  $p$  определяется выражением

$$d^2 = \vec{X}^T (X^T W X)^{-1} \vec{X}, \quad (46)$$

где  $X$  и  $W$  — матрицы, упомянутые соответственно в пп. 4.8 и 4.9;  $\vec{X}$  — вектор-столбец нормативных физических характеристик с координатами  $X_0=1$ ,  $X_i$  ( $i=1 \dots p$ ).

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАЙДЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕННОСТИ

6.1. Первостепенную важность для окончательной проверки зависимости между свойствами грунтов имеет испытание параметров этих зависимостей на дополнительном (независимом) экспериментальном материале. Для этого с самого начала имеющиеся данные должны быть поделены на обучающую и экзаменационную выборку. Все процедуры, описанные в предыдущих главах, на первом этапе исследования относятся к обучающей части данных.

6.2. Процедуру экзамена найденных зависимостей можно спланировать двумя разными методами.

В одном случае как обучающая, так и экзаменационная выборка может быть представительной для всего изучаемого региона (экзаменационную выборку рекомендуется делать меньшей по объему). В этом случае регрессионное уравнение может быть рекомендовано для составления региональной таблицы, если выполняется ряд критерий, описанных в пп. 6.6—6.10.

6.3. В другом случае обучающая и экзаменационная выборки могут представлять разные субрегионы. К выделению субрегионов следует прибегать в том случае, когда исследователь имеет основания предполагать изменение оптимальных зависимостей (в частности, степени информативности тех или иных аргументов) при переходе от одного субрегиона к другому за счет разницы местных инженерно-геологических условий (например, степени водонасыщенности грунтов).

Целью экзамена в этом случае является установление области применимости найденных зависимостей. Если уравнение, построенное по одному субрегиону, выдерживает экзамен и на другом субрегионе, то его можно распространить на весь регион<sup>1</sup>. Отрицательный исход экзамена означает, что найденную зависимость можно рекомендовать только для обучающего субрегиона (разумеется, после проверки ее устойчивости в пределах этого субрегиона).

6.4. Формально задача экзамена найденных зависимостей формулируется в терминах проверки гипотез о том, что параметры распределения тех или иных статистик, составленных на экзаменационном материале, не противоречат оценкам этих параметров, полученным в ходе обучения. Ниже в пп. 6.6—6.7 описаны критерии, специфичные для зависимостей между обобщенными, а в п. 6.8 — между индивидуальными значениями показателей; в п. 6.10 описан обобщенный критерий для проверки качества прогноза в части расчетных характеристик механических свойств грунтов.

6.5. Для составления экзаменационных статистик дополнительный экспериментальный материал подвергается той же предварительной обработке и представляется в том же виде, что и материалы обучения. Составляется матрица параллельных определений показателей

$$X' = \begin{bmatrix} X'_{11} X'_{21} \dots X'_{p1} Y'_1 \\ X'_{12} X'_{22} \dots X'_{p2} Y'_2 \\ \dots \dots \dots \dots \\ X'_{1m'} X'_{2m'} \dots X'_{pm'} Y'_{m'} \end{bmatrix}, \quad (47)$$

где  $m'$  — общее число параллельных определений в экзаменационной выборке (соответственно число инженерно-геологических элементов, представленных в экзаменационной выборке).

6.6. Приступая к экзамену зависимости между обобщенными показателями, необходимо проверить совпадение внутриматементной дисперсии механической характеристики в обучающей и экзаменационной выборках (43). Для того чтобы расхождение между величинами  $s_{bh}^2$  и  $s'_{bh}^2$  можно было считать незначимым при заданной надежности  $(1-\alpha)\%$ , должны выполняться одновременно два соотношения:

$$\frac{s_{bh}^2}{s'_{bh}^2} < F_0 \left( 1 - \frac{\alpha}{2}; \mu, v \right), \quad (48)$$

<sup>1</sup> С целью повышения точности прогноза в этом случае уравнение можно пересчитать, объединив обе выборки.

$$\frac{s_{\text{BH}}^2}{s_{\text{BH}}^2} < F_0 \left( 1 - \frac{\alpha}{2}; v, \mu \right), \quad (49)$$

где  $\mu = m_0 - m$  — число степеней свободы величины  $s_{\text{BH}}^2$ ,  $v = m'_0 - m'$  — число степеней свободы величины  $s_{\text{BH}}^2$  ( $m_0 = \sum_{j=1}^m m_j$ ,  $m'_0 = \sum_{j=1}^{m'} m'_j$ ). Величины в правых частях (48) и (49) берутся из прил. 1, табл. 3 ( $q = \frac{\alpha}{2}$ ).

6.7. Далее проверяется непротиворечие распределения выборочных средних значений показателей тем параметрам зависимостей, которые получены в процессе обучения. Для этого составляются нормированные отклонения средних значений

$$\xi_j = \frac{\bar{Y}'_j - a_0 - a_1 \bar{X}'_{1j} - \dots - a_p \bar{X}'_{pj}}{\sqrt{s_1^2 + s_{\text{BH}}^2/m'_j}} \quad (j = 1 \div m'), \quad (50)$$

где параметры  $a_0, a_1, \dots, a_p, s_1^2, s_{\text{BH}}^2$  берутся по материалам обучения, а величины  $\bar{Y}'_j, \bar{X}'_{1j}, \dots, \bar{X}'_{pj}$  — из экзаменационной выборки. Результат экзамена считается положительным (при заданной надежности  $(1-\alpha)\%$ , если выполняются следующие условия:

$$\left| \sum_{j=1}^{m'} \xi_j \right| / \sqrt{m'} < t \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right), \quad (51)$$

$$\chi_m^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) < \sum_{j=1}^{m'} \xi_j^2 < \chi_m^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right), \quad (52)$$

где  $t \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) - t \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right)$ -процентный предел нормального распределения (табл. 1, прил. 1,  $q = \frac{\alpha}{2}$ );  $\chi_m^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right)$  и  $\chi_m^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right)$  — соответственно  $\frac{\alpha}{2}$ -и  $\left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right)$ -процентные пределы распределения  $\chi^2$  с  $m'$  степенями свободы (табл. 2, прил. 1, в первом случае  $q = 1 - \frac{\alpha}{2}$ , во втором случае  $q = \frac{\alpha}{2}$ ).

6.8. При экзамене зависимостей между индивидуальными значениями составляются нормированные отклонения

$$y_j = \frac{Y'_j - a_0 - a_1 X'_{1j} - \dots - a_p X'_{pj}}{s} \quad (j = 1 \div m'), \quad (53)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_p, s$  — коэффициенты уравнения и остаточный стандарт по материалам обучения;  $Y'_j, X'_{ij}$  — данные экзаменационной выборки. Результат экзамена считается положительным, если

$$\left| \sum_{j=1}^{m'} y_j \right| / \sqrt{m'} < t \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right), \quad (54)$$

$$\chi_{m'}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) < \sum_{j=1}^{m'} y_j^2 < \chi_{m'}^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (55)$$

6.9. Для критериев (48)–(49), (51)–(52) и (54)–(55), как правило, рекомендуется брать  $1 - \alpha = 95\%$  (соответственно  $1 - \frac{\alpha}{2} = 97.5\%$ ).

6.10. Обобщенная проверка качества прогноза производится в том случае, когда получены толерантные  $(1-\alpha)$ -процентные пределы для прогноза расчетных характеристик механических свойств грунтов (43). По каждому набору средних значений аргументов в экзаменационном материале ( $\bar{X}'_{1j}, \dots, \bar{X}'_{pj}$ ) подсчитываются две доверительные границы для выборочных средних значений механического показателя:

$$Y_j^{(\text{B})} = \hat{Y} (\bar{X}'_{1j}, \dots, \bar{X}'_{pj}) + t_a \sqrt{\left( \hat{\sigma}_{\text{OH}}^2 + \frac{s_{\text{BH}}^2}{m'_j} \right) \left( 1 + \frac{d^2}{m_0} \right)}; \quad (56)$$

$$Y_j^{(\text{H})} = \hat{Y} (\bar{X}'_{1j}, \dots, \bar{X}'_{pj}) - t_a \sqrt{\left( \hat{\sigma}_{\text{OH}}^2 + \frac{s_{\text{BH}}^2}{m'_j} \right) \left( 1 + \frac{d^2}{m_0} \right)}, \quad (57)$$

где  $m'_j$  — число определений механического показателя в пределах  $j$ -го экзаменационного элемента.

Затем определяются величины

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если } Y_j^{(\text{H})} < \bar{Y}'_j < Y_j^{(\text{B})}, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

и величина

$$\gamma = \left| \sum_{j=1}^{m'} y_j - (1 - 2\alpha) m' \right| / \sqrt{2m' \alpha (1 - 2\alpha)}. \quad (58)$$

Результат экзамена считается положительным, если

$$\gamma < t \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right), \quad (59)$$

где  $t \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right) - t \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right)$ -процентный предел нормального распределения (прил. 1, табл. 2,  $q = \frac{\beta}{2}$ ).

6.11. Критерий (59) можно применять лишь при достаточно большом числе элементов информации  $m'$  в экзаменационном материале ( $m' \geq 10$ ); при  $m' < 25$  его можно применять для проверки только 85-процентных расчетных значений ( $\alpha = 15\%$ ,  $1-\alpha = 85\%$ ), а при  $m' \geq 25$  — также для проверки 95-процентных расчетных значений ( $\alpha = 5\%$ ,  $1-\alpha = 95\%$ ).

Для критерия (59) рекомендуется брать  $1-\beta = 95\%$ .

## 7. ПОСТРОЕНИЕ ТАБЛИЦ

7.1. Уравнение, на основе которого составляются таблицы нормативных и расчетных значений прогнозируемого показателя, должно быть оптимальным в смысле выполнения всей совокупности требований, изложенных в разд. 3—6. Решающее значение для выбора того или иного уравнения имеет качество прогноза реальных нормативных характеристик, которое оценивается на независимом экспериментальном материале в ходе экзамена.

7.2. Как показывает опыт, формальные результаты и выводы, получаемые в ходе статистического исследования, иногда вступают в противоречие с ожидаемым характером зависимости. Такое противоречие, как правило, объясняется спецификой обрабатываемого инженерно-геологического материала, статистические свойства которого не вполне соответствуют тем требованиям, которые обеспечивают оптимальность применяемых математических методов. Поэтому ниже (пп. 7.3—7.6) перечислены дополнительные соображения, позволяющие отобрать наиболее качественные и содержательные зависимости.

7.3. Большое влияние на характер получаемых результатов оказывает зависимость показателей физических свойств между собой. При формальном исследовании это влияние лучше всего исследовать путем анализа частных коэффициентов корреляции (п. 3.13) в частичном  $F$ -критерии (п. 4.13). Наглядно этот эффект нередко проявляется в том, что остаточная дисперсия  $s^2$  при введении дополнительных аргументов уменьшается крайне незначительно или даже увеличивается. Это в любом случае свидетельствует о нецелесообразности введения дополнительных аргументов.

7.4. Зависимостью между аргументами можно, как правило, объяснить и тот факт, что некоторые показатели физических свойств входят в прогнозирующие уравнения с коэффициентами противоположного знака (по сравнению с парными зависимостями между этим показателем и механической характеристикой). Такие уравнения не следует кладь в основу таблиц и nomogramm, хотя в общей процедуре выбора оптимального уравнения их автоматическая отбраковка может оказаться нецелесообразной.

7.5. Неформальными соображениями необходимо также пользоваться при определении диапазона аргументов, являющихся входами в таблицы. Границы изменения каждого показателя аргумента определяются имеющимися экспериментальными материалами. Не следует также давать прогноз механических характеристик при несовместимых (для данного комплекса) значениях аргументов (например, при относительно высоких показателях глинистости одновременно с низкой пористостью). Как правило, рекомендуется ориен-

тироваться на те наборы показателей-аргументов, которые представлены в экспериментальной выборке.

7.6. Результатирующие показатели-аргументы (входы в таблицы), диапазоны их изменения и дальность их ранжирования на выходах в таблицы для разных механических характеристик одного и того же регионального комплекса грунтов, вообще говоря, могут быть различными.

7.7. Дальность ранжирования того или иного физического показателя на выходах таблицы определяется степенью влияния данного показателя на изменение механической характеристики. Как правило, входные значения на полях таблицы рекомендуется задавать в виде интервалов; при этом в соответствующей клетке таблицы следует приводить наибольшее слабое прогнозное значение, соответствующее набору аргументов на концах данных интервалов. При наличии весьма существенной зависимости в большом диапазоне изменения аргументов можно также привести прогнозные характеристики для конкретных значений аргументов, сопроводив таблицу указанием на необходимость линейной интерполяции прогноза для промежуточных значений.

7.8. Удобной формой представления зависимости от одного аргумента являются графики нормативных и расчетных (для нескольких уровней надежности) значений механических характеристик. В случае зависимости от двух аргументов рекомендуется также строить nomogramмы для определения прогнозных характеристик по сериям кривых, представляющих зависимость этих характеристик от одного (более тесно связанного с данной функцией) физического показателя-аргумента при нескольких значениях другого аргумента.

7.9. В результате таблицах и nomogramмах должны как минимум содержаться:

а) прогноз нормативных значений механических характеристик по уравнениям типа (10);

б) прогноз расчетных значений механических показателей на 85-процентном и 95-процентном уровнях надежности [формула (43) соответственно при  $\alpha = 15\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ].

7.10. Рекомендуется также предоставить возможность инженеру-геологу, пользующемуся таблицами, определять гарантированные значения функции на других уровнях надежности. Для этого достаточно в каждой клетке таблицы наряду с прогнозом среднего значения привести величину  $\Delta$ , играющую роль стандарта прогноза. Такую таблицу следует сопроводить таблицей коэффициента  $t_{\alpha}$  (пределов нормального распределения; см. табл. 1, прил. 1), позволяющей вычислять расчетные значения при заданных  $\alpha$ . Величина  $\Delta$  определяется по формуле

$$\Delta = \hat{\sigma}_{\text{он}} \sqrt{1 + \frac{d^2}{m_0}} \quad (60)$$

[см. также формулу (43)].

## 8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ

8.1. Помимо технических проблем перед составителями таблиц стоят также проблемы их официального утверждения. Для утверждения таблиц необходимо сопровождать их следующими материалами:

1. Описанием инженерно-геологических условий района с обоснованием выделения инженерно-геологических комплексов; для которых составлены отдельные таблицы. Исходным фактическим материалом (в виде, удобном для возможной проверки вычислений).

2. Графическими материалами, включающими:

а) гистограммы распределения физических и механических характеристик по использованным фактическим данным;

б) точечные графики парных зависимостей прогнозируемых механических характеристик от наиболее информативных физических характеристик.

3. Сведениями о методах определения характеристик свойств грунтов.

4. Сведениями о числе опытов, использованных для составления каждой таблицы, процентах исключенных значений, методике исключения.

5. Обоснованием величин поправочных коэффициентов (например, в случае составления таблиц модулей деформации по данным компрессионных испытаний).

6. Описанием используемой методики статистической обработки опытных данных с ссылкой на использованные опубликованные программы для ЭВМ. Если программа не опубликована, необходимо представить текст программы, инструкцию к ее использованию и исходный материал, набитый на перфокарты или ленту.

7. Результатами исследований, содержащими:

- а) статистические критерии или величины коэффициентов корреляции, обосновывающие выбор наиболее информативных физических показателей и наилучших уравнений прогноза;

- б) величины полученных дисперсий факторов-функций;
- в) уравнения, принятые для составления таблиц;
- г) величины доверительных интервалов при переходе к расчетным значениям характеристик.

8. Фактическим материалом для проведения экзамена, его описанием, результатами экзамена.

9. Сведениями об изменчивости физических характеристик грунтов региона в пределах инженерно-геологических элементов и рекомендациями о необходимом количестве определений физических характеристик-входов в таблицу.

10. Протоколом рассмотрения региональных таблиц научно-техническим советом организации-составителя.

8.2. На сегодняшний день очевидно, что построение региональных таблиц возможно только с использованием ЭВМ. В ПНИИИСе разработан комплекс программ построения структурных уравнений

для ЭВМ «Наирин-2» (прил. 4), положенный в основу настоящего Руководства, который наилучшим образом (в настоящий момент) решает задачу построения таблиц<sup>1</sup>. Текст руководства позволяет не только использовать имеющуюся программу для ЭВМ «Наирин-2», но также и пересоставлять ее самостоятельно для любого вида ЭВМ.

8.3. Подробности алгоритмов математической обработки данных можно найти в пособиях по математической статистике, содержащихся в списке рекомендуемой литературы. В объединении Стройизыскания, институте Гидропроект и ряде других производственных и научно-исследовательских организаций разработаны программы построения уравнений множественной регрессии, которые могут быть с успехом применены при составлении региональных таблиц.

<sup>1</sup> В 1981 г. в ПНИИИСе завершается перевод этих программ на ЭВМ ЕС1022.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ТАБЛИЦЫ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В таблицах 1—3 приведены односторонние правые  $1-q$ -процентные пределы статистических распределений, т. е. такие пределы  $z$ , что  $P\{\xi < z\} = 1-q$ , где  $\xi$  — случайная величина.

В табл. 1 приведены пределы распределения Стьюдента с  $\mu$  степенями свободы; последняя строка содержит пределы стандартного нормального распределения  $N(0,1)$  (с нулевым средним и единичной дисперсией). Пределы нормального распределения используются в формулах пп. 5.4, 6.10 и 7.11.

В табл. 2 приведены величины  $\chi^2_n$  — пределы распределения  $\chi^2$  Пирсона в зависимости от числа степеней свободы  $\mu$ . Эти величины используются в процедуре экзамена уравнений регрессии (пп. 6.7—6.8).

Табл. 3а—в содержат пределы  $F$ -распределения Фишера — ве-

Таблица 1

Пределы распределения Стьюдента  $t_{\mu}(1-q)$   
и стандартного нормального распределения  $t(1-q)$

$\mu$	Величины $t_{\mu}$ при $1-q$					
	85%	92,5%	95%	97,5%	99%	99,5%
1	1,97	4,15	—	—	—	—
2	1,38	2,28	2,92	4,3	—	—
3	1,25	1,93	2,35	3,18	5,84	—
4	1,19	1,78	2,13	2,78	4,6	5,6
5	1,16	1,7	2,02	2,57	4,03	4,77
6	1,14	1,65	1,94	2,45	3,71	4,32
7	1,12	1,62	1,9	2,37	3,5	4,03
8	1,11	1,59	1,86	2,31	3,36	3,83
9	1,10	1,57	1,83	2,26	3,25	3,69
10	1,09	1,56	1,81	2,23	3,17	3,58
12	1,08	1,54	1,78	2,18	3,06	3,43
14	1,07	1,52	1,76	2,15	2,98	3,33
16	1,07	1,51	1,75	2,12	2,92	3,25
18	1,07	1,5	1,73	2,1	2,88	3,19
20	1,06	1,5	1,73	2,09	2,85	3,15
22	1,06	1,49	1,72	2,07	2,82	3,12
24	1,06	1,49	1,71	2,06	2,8	3,09
26	1,06	1,49	1,71	2,06	2,78	3,07
28	1,06	1,48	1,7	2,05	2,76	3,05
30	1,05	1,48	1,7	2,04	2,75	4,03

$t(1-q)$	1,04	1,44	1,65	1,96	2,58	2,81
----------	------	------	------	------	------	------

личины  $F_0(1-q, \mu, v)$  — в зависимости от числа степеней свободы  $\mu, v$ . Эти величины используются в формулах пп. 4.12—4.13 и 6.6—6.8.

Таблица 2

$\mu$	Пределы $\chi^2_{\mu}(1-q)$					
	2,5%	5%	7,5%	92,5%	95%	97,5%
3	0,216	0,352	0,468	7,03	7,81	9,35
5	0,831	1,15	1,38	10,2	11,1	12,8
7	1,69	2,17	2,5	13,1	14,1	16
9	2,7	3,33	3,75	15,8	16,9	19
11	3,82	4,57	5,07	13,5	19,7	21,9
13	5,01	5,89	6,46	21,1	22,4	24,7
15	6,26	7,26	7,9	23,7	25	27,5
18	8,23	9,39	10,14	27,5	28,9	31,5
21	10,3	11,6	12,4	31,22	32,7	35,5
24	12,4	13,8	14,7	34,8	36,4	39,4
27	14,6	16,2	17,1	38,4	40,1	43,2
30	16,8	18,5	19,5	42,1	43,8	47
35	20,6	22,5	23,6	48	49,8	53,2
40	24,4	26,5	27,8	53,8	55,8	58,3
45	28,4	30,6	32	59,6	61,7	65,4
50	32,4	34,8	46,8	65,3	67,5	71,4

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЛЕНЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ВЫБОРОК

1. При выделении инженерно-геологических элементов на участках изысканий необходимо исследовать изменчивость основных физико-механических свойств грунтов в плане и по разрезу. Цель настоящего приложения — снабдить инженера-геолога методикой статистической обработки неоднородных выборок показателей свойств грунтов на больших площадках изысканий, на которых сеть опробования достаточно развита во всех трех измерениях. Предлагаемой обработке следует подвергать выборки показателей естественной влажности и коэффициента пористости, а в необходимых случаях — показателей пластичности и гранулометрического состава (каждая выборка обрабатывается в отдельности).

2. В основе решения поставленной задачи лежит известная в математической статистике методика выделения однородных компонентов из смеси нормальных распределений. Предполагается, что каждый из исследуемых показателей  $x$  в пределах макроскопически неоднородного массива горных пород подчиняется распределению с плотностью вероятности

Критические значения  $F_0$  ( $1-q; \mu, v$ )  
 $q = 0,1$

Таблица 3а

v	Величины $F_0$ при $\mu$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	39,864	49,5	53,593	55,833	57,241	58,204	58,906	59,439	59,858
2	8,526	9	9,162	9,243	9,293	9,326	9,349	9,367	9,381
3	5,538	5,462	5,391	5,343	5,309	5,266	5,252	5,252	5,24
4	4,545	4,325	4,191	4,107	4,051	4,01	3,979	3,955	3,936
5	4,06	3,78	3,22	4,52	3,453	3,405	3,368	3,339	3,316
6	3,776	3,463	3,289	3,181	3,108	3,055	3,015	2,983	2,958
7	3,589	3,257	3,074	2,961	2,883	2,827	2,785	2,752	2,725
8	3,458	3,113	2,924	2,806	2,727	2,668	2,624	2,589	2,561
9	3,36	3,007	2,813	2,693	2,611	2,551	2,505	2,469	2,44
10	3,285	2,925	2,728	2,605	2,522	2,461	2,414	2,377	2,347
12	3,177	2,807	2,606	2,48	2,394	2,331	2,283	2,245	2,214
15	3,073	2,695	2,49	2,361	2,273	2,208	2,158	2,119	2,086
20	2,975	2,589	2,38	2,249	2,158	2,091	2,04	1,999	1,965
24	2,927	2,327	2,195	2,103	2,035	1,983	1,941	1,941	1,906
30	2,881	2,489	2,276	2,142	2,049	1,98	1,927	1,884	1,849
40	2,835	3,44	2,226	2,091	1,997	1,927	1,873	1,829	1,793
60	2,791	2,393	2,177	2,041	1,946	1,875	1,819	1,775	1,738
120	2,748	2,347	2,13	1,992	1,896	1,824	1,768	1,722	1,684
$\infty$	2,706	2,303	2,084	1,945	1,847	1,774	1,717	1,67	1,632

Продолжение табл. 3а

v	Величины $F_0$ при $\mu$									
	10	12	15	20	24	30	40	60	120	
1	60,195	60,705	61,22	61,74	62,002	62,265	62,529	62,794	63,061	63,328
2	9,392	9,408	9,425	9,441	9,45	9,458	9,466	9,475	9,483	9,491
3	5,23	5,216	5,200	5,185	5,176	5,168	5,16	5,151	5,143	5,134
4	3,92	3,896	3,869	3,844	3,831	3,817	3,804	3,79	3,775	3,761
5	3,27	3,268	4,238	3,207	3,191	3,174	3,157	3,14	3,123	3,105
6	2,937	2,905	2,871	2,836	2,818	2,8	2,781	2,762	2,742	2,722
7	2,703	2,668	2,623	2,595	2,575	2,556	2,514	2,493	2,293	2,471
8	2,538	2,502	2,464	2,425	2,404	2,383	2,361	2,339	2,316	2,293
9	2,416	2,379	2,34	2,298	2,277	2,255	2,232	2,209	1,184	2,159
10	2,322	2,284	2,244	2,201	2,178	2,155	2,132	2,107	2,082	2,055
12	2,188	2,147	2,104	2,06	2,036	2,012	1,986	1,96	1,932	1,904
15	2,059	2,017	1,972	1,924	1,899	1,873	1,845	1,817	1,787	1,755
20	1,937	1,982	1,845	1,994	1,767	1,738	1,708	1,677	1,643	1,607
24	1,878	1,832	1,783	1,73	1,702	1,672	1,641	1,607	1,572	1,533
30	1,82	1,773	1,722	1,667	1,638	1,607	1,573	1,538	1,499	1,456
40	1,763	1,715	1,662	1,605	1,574	1,541	1,506	1,467	1,425	1,377
60	1,707	1,657	1,603	1,544	1,511	1,476	1,437	1,395	1,348	1,292
120	1,652	1,601	1,545	1,482	1,447	1,409	1,368	1,32	1,265	1,193
$\infty$	1,599	1,546	1,487	1,421	1,383	1,342	1,295	1,24	1,169	1

Критические значения  $F_0$  ( $1-q; \mu, v$ )  
 $q = 0,05$

v	Величины $F_0$ при $\mu$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234	236,8	238,9	240,5
2	18,1	19	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,9	8,8	8,8
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	6,1	6	6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,0	5	4,9	4,8	4,8
6	6	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1
7	5,6	4,7	4,3	4,1	4	3,9	3,8	3,7	3,7
8	5,3	4,5	4,1	4,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2
10	5	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,1	3
12	4,7	3,9	3,5	3,3	3,1	3	2,9	2,8	2,8
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4
24	4,3	3,4	3	2,8	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2
40	4,1	3,2	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1
60	4	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2
120	3,9	3,1	2,7	2,4	2,3	2,2	2,1	2	2
$\infty$	3,8	3	2,6	2,4	2,2	2,1	2	1,9	1,9

Продолжение табл. 36

v	Величины $F_0$ при $\mu$									
	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	241,9	243,9	246	248	249	250	251,1	252,2	253,2	254,3
2	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	8,8	8,7	8,7	8,7	8,6	8,6	8,6	8,5	8,5	8,5
4	6	5,9	5,9	5,8	5,8	5,7	5,7	5,7	5,6	5,6
5	4,7	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4
6	4,1	4	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8	3,7	3,7	3,7
7	3,6	3,6	3,5	3,4	4,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,2
8	3,3	3,3	3,2	3,2	3,1	3	3	3	2,9	2,9
9	3,1	3,1	3	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7	2,7
10	3	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5
12	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,3
15	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1
20	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2	2	1,9	1,9	1,8
24	2,3	2,2	2,1	2	2	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7
30	2,2	2,1	2	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7
40	2,1	2	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5
60	2	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4
120	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
$\infty$	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3

Критические значения  $F_0$  ( $1-q; \mu, v$ )  
 $q = 0,025$ 

v	Величины $F_0$ при $\mu$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	647,8	799,5	864,2	899,6	921,8	937,1	948,2	956,7	963,3
2	38,5	39	39	39,2	39,3	39,3	39,3	39,4	39,4
3	17,4	16	16,4	15,1	14,9	14,7	14,6	14,5	14,5
4	12,2	10,6	10	9,6	9,4	9,2	9,1	9	8,9
5	10	8,4	7,8	7,1	7	6,9	6,8	6,7	6,7
6	8,8	7,3	6,6	6,2	6	5,8	5,7	5,6	5,5
7	8,1	6,5	5,9	5,5	5,3	5,1	5	4,9	4,8
8	7,6	6,1	5,4	5,1	4,8	4,7	4,5	4,4	4,4
9	7,2	5,7	5,1	4,7	4,5	4,3	4,2	4,1	4
10	6,9	5,5	4,8	4,5	4,2	4,1	4	3,9	3,8
12	6,6	5,1	4,5	4,1	3,9	3,7	3,6	3,5	3,4
15	6,2	4,8	4,2	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	3,1
20	5,9	4,5	3,9	3,5	3,3	3,1	3	2,9	2,8
24	5,7	4,3	3,7	3,4	3,2	3	2,9	2,7	2,6
30	5,6	4,2	3,6	3,2	3	2,9	2,7	2,5	2,4
40	5,4	4,1	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4
60	5,3	3,9	3,3	3	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3
120	5,2	3,8	3,2	2,9	2,7	2,5	2,4	2,3	2,2
$\infty$	5	3,7	3,1	3,8	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1

Продолжение табл. 36

v	Величины $F_0$ при $\mu$									
	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	1963,6	976,7	984,9	993,1	997,2	1001,4	1005,6	1009,8	1014,0	1018,3
2	39,4	39,4	39,4	39,4	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
3	14,4	14,3	14,3	14,2	14,1	14,1	14	14	13,9	13,9
4	8,8	8,8	8,7	8,6	8,5	8,5	8,4	8,4	8,3	8,3
5	6,6	6,5	6,4	6,3	6,2	6,2	6,1	6,1	6	6
6	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1	5,1	5	5	4,9	4,8
7	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,4	4,3	4,3	4,2	4,1
8	4,3	4,2	4,1	4	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7	3,7
9	4	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3
10	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,1
12	3,4	3,3	3,2	3	3	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7
15	3,1	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4
20	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1
24	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1
30	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2	1,9	1,9	1,8
40	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
60	2,3	2,2	2,1	2,1	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
120	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3
$\infty$	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,1

$$f(x) = \sum_{r=1}^R \frac{p_r}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} e^{-\frac{(x-a_r)^2}{2\sigma_r^2}}, \quad (1)$$

где  $R$  — число однородных компонентов в смеси,  
 $a_r$  — математическое ожидание показателя,  
 $\sigma_r^2$  — дисперсия показателя,  
 $p_r$  — вес компонента.

$$\left. \begin{array}{l} r=1, 2, \dots, R \\ \end{array} \right\}$$

При этом  $\sum_{r=1}^R p_r = 1$ .

3. Для решения задачи строится гистограмма исходной выборки: весь диапазон изменения показателя  $x$  разбивается на  $m$  равных интервалов длины  $\Delta$ , после чего значение гистограммы в пределах  $j$ -го интервала полагается равным

$$g_j = g(x_j) = n_j \quad (j = 1 \dots m), \quad (2)$$

где  $n_j$  — число значений показателя  $x$  из исходной выборки, попавших в  $j$ -й интервал;  $x_j$  — середина  $j$ -го интервала.

4. Далее строится вспомогательная функция

$$l_j = l(x_j) = \ln g(x_{j+1}) - \ln g(x_j) \quad (j = 1 \dots m-1) \quad (3)$$

(для тех  $x_j$ , для которых эта функция определена). Разыскиваются промежутки монотонного убывания функции  $l(x_j)$  (при возрастании индекса  $j$ ). Количество  $R$  однородных компонентов в смеси **равно** количеству этих промежутков убывания. Каждый из этих промежутков охватывает несколько подряд идущих интервалов  $\{x_{j_r}, x_{j_r+1}, \dots, x_{j_r+m_r}\}$ . В пределах этого диапазона убывание функции  $l(x_j)$  аппроксимируется линейной функцией

$$\hat{l}_r(x) = \hat{\alpha}_r x + \hat{\beta}_r. \quad (4)$$

5. Оценки математических ожиданий, дисперсий и весов однородных компонентов определяются по формулам:

$$\hat{a}_r = -\frac{\dot{\beta}_r}{\dot{\alpha}_r} + \frac{\Delta}{2}, \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_r^2 = -\frac{\Delta}{\dot{\alpha}_r} - \frac{\Delta^2}{12}, \quad (6)$$

$$\hat{p}_r = \frac{\sum_{r=1}^R g(\hat{a}_r) \dot{\sigma}_r^2}{\sum_{r=1}^R g(\hat{a}_r) \dot{\sigma}_r^2}. \quad (7)$$

6. Классификация индивидуальных значений  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в исходной выборке с учетом полученного количества классов  $R$  и их параметров  $\hat{a}_r$ ,  $\hat{\sigma}_r^2$ ,  $\hat{p}_r$  ( $r = 1, 2, \dots, R$ ) осуществляется из сообра-

жений минимизации риска: значение  $x_i$  относится к классу с математическим ожиданием  $\hat{a}_{r_0}$  и дисперсией  $\hat{\sigma}_{r_0}^2$ , если

$$\hat{p}_{r_0} \hat{f}_{r_0}(x_i) = \max_{1 \leq r \leq R} \{ \hat{p}_r \hat{f}_r(x_i) \}, \quad (8)$$

где  $\hat{f}_r(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_r} \exp \left\{ -\frac{(x_i - \hat{a}_r)^2}{2\hat{\sigma}_r^2} \right\}$  — плотность «чистого» нормального распределения ( $r = 1, 2, \dots, R$ ).

7. В ходе автоматизации изложенной выше методики рассчленения неоднородных выборок все моменты этой методики необходимо формализовать. В частности, программа для ЭВМ «Нанри-2», разработанная в ГИИИСе, выполняет нижеследующие специфические операции.

Предусмотрена возможность построения ряда гистограмм для разных  $m$  и  $\Delta$ , а при каждом  $m$  — также ряда гистограмм с различными положениями концов интервалов. Это позволяет пользователю выбрать для дальнейшей обработки гистограмму, которая, с его точки зрения, наилучшим образом отражает статистические свойства выборки.

Разработан ряд критериев по исключению случайных, несущественных промежутков убывания функции  $l(x_j)$ . Эти критерии в известной степени моделируют действия исследователя-статистика, выделяющего промежутки убывания на глаз.

Апроксимация промежутков убывания (см. п. 4) производится взвешенным методом наименьших квадратов с весами, пропорциональными наблюдаемым частотам величин  $x_j$ .

Предусмотрено также выделение в отдельные классы небольших групп, резко отличающихся значений и ряд других моментов. Остальные вычисления производятся в соответствии с формулами (2) — (8).

После оценки параметров  $\hat{a}_r$ ,  $\hat{\sigma}_r^2$  и  $\hat{p}_r$  производится осреднение дисперсий компонент по формуле

$$\hat{\sigma}_{\text{ср}}^2 = \sum_{r=1}^R \hat{p}_r \hat{\sigma}_r^2. \quad (9)$$

8. В результате обработки выборок по нескольким физическим показателям каждой пробе сопоставляется (наряду с действительными значениями определенных в этой пробе свойств) набор условных номеров классов, к которым отнесена данная пробы по каждому из показателей. Эти наборы образуют коды, давящие в скжатой форме характеристику свойств грунта в отобранных пробах.

9. После этого необходимо обратиться к карте расположения выработок и разрезам и объединить в инженерно-геологические элементы соседние пробы с совпадающими или близкими кодами. Эта процедура плохо поддается формализации и поэтому проводится вручную. Как правило, здесь исследователю помогают дополнительные сведения о форме залегания литологических разностей, грунтовых вод и т. п.

10. В ходе проведения границ необходимо также учитывать тот факт, что классификация по правилу (8) указывает всего лишь

на максимальное правдоподобное отнесение данного индивидуального значения  $x_i$  к тому или иному классу. В действительности нормальные компоненты в смеси (1) пересекаются, зачастую по весьма широким диапазонам значений. Поэтому для каждой пробы следует предусмотреть возможность ее переноса в один из соседних компонентов, если такой перенос будет напрашиваться из рассмотрения соседних проб. Для осуществления этих операций удобно для каждого из выделенных компонентов заранее выписать границы  $a_r \pm \sigma_r$ ,  $a_r \pm 2\sigma_r$  и  $a_r \pm 3\sigma_r$ , в пределах которых индивидуальные значения могут быть отнесены (с разной степенью достоверности) к данному компоненту, если даже правило (8) отнесло их к другому компоненту.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### ПРИМЕР СОСТАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТАБЛИЦЫ

Техническую реализацию изложенных в настоящем Руководстве процедур проиллюстрируем (в несколько сокращенном виде) на примере обработки данных инженерно-геологического опробования в районе г. Пиря. Основанием большинства сооружений здесь служит толща слабых четвертичных ленточных глин с высокой степенью неоднородности основных показателей (естественная влажность  $W = 0,2 \pm 1$ , коэффициент пористости  $e = 1,0 \div 2,5$ ). Оценивалась зависимость коэффициента относительной сжимаемости  $a$ , полученного в ходе одометрических испытаний в интервале давлений от 0 до 1 кгс/см<sup>2</sup>, от ряда показателей физических свойств. Данные обрабатывались с помощью комплекса программ для ЭВМ «Наира-2» (прил. 4). Эти данные содержали 211 определений коэффициента сжимаемости ( $m_0 = 211$ ) и 302 определения физических свойств.

При выделении инженерно-геологических элементов исследовалась неоднородность распределения основного классификационного показателя ленточных глин — естественной влажности  $W$ . С помощью методики прил. 2 исследовалась общая выборка этого показателя (302 определения). После этого на каждой площадке изысканий, представленной в экспериментальном материале, отыскивались инженерно-геологические элементы, отвечающие тем или иным из выделенных классов.

На рис. 1, а изображена гистограмма общей выборки. На рис. 1, б виден точечный график функции  $l(x_j)$  (см. п. 4, прил. 2), на котором после автоматизированного анализа были выделены три промежутка убывания  $\{x_2 \div x_7\}$ ,  $\{x_9 \div x_{10}\}$  и  $\{x_{11} \div x_{16}\}$  (нарушения убывания в точках  $x_8$  и  $x_{15}$  были признаны случайными). Кроме того, в отдельный элемент выделены два индивидуальных значения  $W > 95\%$ . Найденные промежутки убывания аппроксимированы следующими прямыми:

$$\begin{cases} l_1(x) = -0,037x + 1,611, \\ l_2(x) = -0,029x + 1,767, \\ l_3(x) = -0,089x + 6,394. \end{cases} \quad (1)$$

Расчеты параметров компонентов по формулам (5)–(7) прил. 2 дали следующие результаты, приведенные в табл. 1.

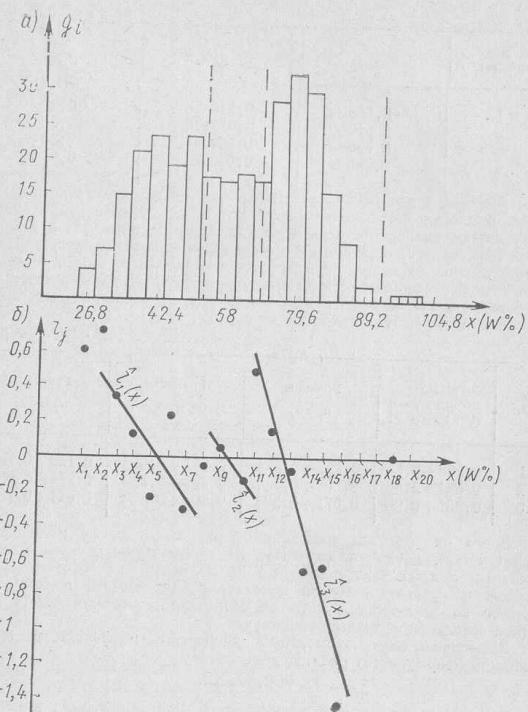


Рис. 1. Выделение однородных компонентов в неоднородной выборке показателя естественной влажности ленточных глин

Отметим, что для небольших, резко выделяющихся компонентов (например, 4-й компонент в табл. 1) параметры  $a_r$ ,  $\sigma_r^2$  и  $p_r$  оцениваются прикодочно. В табл. 2 для первых трех компонентов приведены классификационные границы по критерию (8, прил. 2), а также границы, служащие для альтернативной классификации индивидуальных значений (см. п. 10 прил. 2).

На рис. 2 изображен типичный разрез на одной из площадок изысканий, представленных в экспериментальном материале. Каждой точке опробования свойств ленточных глин поставлен в соот-

Таблица 1

$\#$ компонента $r$	$\hat{a}_r$	$\hat{\sigma}_r^2$	$\hat{p}_r$
1	0,453	0,010368	0,31
2	0,619	0,013178	0,34
3	0,736	0,004244	0,34
4	0,989	0,00038	0,01

ветствие код, отражающий результаты исследования статистической неоднородности показателя  $W$ : указан номер компонента, к которому данное значение отнесено по критерию (8, прил. 2), а за ним в скобках на трех позициях — номера других компонентов, для которых данное значение попадает соответственно в одно-, двух- и трехсигмовые границы (см. табл. 2). В результате рассмотрения этих кодов в толще ленточных глин на данной площадке выделяются три инженерно-геологических элемента.

Таблица 2

$\#$ п/п	Границы по критерию [(8) прил. 2]	Границы $\hat{a}_r \pm \hat{\sigma}_r$	Границы $\hat{a}_r \pm 2\hat{\sigma}_r$	Границы $\hat{a}_r \pm 3\hat{\sigma}_r$
1	$0,250 \div 0,53$	$0,352 \div 0,554$	$0,251 \div 0,655$	$0,150 \div 0,756$
2	$0,531 \div 0,66$	$0,504 \div 0,734$	$0,389 \div 0,849$	$0,274 \div 0,964$
3	$0,661 \div 0,90$	$0,671 \div 0,801$	$0,606 \div 0,866$	$0,541 \div 0,931$

Всего на участках изысканий было выделено 34 инженерно-геологических элемента ( $m=34$ ). В соответствии с этим массив исходных данных был разбит на 34 элемента, по которым были вычислены средние значения показателей (приведены в табл. 3). Данные по элементам с 1-го по 25-й составили обучающую выборку, остальные — экзаменационную.

Вычисление внутриэлементной дисперсии коэффициента сжимаемости [формула (3) разд. 2] дало оценку

$$s_{\text{вн}}^2 = 0,006742. \quad (2)$$

В качестве аргументов регрессионных уравнений были выбраны показатели коэффициента пористости  $e$  и двух пределов пластичности  $W_P$  и  $W_L$ . Парные графики зависимости между обобщенными значениями этих показателей изображены на рис. 3 и 4.

В ходе автоматической обработки были получены несколько линейных уравнений между обобщенными значениями показателей для прогноза коэффициента сжимаемости, а также характеристики остаточного разброса нормативных значений  $a$  [формулы (33) разд. 4 и (42) разд. 5]. Рассмотрим несколько уравнений с минимальными характеристиками разброса:

$$a = -0,0057I_p + 0,1495e + 0,0685 \quad (3)$$

$$s_1^2 = 0,001555,$$

$$\hat{\sigma}_{\text{он}}^2 = 0,000566;$$

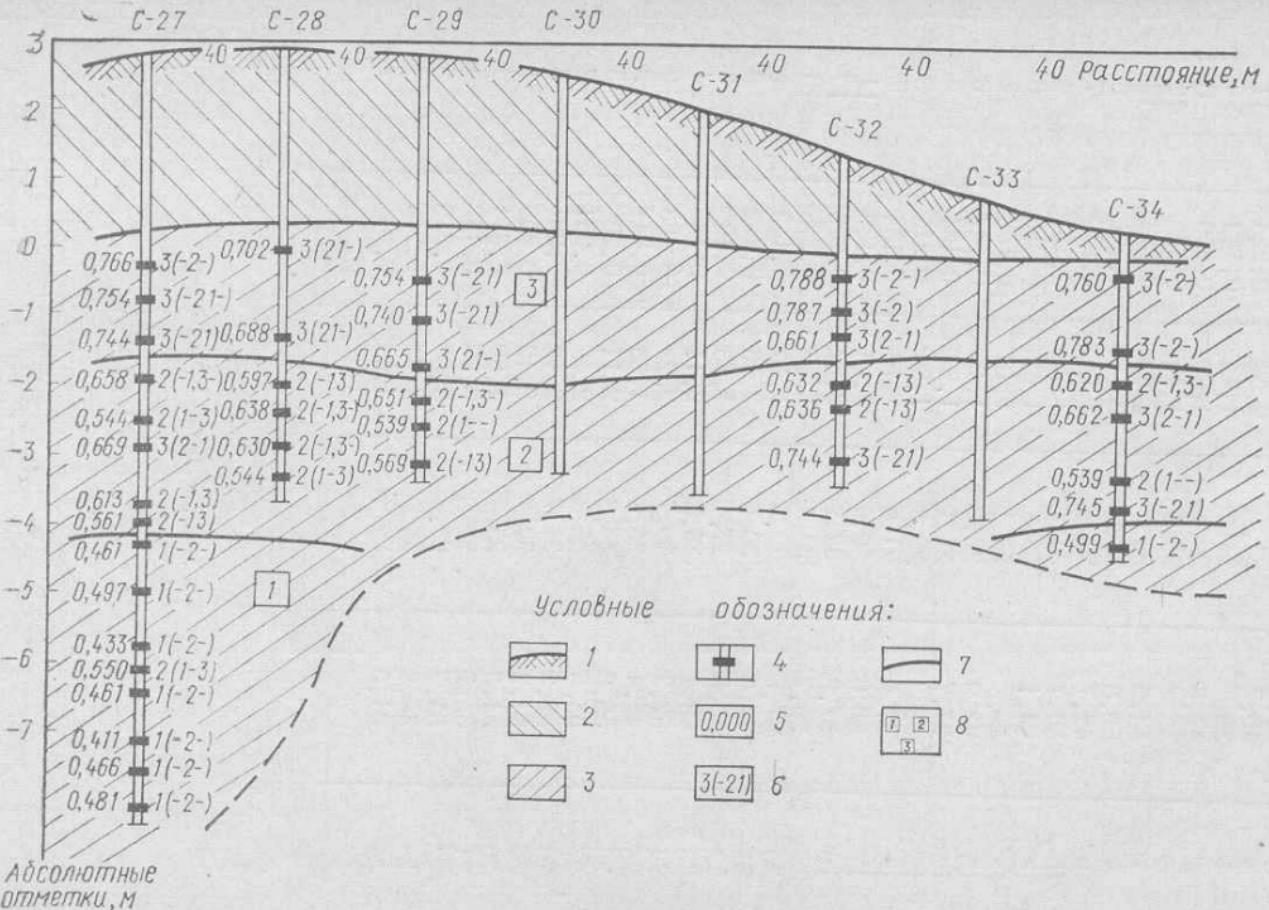


Рис. 2. Расчленение толщи ленточных глин на одной из площадок по условным обозначениям:

1 — почвенный слой;  
2 — покровные отложения  $Q_{1V}$ ; 3 — ленточные глины  $l-g$   $Q_{111-1V}$ ; 4 — технические выработки и точки отбора проб;  
5 — индивидуальные значения показателя естественной влажности;  
6 — коды, содержащие результаты статистического расчленения;  
7 — границы выделенных инженерно-геологических элементов;  
8 — условные номера выделенных элементов

Таблица 3

№ элемента	$W_L$	$W_P$	$e$	$a$	Число определений $a$
1	48	27,1	1,91	0,308	2
2	39,6	24,4	1,32	0,18	13
3	59,2	35,1	2,09	0,226	11
4	39	24,4	1,44	0,142	6
5	47,8	29,4	1,86	0,299	6
6	43	25,5	1,41	0,232	12
7	54,5	33,5	2,02	0,278	13
8	55,3	32,6	2	0,191	3
9	42,7	27	1,5	0,166	7
10	56,1	34,7	1,93	0,321	4
11	44,1	26,8	1,62	0,216	8
12	38	26,1	1,18	0,152	6
13	43,9	26,9	1,45	0,167	6
14	37,7	25,1	1,27	0,154	3
15	53	29,2	1,69	0,215	9
16	37,9	21,6	1,18	0,154	7
17	30,6	19,9	0,86	0,136	11
18	57,8	32,2	2,22	0,229	10
19	56,7	34,4	2,16	0,275	13
20	37,9	22,5	1,19	0,143	8
21	57,9	30,5	2,06	0,232	8
22	48,8	27,7	1,73	0,19	3
23	63,1	36,8	2,11	0,18	4
24	57,2	30,7	2,2	0,183	6
25	48,4	25,8	1,95	0,247	2
26	58,8	36,3	2,11	0,26	3
27	65,5	35,8	2,4	0,261	2
28	59,2	31,7	2,18	0,23	3
29	61,2	32,7	2,12	0,305	1
30	51,3	25,8	1,99	0,314	4
31	35,5	20,9	0,93	0,153	4
32	55,7	27,4	2,09	0,315	2
33	48,8	28	1,44	0,218	4
34	51,6	29,4	1,81	0,31	7

$$a = 0,0882e + 0,0614 \quad (4)$$

$$s^2_1 = 0,001657,$$

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = 0,000647;$$

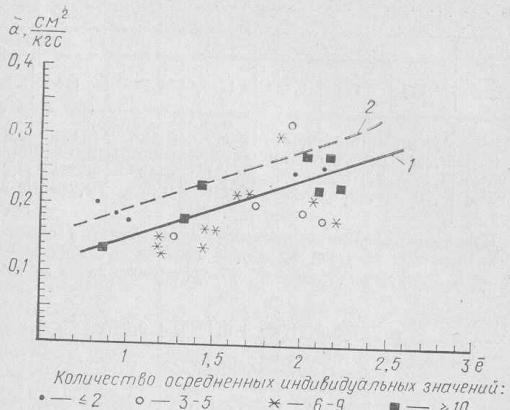


Рис. 3. Зависимость между показателями коэффициента сжимаемости ленточных глин  
1 — прямая регрессии для прогноза нормативных показателей; 2 — верхний толерантный предел для прогноза 85-процентных расчетных показателей

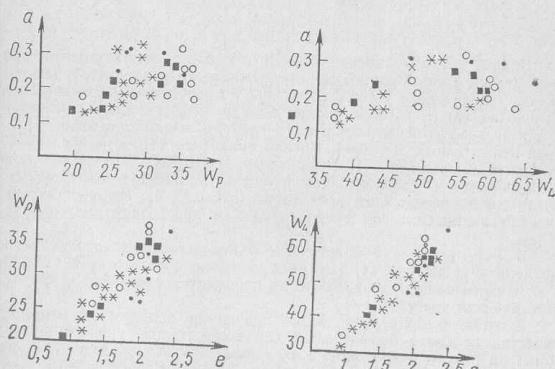


Рис. 4. Парные зависимости между показателями свойств ленточных глин (обозначения см. на рис. 3).

Таблица 4

$\alpha$	Коэффициент						
	0,875	1	1,125	1,25	1,375	1,5	1,625
$a^H$	0,138	0,15	0,161	0,172	0,183	0,194	0,205
$\Delta$	0,02654	0,02653	0,02653	0,02653	0,02653	0,02652	0,02652
$a^P(85\%)$	0,165	0,176	0,187	0,198	0,209	0,22	0,231
$a^P(95\%)$	0,18	0,191	0,203	0,214	0,225	0,236	0,247

Примечания: 1. При промежуточных значениях  $e$  прогнозные 2. Расчетные значения на других уровнях надежности определяются из табл. 4, а коэффициент  $t_\alpha$  — из табл. 1

$$a = -0,00217WL + 0,1345e + 0,0873 \quad (5)$$

$$s_1^2 = 0,001662,$$

$$\hat{s}_1^2 = 0,000673;$$

$$a = 0,0034WP + 0,0523e + 0,0257 \quad (6)$$

$$s_1^2 = 0,001792,$$

$$\hat{s}_1^2 = 0,000803.$$

Видно, что в уравнениях (3) и (5) знаки коэффициентов при показателях  $L_P$  и  $W_L$  противоречат ожидаемому характеру зависимости (увеличению сжимаемости при возрастании пластичности). Уравнение (6), в котором входят два аргумента предел раскрытия и коэффициент пористости, — дает больший остаточный разброс нормативных значений, нежели уравнение (4) от одного коэффициента пористости. Происходит это потому, что показатели пластичности, и особенно предел текучести, очень тесно скоррелированы с коэффициентом пористости (см. рис. 3), который в свою очередь наиболее тесно скоррелирован с прогнозируемым показателем  $a$ .

В силу этого для практического использования следует рекомендовать уравнение (4). Этому уравнению соответствует табл. 4.

В чисто иллюстративных целях приводится также табл. 5, соответствующая уравнению (6).

В табл. 6 приведена также процедура обобщенной проверки качества прогноза нормативных характеристик по уравнениям (4) и (6) на основе экзаменационных данных (см. п. 10 разд. 6). Здесь указаны истинные  $a_i$  и прогнозные  $a_i^P$  значения коэффициента сжимаемости, а также величины

пористости $e$							
1,75	1,875	2	2,125	2,25	2,375	2,5	
0,216	0,227	0,238	0,249	0,260	0,271	0,282	
0,02652	0,02652	0,02653	0,02653	0,02653	0,02653	0,02654	
0,242	0,253	0,264	0,275	0,286	0,297	0,308	
0,258	0,269	0,28	0,291	0,302	0,313	0,324	

характеристики следует определять путем линейной интерполяции. определяются по формуле  $a^P(1-\alpha) = a^H + t_\alpha \Delta$ , прил. 1 (нижняя строка).

Таблица 5

Граница раскрытия	Прогно-зируемый показатель	Коэффициент сжимаемости $a$ при коэффициенте пористости $e$						
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
$W_P \leq 0,22$	$a^H$	0,152	0,165	0,178	0,191	0,204	0,217	—
	$a^P(85\%)$	0,181	0,195	0,208	0,221	0,235	0,249	—
	$a^P(95\%)$	0,199	0,212	0,225	0,239	0,258	0,267	—
$0,22 < W_P \leq 0,26$	$a^H$	0,165	0,178	0,191	0,205	0,218	0,231	0,244
	$a^P(85\%)$	0,195	0,208	0,221	0,234	0,248	0,261	0,275
	$a^P(95\%)$	0,213	0,225	0,238	0,251	0,265	0,279	0,293
$0,26 < W_P \leq 0,3$	$a^H$	0,179	0,192	0,205	0,218	0,231	0,244	0,257
	$a^P(85\%)$	0,209	0,222	0,234	0,247	0,261	0,274	0,288
	$a^P(95\%)$	0,227	0,239	0,251	0,266	0,278	0,291	0,304
$0,3 < W_P \leq 0,34$	$a^H$	0,192	0,206	0,218	0,231	0,244	0,257	0,27
	$a^P(85\%)$	—	0,23	0,248	0,261	0,274	0,287	0,301
	$a^P(95\%)$	—	0,254	0,266	0,278	0,291	0,304	0,317
$0,34 < W_P \leq 0,38$	$a^H$	—	0,219	0,232	0,245	0,258	0,271	0,284
	$a^P(85\%)$	—	—	0,263	0,276	0,288	0,301	0,314
	$a^P(95\%)$	—	—	0,282	0,294	0,306	0,318	0,33

$$\Delta_j = |\bar{Y}_j - Y_j^{(B)}| = |\hat{Y}_j - Y_j^{(H)}| \quad (7)$$

(см. формулы (56) и (57) разд. 6). Для уравнения (4) величины  $\Delta_j$  сосчитаны при  $\alpha=15\%$  ( $t_\alpha=1,04$ ), для уравнения (6) — при

Таблица 6

$m_j$	$a_{ii}$	Уравнение (4)				Уравнение (6)			
		$a_{ii}$	$ a_{ii} - a_{ii} $	$\Delta_j$	$v_j$	$a_{ii}$	$ a_{ii} - a_{ii} $	$\Delta_j$	$v_j$
3	0,26	0,247	0,013	0,056	1	0,271	0,011	0,06	1
2	0,261	0,273	0,012	0,067	1	0,284	0,023	0,071	1
3	0,233	0,255	0,025	0,056	1	0,257	0,027	0,06	1
1	0,305	0,249	0,056	0,09	1	0,257	0,048	0,093	1
4	0,314	0,238	0,05	0,05	0	0,218	0,096	0,054	0
4	0,153	0,143	0,01	0,05	1	0,0152	0,009	0,054	1
2	0,315	0,245	0,07	0,067	0	0,244	0,086	0,071	0
4	0,218	0,189	0,028	0,05	1	0,205	0,013	0,054	1
7	0,31	0,231	0,079	0,042	0	0,231	0,079	0,047	0

$$\sum_{j=1}^{m'} v_j = 6$$

$$\sum_{j=1}^{m'} v_j = 6$$

$a \approx 16,5\%$  ( $t_a = 1$ ). После этого для определения величин  $v_j$  необходимо сравнить  $\Delta_j$  с модулем разности  $|a_{ii} - a_{ii}|$ . Для уравнения (4) величина  $v$  [из формулы (58) разд. 6] равна

$$v = |6 - 6,3| / \sqrt{2 \cdot 9 \cdot 0,15 \cdot 0,7} \approx 0,3; 1,37 \approx 0,22;$$

для уравнения (6) эта величина равна

$$v = |6 - 6,23| / \sqrt{2 \cdot 9 \cdot 0,165 \cdot 0,67} \approx 0,23; 1,41 \approx 0,16.$$

Оба этих значения не противоречат неравенству (59) [с учетом того, что  $t = 1,96$ ].

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### ПРОГРАММЫ ПОСТРОЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МЕЖДУ ОБОБЩЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭВМ «НАИРИ-2» \*

Методы построения уравнений зависимости между обобщенными характеристиками грунтов, описанные в основных главах Руководства, реализованы в наборе программ в кодах ЭВМ «Наири-2». Небольшой объем оперативной памяти ЭВМ этого типа обуславливает необходимость последовательного подключения в работу отдельных программ, постепенно преобразующих исходную информацию.

а) Последовательность работы с программами.

К работе с программами следует приступать после проведения

\* В силу технических трудностей в описаниях и текстах программ почти все латинские буквы, используемые при вводе и выводе информации на ЭВМ, заменены на соответствующие русские:  $g$  на «д»,  $t$  на «т»,  $n$  на «и» и т. д.

предварительной обработки материала обучения и экзамена, включающей в себя выделение инженерно-геологических элементов (разд. 2, прил. 2). В дальнейшем программы подключаются в обработку в следующем порядке.

1. Программа «Формирование структурного массива» (ФСМ) обеспечивает построение матрицы обобщенных значений показателей Х (п. 4.8) на основе исходной матрицы индивидуальных значений и результатов расчленения. Вычисляются также внутренняя дисперсия фактора-функции  $s_{\text{ин}}^2$  [формула (3) разд. 2], а также другие параметры структурного массива.

2. Программа «Построение уравнений» (ПУ) осуществляет построение линейного уравнения зависимости фактора-функции от всех рассматриваемых аргументов [формула (10) разд. 4], вычисление характеристик остаточного разброса  $s_1^2$  (33) и  $s_0^2$  (41), а также последовательное построение уравнений с меньшим числом аргументов, обладающих минимальными характеристиками (33) и (41). Программа позволяет также осуществлять эту операцию с любым наперед заданным набором аргументов (выявление оптимального в каком-либо смысле набора аргументов программой не предусмотрено).

Работа программы в режиме «Построение фиксированного уравнения» (ПФУ) обеспечивает построение одного уравнения зависимости (от всех рассматриваемых аргументов), а также вычисление всех величин, необходимых для экзамена этого уравнения и прогноза по нему.

3. Программа «Экзамен — прогноз» (ЭП) может работать в двух режимах. Работа в режиме «Экзамен» позволяет получить данные, необходимые для проверки критериев, изложенных в разд. 6. Работа в режиме «Прогноз» позволяет получить прогнозные величины нормативных и расчетных значений функции (43) при заданных наборах аргументов.

Для работы с программами необходим стандартный комплект «Наири-2», включающий в себя механизмы ввода-вывода «Consul», FCM-1501 и ПЛ-80.

б) Описание программы «ФСМ».

Исходными данными для этой программы являются:

1. Массив параллельных определений показателей, вводящийся как матрица А размера  $m \times N$  по строкам с ячейки 300п. Каждая строка отвечает исследованию одной пробы, каждый столбец — одному из показателей; первые  $(N-1)$  столбцов отводятся для факторов-аргументов,  $N$ -й столбец — для фактора-функции (в основном тексте Руководства обозначен через Y). Если в некоторых пробах некоторые показатели не определены, на соответствующие места массива вводится число 0. (Если какой-либо из показателей, например консистенция, может принимать значения 0, следует вместо этих значений вводить малые числа, отличные от нуля).

2. Массив номеров инженерно-геологических элементов, к которым относятся пробы (т. е. строки матрицы А). Этот массив составляется по результатам расчленения и вводится как вектор  $t$  целых чисел длины  $m$  с ячейки 1750т. Если в этом массиве встречаются числа 0, то соответствующие строки в дальнейшей обработке не участвуют (т. е. соответствующие строки считаются отброшенными).

3. Параметры, вводящиеся как целые числа;

36т -  $k$  (количество элементов),  
 37т -  $m$  (общее число строк),  
 38т -  $N$  (общее число столбцов).

Программа занимает ячейки оперативной памяти 50÷289. Ее пусковой адрес 50Н. Рабочие ячейки 10÷15, 25÷35.

Программа выполняет следующие операции.

1. Перестановка строк матрицы А по порядку номеров, содержащихся в массиве  $r[j]$ . Отбракованные строки относятся в конец массива А. Подсчитывается действительное число  $m'$  строк (кроме отбракованных) и действительное число  $k'$  элементов, т. е. количество различных ненулевых номеров в массиве  $r[j]$ .

2. Вычисление средних значений показателей.

$$\bar{X}_{ij} = \frac{1}{m_{ij}} \sum_{l=1}^{m_{ij}} X_{il} \quad (i = 1 \div N, j = 1 \div k'),$$

где  $m_{ij}$  - число определений  $i$ -го показателя в пределах  $j$ -го элемента. Эти значения формируются в виде матрицы X размера  $k' \times N$ . Если в каком-либо элементе отсутствуют определения хотя бы одного показателя ( $m_{ij}=0$ ), то весь элемент исключается из обработки.

3. Величины  $m_j = m_{nj}$  ( $j = 1, 2, \dots, k'$ ) - число определений фактора-функции по элементам - формируются в виде одномерного массива длины  $k''$ , где  $k''$  - число оставленных элементов. Этот массив помещается сразу после матрицы X.

4. Вычисляется внутриэлементная дисперсия фактора-функции.

$$s_{\text{вн}}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{k''} m_j - k''} \sum_{j=1}^{k''} \sum_{l=1}^{m_j} (X_{nl} - \bar{X}_{nj})^2.$$

Результаты работы программы остаются в следующих ячейках оперативной памяти:

750÷... - структурный массив (матрица X по строкам),  
 $750 + k''N \div \dots$  - массив  $m [j]$ ;

12п - дисперсия  $s_{\text{вн}}^2$ ;

31п - число  $\mu = \sum m_j - k$  (число степеней свободы  $s_{\text{вн}}^2$ ;

33т - число  $\leq m_n \geq = -750 + k''N - 1$  («нулевой» адрес массива  $m [j]$ );

35п -  $k = k''$  в форме с плавающей запятой;

36т -  $k = k''$  в целой форме;

37п -  $m_0 = \sum m_j$  - общее число определений фактора-функции;

38т -  $N$  - общее число показателей.

Программа выпечатывает две строки результатов. Стока вида

$k = \dots \quad t = \dots$

содержит величины  $k'$  и  $m'$  (см. выше). Стока вида

$k = \dots \quad \text{дvn} = \dots, \quad \text{qc} = \dots$

содержит величины  $k''$ ,  $s_{\text{вн}}^2$  и  $\mu$ .

Размеры обрабатываемых массивов должны удовлетворять условиям:

$$N < 10, \quad m < 200, \quad mN + k < 1450, \quad k''(N+1) < 970, \quad k'' < 100.$$

Методы обработки массивов больших размеров описаны далее.  
 в) Текст программы ФСМ.

50 п38н33	87 с162н99	124 в2248н
51 ут37н33	88 п35н	125 о2250н
52 с299к33	89 б11к1	126 пт36н
53 с136н	90 п1750н27+	127 п33н
54 в1750к	91 п28н	128 б11к
55 е12п<	92 б11к	129 с1287н145
56 к63к	93 л135н1	130 п0к37
57 п27н+	94 п1750н1750+	131 п33н
58 п33н1	95 а11к1	132 с12н
59 с1к1	96 п27н1750+	133 б11к1
60 п1к29	97 п1к1	134 с0837+
61 п0к+	98 б11к1	135 в1к12
62 с1к1	99 п671н27+	136 е16378н
63 с1к29	100 п1н	137 п37н33
64 в136н	101 а11к	138 ут38н33
65 е16379н<	102 л11к1	139 с299к3
66 п299к34	103 п671н671+	140 с145н145
67 п0к12	104 а11к1	141 п1к29
68 п1к29	105 п27н671+	142 п29н
69 п0к35	106 с1к1	143 б11к
70 п35н28	107 в138н	144 л129н1
71 п0к15	108 е16373н<	145 п683н677+
72 п28н	109 п33н1	146 с1к29
73 б11к1	110 с12н1	147 в136н
74 п1750н+	111 с1к1	148 е16377н<
75 в129н	112 с1к+	149 о2270н
76 е138н≠	113 с1к35	150 о2230н
77 п1к15	114 с38н34	151 о2250н
78 п38н27	115 с1к28	152 пт37н
79 ут28н27	116 в137н	153 п0к12
80 с299к27	117 е16338н<	154 п0к31
81 с157н105	118 с1н12≠15	155 п0к32
82 б11к27	119 с1к29	156 п300к34
83 с134н	120 в136н	157 п299к35
84 с1287н103	121 е16332н<	158 п1к29
85 п34н	122 п12н36	159 п29н
86 б11к	123 о2274н	160 с133н

161	$b_{11k}$	205	$c_{1k28}$	249	$c_{32h}254$
162	$p027+$	206	$b_{127h}$	250	$p1k29$
163	$p0k25$	207	$e_116372n <$	251	$p29h1$
164	$p0k11$	208	$c_{1k32}$	252	$b_{11k}$
165	$p0k14$	209	$e_116361p$	253	$t_{1h1}$
166	$p1k28$	210	$p32h$	254	$p677h323+$
167	$p25h26$	211	$c_{133h1}$	255	$c1k29$
168	$p26h$	212	$p14h+$	256	$b_{136h}$
169	$c_{134h}$	213	$y_{t38h27}$	257	$e_116377p \leq$
170	$b_{11k1}$	214	$c27h34$	258	$p30h$
171	$p0h15+$	215	$c1k29$	259	$b_{11k}$
172	$c11h11 \neq 15$	216	$b_{136h}$	260	$t_{130h1}$
173	$y_{1p15}$	217	$e_116325p \leq$	261	$p299h749+$
174	$c1n14=15$	218	$p32h36$	262	$v2049k1$
175	$c38h26$	219	$o2274h$	263	$e_116381p >$
176	$c1k28$	220	$o2248h$	264	$p38h33$
177	$b_{127h}$	221	$o2250h$	265	$y_{t36h33}$
178	$e_116373p \leq$	222	$p36h$	266	$c749k33$
179	$e_{33p}=14$	223	$n36h35$	267	$k1k$
180	$n14h26$	224	$c_{14k}$	268	$i267p$
181	$c_{134k}$	225	$t_{135h35}$	269	$x0h$
182	$t_{126h26}$	226	$p31h37$	270	$x0h$
183	$o26h11$	227	$o35h31$	271	$\gg$
184	$c1k25$	228	$n_{3236p}$	272	$\gg$
185	$b_{138h13}$	229	$o31h12$	273	$\gg$
186	$e_15p >$	230	$o2270h$	274	$\gg$
187	$p35h$	231	$o2215h$	275	$\gg$
188	$c_{25h1}$	232	$o2213h$	276	$\gg$
189	$p11h+$	233	$o2219h$	277	$\gg$
190	$e_97n13 > 13$	234	$o2250h$	278	$\gg$
191	$e_{16356p} < 13$	235	$p12h8$	279	$\gg$
192	$c126h31$	236	$o2270h$	280	$\gg$
193	$p1k28$	237	$o2224h$	281	$\gg$
194	$p38h$	238	$o2212h$	282	$\gg$
195	$b_{1k26}$	239	$o2250h$	283	$\gg$
196	$n26h$	240	$p12h1$	284	$\gg$
197	$c_{134h}$	241	$n_{269p}$	285	$\gg$
198	$b_{11k1}$	242	$p33h$	286	$\gg$
199	$p0h15+$	243	$b_{11k}$	287	$p0h+$
200	$u_{p15}$	244	$c_{1287h254}$	288	$c38h35$
201	$v11h10 \neq 15$	245	$y_{t38h32}$	289	$e_116304p$
202	$u_{p10h0} \neq 15$	246	$p32h$		
203	$c10h12 \neq 15$	247	$c_{136h30}$		
204	$c38h26$	248	$c299k32$		

г) Описание программы ПУ.

Исходными данными для этой программы являются массивы  $X$  и  $m[]$ , а также параметры  $s^2_{\text{вн}}$ ,  $\mu$ ,  $\langle m_n \rangle$ ,  $k$ ,  $t_0$  и  $N$  в тех же ячейках, в которых они находятся после работы программы ФСМ (см. «б»).

Программа занимает ячейки оперативной памяти 100–448 и 1720–1745. Ее пусковой адрес в общем режиме 100н. Рабочие ячейки 10, 11, 13÷15, 22÷30, 32, 34, 730÷749, 1850÷1949. Программа выполняет следующие операции.

1. Вычисление общих средневзвешенных значений показателей

$$X_l = \frac{1}{\sum m_j} \sum_{j=1}^k m_j \bar{X}_{ij} \text{ и коэффициентов системы нормальных уравнений } K, \vec{b} \text{ (формулы (28), (29)).}$$

2. Построение линейного уравнения зависимости фактора-функции от всех аргументов с вычислением характеристик  $s^2_1$  и  $\vec{b}_1$  (с помощью обращения к СПП решения системы уравнений).

3. Последовательное выбрасывание каждого из имеющихся аргументов и построение уравнений зависимости от оставшихся аргументов.

4. Сравнение характеристик  $s^2_1$  для новых уравнений, оставление уравнения с минимальной характеристикой  $s^2_1$ . Работа с этим уравнением повторяется начиная с п. 2. Работа программы продолжается до построения уравнений парной зависимости.

После однократного выполнения операций п. 1 (команды 100÷176) пользователь имеет возможность осуществить операции пп. 2–4 над уравнением с наперед заданным набором аргументов (из числа имеющихся). Для этого необходимо ввести следующую дополнительную информацию:

27т –  $n'$  – число аргументов, включаемых в уравнение;  
29т – целое число, двоичная запись которого содержит единицы в разрядах с теми номерами, которые совпадают с порядковыми номерами включаемых в уравнение аргументов, и нули в остальных разрядах.

После этого пусковой адрес программы 183н.  
При нажатой клавише «Ключ» программа работает в режиме ПФУ (пусковой адрес 100н). При этом однократно выполняются операции пп. 1–4, обеспечивающие построение уравнения зависимости от всех аргументов, входящих в матрицу  $X$ , а также определение всех параметров, необходимых для экзамена этого уравнения и построения доверительных границ.

Результаты работы программы ПФУ остаются в следующих ячейках оперативной памяти:

11п —  $\sigma^2_{\text{он}}$  ;

13п —  $s^2_1$ ;

28т –  $n = N - 1$  (число аргументов уравнения);

740 ÷ ... —  $\bar{X}_l$  (средневзвешенные значения показателей),  
 $i = 1, 2, \dots, N$ ;

1799 –  $L = \| K \|$  ;

1800  $\div \dots$  — массив  $[(K^{(j)})]$  (алгебраические дополнения элементов матрицы  $K$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, n$ );  
 1850  $\div \dots$  — коэффициенты уравнения  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  
 1860  $-a_0$  — свободный член уравнения.

Исходная информация программой не портится.

Программа выпечатывает последовательно строящиеся уравнения в виде:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_0.$$

Уравнение, обладающее при каждом прохождении и. 4 минимальной характеристикой  $s_1^2$ , выпечатывается повторно. Каждому уравнению сопутствуют две строки вида  $d_n = \dots$  од.  $= \dots$

Они содержат соответственно параметры  $s_1^2$  и  $\sigma_{\text{он}}^2$ .

При отжатой клавише «Вариант» выпечатываются, кроме того, решения системы уравнений  $\tilde{K}a = \tilde{b}$ , а в режиме ПФУ — определитель матрицы  $K$ .

При работе в режиме ПФУ накладывается дополнительное условие  $n \leq 5$  (т. е.  $N \leq 6$ ).

д) Текст программы ПУ—ПФУ.

100 п10к1	125 од37н739+	150 п25н
101 п0к739+	126 в1к1	151 б11к1
102 в1к1	127 е116381п>	152 вп739н28+
103 е116381п>	128 х0н	153 уп28н27
104 п1к29	129 п90к1	154 п24н
105 п2048к28	130 п0к1749+	155 п749н28+
106 п1к25	131 в1к1	156 п23н
107 п29н1	132 е116281п>	157 б11к1
108 с33н1	133 п1к25	158 вп739н28+
109 б11к1	134 п1к23	159 уп28н27
110 н0н27+	135 п25н	160 и349п
111 с34к	136 б11к26	161 в1к1
112 л127н27	137 п23н	162 ут38н1
113 п28н1	138 б11к24	163 с23н1
114 уп749н27+	139 п38н	164 сн27н1749+
115 н25н1	140 б11к22	165 с22н26
116 сн27н739+	141 п1к29	166 с22н24
117 с2048к28	142 п29н1	167 clk29
118 clk25	143 с33н1	168 в136н
119 в138н	144 б11к1	169 е116355п<
120 е116370п<	145 н0н27+	170 clk23
121 clk29	146 с134к	171 в138н
122 в136н	147 л127н27	172 е116346п<
123 е116366п<	148 п26н1	173 clk25
124 п10к1	149 п749н28+	174 в138н

175 е116342п<	219 п29н	263 у6749н1850+
176 х0н	220 а161н	264 сс23н23
177 п38н	221 е1к4	265 clk22
178 в1к28	222 clk61	266 е16370п
179 п28н27	223 в128н	267 сн1860н23
180 п1к	224 е116п>	268 н1323н61
181 б128н	225 е116377п	269 611к1
182 в1к29	226 п60н	270 вп749н23+
183 п0к14	227 б11к1	271 уп23н23
184 п1850к34	228 п1849н34+	272 сс13н13
185 п0к24	229 п61н	273 clk26
186 п29н	230 б11к1	274 в136н
187 а124н	231 х0н	275 е16355п<
188 е1к1	232 о2263н	276 и380п
189 е16б	233 п34н5	277 о2274н
190 п0к25	234 о2264н	278 о2215н
191 п29н	235 о2220н	279 о2219н
192 а125н	236 о2202н+	280 о2250н
193 е1к1	237 о2258н	281 п13н8
194 е17п	238 уп740н34+	282 п12а11
195 е122п	239 сс1860н1860	283 уп35н11
196 ут24н1	240 е186п	284 од37н11
197 с25н1	241 е1113п	285 вп13н11
198 б11к1	242 х0н	286 х0н
199 л134н1	243 о2263н	287 о2274н
200 п1750н+	244 п1860н5	288 о2226н
201 clk34	245 п0к13	289 о2215н
202 clk25	246 п0к26	290 о2250н
203 в128н10	247 п0к23	291 п11н8
204 е116370п<	248 п0к22	292 п340н
205 е116373п=10	249 п1к24	293 е138п=14
206 clk24	250 п1к25	294 в1к27
207 в128н	251 п29н	295 в1к
208 е116361п<	252 е325н5	296 е139п<
209 е1133п	253 б1к25	297 п1к30
210 п1850к32	254 clk24	298 п29н
211 п0п15	255 в128н	299 е330н28
212 и16490к34-	256 е10п>	300 61к30
213 е145п	257 е116377п	301 а128н
214 о2214н	258 н1323н61	302 е16379н=
215 о2250н	259 х0н	303 п0к22
216 п0к1860	260 х0н	304 п730н23
217 п1к60	261 611к1	305 п27н24
218 п0к61	262 л122н1	306 п24н

307 $\sigma_{11k1}$	351 $yt^{38}n^{60}$	395 $p_0k^{1954}$	439 $od^{37}n^{1799}$	1721 $p_1k^{1957}$	1733 $c_1k^{1950}n$
308 $b^{6730}n^{23}-$	352 $c^{23}n^{60}$	396 $p^{38}n^{1955}$	440 $p^{37}n^{53}$	1722 $p^{1957}n^{1960}$	1734 $\sigma_1k^{11}$
309 $e_2n^{>}$	353 $p^{60}n^{1}$	397 $u_1^{1720}n^{31}$	441 $p^{35}n^{54}$	1723 $v_1k^{1954}n$	1735 $l_1k^{1951}$
310 $n^{730}n^{23}+$	354 $i^{164}p$	398 $p^{25}k^{1}$	442 $p^{36}n^{55}$	1724 $e_1l^{17}p=$	1736 $c_1k^{1956}n^{1}$
311 $p^{24}n^{22}$	355 $p^{38}n$	399 $od^{37}n^{1824}+$	443 $p^{28}n^{56}$	1725 $v_1k^{1960}$	1737 $p^{0}n+-$
312 $b^{1k24}$	356 $\sigma_{11k1}$	400 $p_1k^{60}$	444 $k^{1k}$	1726 $ut^{1953}n^{1960}$	1738 $c_1k^{1956}$
313 $e_1^{16376}p>$	357 $vn^{739}n^{1860}+$	401 $\sigma_{11k1}60$	445 $a^{11k1}$	1727 $p_1k^{1958}$	1739 $c_1k^{1958}$
314 $p^{0}k^{60}$	358 $n^{242}p$	402 $l_1n^{1}$	446 $b^{1k1}$	1728 $p^{1958}n^{1959}$	1740 $v_1k^{1953}$
315 $c^{53}k^{30}$	359 $p^{60}n^{14}$	403 $p^{1824}n^{1749}+$	447 $v^{399}p^{>}$	1729 $v_1k^{1955}n$	1741 $e_1^{16370}p<$
316 $e_1^{52}p$	360 $x^{0}n$	404 $e_140p$	448 $i^{406}p$	1730 $e_18p=$	1742 $c_1k^{1957}$
317 $e_1^{16249}p$	361 $o^{2274}n$	405 $e_1^{16377}p>$	449 $\dots \dots \dots$	1731 $v_1k^{1959}$	1743 $v_1k^{1952}n$
318 $p^{38}n^{60}$	362 $n^{214}p$	406 $p^{1825}k^{1985}$	1720 $p^{0}k^{1956}$	1732 $c_1^{1960}n$	1744 $e_1^{16361}p<$
319 $yt^{24}n^{60}$	363 $p^{0}k^{231}$	407 $p^{28}n^{1986}$			1745 $v^{31}n$
320 $c^{25}h^{60}$	364 $p^{0}k^{242}$	408 $u_1^{6147}n^{31}$			
321 $p^{60}h^{1}$	365 $p^{0}k^{386}$	409 $p^{1971}n^{1799}$			
322 $v^{198}p$	366 $p^{0}k^{286}$	410 $b^{1k}1953$			
323 $p^{38}n^{60}$	367 $p^{0}k^{360}$	411 $p_1k^{24}$			
324 $yt^{26}h^{60}$	368 $n^{100}p$	412 $p_1k^{25}$			
325 $c^{24}h^{60}$	369 $p^{29}n$	413 $c_1k^{1949}$			
326 $p^{60}h^{1}$	370 $e_3^{30}n^{2}$	414 $p^{24}n^{1954}$			
327 $v_1^{61}p$	371 $b^{1k}30$	415 $p^{25}n^{1955}$			
328 $p^{29}h^{50}$	372 $e_1^{16380}p$	416 $u_1^{1720}n^{31}$			
329 $v_1^{30}h^{29}$	373 $p^{22}n$	417 $p^{28}n$			
330 $c_1k^{14}$	374 $v_1^{60}h$	418 $v_1k^{1986}$			
331 $e_1^{16236}p$	375 $e_2n^{>}$	419 $e_3^{1k}3$			
332 $p^{14}h^{1}$	376 $c_1k^{60}$	420 $p^{1825}k^{1985}$			
333 $p^{13}n^{729}+$	377 $e_1^{16377}p$	421 $u_1^{6147}n^{31}$			
334 $p^{50}h^{29}$	378 $v^{30}n^{29}$	422 $p^{1971}n^{1825}$			
335 $e_1^{16348}p$	379 $v^{183}p$	423 $p^{1949}h^{1}$			
336 $k^{8}k^{8}$	380 $p^{27}h^{60}$	424 $p^{24}n^{1}$			
337 $c_1k^{60}$	381 $c_1^{34}k$	425 $c_1^{25}h$			
338 $e_1^{16267}p$	382 $l_1^{60}h^{60}$	426 $e_3^{1k}2$			
339 $p^{60}h^{1}$	383 $p^{31}k^{60}$	427 $p^{1825}h^{1799}+$			
340 $u_3^{388}p$	384 $vn^{35}h^{60}$	428 $e_1^{1p}$			
341 $i^{293}n^{>11}$	385 $od^{60}h^{13}$	429 $op^{1825}h^{1799}+$			
342 $k^{56}k^{1}$	386 $x^{0}h$	430 $x^{0}h$			
343 $p^{14}n^{60}$	387 $i^{277}p$	431 $c_1k^{25}$			
344 $p^{27}n^{1971}$	388 $o^{2274}h$	432 $p_1^{28}h$			
345 $e_1^{1k}1$	389 $p^{0}k^{1949}$	433 $e_1^{16363}p$			
346 $i^{210}p$	390 $p^{1750}k^{1950}$	434 $c_1k^{24}$			
347 $d^{1851}n^{1850}$	391 $p^{1825}k^{1951}$	435 $v_1^{28}h$			
348 $e_1^{10}p$	392 $p^{28}h^{1952}$	436 $e_1^{16359}p$			
349 $p^{25}h^{60}$	393 $e_3^{1k}44$	437 $e_1^{2}p$			
350 $v_1k^{60}$	394 $p^{38}n^{1953}$	438 $p^{1750}h^{1799}$			

е) Описание программы ЭП.

Программа занимает ячейки оперативной памяти с 100 по 263. Рабочие ячейки 10, 14, 15, 27+29, 60+68. Работа программы регулируется параметром  $z$ , который заносится как целое число в ячейку 15. При  $z=0$  программа работает в режиме «Прогноз», при  $z \neq 0$  — в режиме «Экзамен». При  $z=0$  должна быть нажата клавиша «Ключ».

При  $z \neq 0$  исходными данными являются:

1. Результаты работы программы ПФУ (см. выше п. «г») в тех же ячейках оперативной памяти.

2. Экзаменационный массив обобщенных значений показателей  $X'$ ,  $m'[j]$  и его параметры, полученные в результате обработки экзаменационной выборки по программе ФСМ (см. п. «б», ячейки памяти те же).

3. Некоторые параметры обучения, заносящиеся в новые ячейки памяти:

$$52p - s_{bh}^2,$$

$$51p - \mu - \text{число степеней свободы дисперсии } s_{bh}^2;$$

53p —  $m$  — число определений фактора-функции в форме с плавающей запятой;

$$56t - n - \text{число аргументов уравнения.}$$

4. В ячейке 50p — предел нормального распределения  $t_{\alpha}$ , использующийся при расчете экзаменуемой доверительной границы (43).

Программа вычисляет и печатывает следующие величины. 1. Величины, необходимые для проверки критерия п. 6:

$g_1 = \dots$ ,  $g_2 = \dots$ ,  $\text{чсс} = \dots$ ,  $\text{чсс} = \dots$  (соответственно  $s_{bh}^2/s_{bh}^2$ ,  $s_{bh}^2/s_{bh}^2$ ,  $m-k$  и  $v=m'-k'$ ). Пусковой адрес 100п. После этих расчетов происходит останов «К1».

2. При отжатой клавише «Ключ» — величины, необходимые для проверки критерия п. 6, 7, в виде:

$$p = \dots$$

$$x^2 = \dots$$

$$\left( \pi = \sum_{j=1}^{k'} \xi_j / \sqrt{k'}; x^2 = \sum_{j=1}^{k'} \xi_j^2, \right. \text{ см. формулы (51), (52).}$$

Пусковой адрес 120п. После этого происходит останов «К2».

3. При нажатой клавише «Ключ» — величина  $n = \sum_{j=1}^{k''} y_j$  необходимая для проверки критерия п. 6.10. Пусковой адрес 120и. После этого происходит останов «к3».

При  $z=0$  (и нажатой клавише «Ключ») исходными данными являются:

1. Результат работы программы ПФУ (см. п. «г») в тех же ячейках памяти.

2. В ячейке 50п — предел нормального распределения  $t_a$  для построения доверительной границы (43).

3. Массив наборов аргументов, для которых необходимо вычислить прогнозные значения функций. Вводится в виде матрицы размера  $k'' \times n$  по строкам с ячейки 750п;  $k''$  — число задаваемых наборов;  $n$  — число аргументов уравнения.

4. Параметры массива:

36т —  $k''$ ;

38т —  $N = n + 1$ ;

56т —  $n$ .

Программа вычисляет прогнозное значение  $\hat{Y}$  [по формуле (10)] и два гарантированных значения  $Y^*$  [по формуле (43)] соответственно со знаками «—» и «+» и выпечатывает их строками вида

$y = \dots y_1 = \dots y_2 = \dots$

(число и порядок строк соответствуют числу  $k''$  и порядку заданных наборов аргументов). Пусковой адрес 120и. После расчетов происходит останов «к4».

Размеры массива наборов аргументов должны удовлетворять условию  $k''n \leq 1100$ .

ж) Текст программы ЭП.

100 п12и60	116 пп51и1	132 сс60и60
101 д52и60	117 о2270и	133 с1к28
102 п0к1	118 пп31и1	134 в5и6и
103 о2274и	119 к1к	135 е116375п<
104 о2223и	120 п0к68	136 п750и+
105 о2202и+	121 п0к66	137 вс60и62
106 о2250и	122 п0к67	138 п33и1
107 пп60и4	123 п0к29	139 е112и
108 о2270и	124 п0к61	140 б11к1
109 е13п≠1	125 п1860и60	141 и0и65+
110 п2048к1	126 п1к28	142 с134к
111 дп1и60	127 п28и	143 л65и65
112 е116375п	128 б11к1	144 дп52и65
113 о2224и	129 п1849и62+	145 и317и1
114 о2212и	130 с61и1	146 сп11и65
115 о2250и	131 уп749и62+	147 кп65и6

148 од65и62	185 вп749и62+	228 п61и1
149 сп62и66	186 е168и	229 и3264и
150 уп62и62	187 п740и63+	230 п64и
151 сп62и67	188 с61и1	231 вс751и+
152 е192и	189 вп750и63+	232 е116303п<
153 б11к14	190 уп63и62	233 п63и
154 с14и61	191 е156и	234 вс751и+
155 с1к29	192 с28и14	235 е116300п>
156 в36и	193 б11к1	236 с1к68
157 е116351п<	194 уп1799и62+	237 е116298и
158 и3238и	195 сп62и64	238 е11п≠15
159 кп35и62	196 в1к27	239 к4и
160 од62и66	197 е116367п>	240 о2274и
161 о2274и	198 в1к28	241 о2219и
162 о2249и	199 е116363п>	242 о2250и
163 о2250и	200 е6и	243 пт68и
164 пп66и4	201 п740и64	244 к3и
165 о2270и	202 п61и1	245 п38и14
166 о2220и	203 вп750и64+	246 п56и14=15
167 о2188и	204 од1799и64	247 е116289и
168 о2250и	205 х0и	248 п27и14
169 пп67и4	206 х0и	249 х0и
170 к2к	207 од1799и64	250 ут56и14
171 е14п≠15	208 сп1к64	251 е116324и
172 о2274и	209 х0и	252 с29и1
173 о2214и	210 од53и64	253 с1к1
174 о2250и	211 сс1к64	254 е116269и
175 пп60и4	212 е145и	255 п27и
176 п0к64	213 кп4и64	256 б11к1
177 п56и28	214 уп50и64	257 е116313и
178 е1к26	215 п60и	258 п11и67
179 п56и	216 вс64и63	259 е12и=15
180 в1к27	217 сп60и64	260 п65и
181 п28и	218 е19п≠15	261 сс11и67
182 б11к1	219 п0к1	262 уп67и64
183 п739и62+	220 о2270и	263 е116333и
184 с61и1	221 о2214и	264 п38и
	222 о2202и+	265 б11к
	223 о2250и	266 с1и1
	224 пп63и4+	267 и3230и
	225 е116310и≠1	
	226 п2048и	
	227 е116376и	

### 3) О вспомогательных программах.

Опыт показывает, что для успешного решения задачи необходимо использовать ряд вспомогательных программ преобразования массивов, составить которые весьма несложно. В частности, полезными бывают следующие программы.

1 Программа вычисления рассчитываемых физических показателей ( $y_8$ ,  $e$ ,  $G$  и т. п.) по непосредственно определяемым (по стандартным формулам). Если вычисление производить по строкам исходной матрицы, а вычисляемые показатели ставить на место каких-либо старых (ненужных), то большого массива рабочих ячеек не требуется. Использование этой программы позволяет сократить набивку исходной информации (набиваются только непосредственно определяемые показатели).

2 Программа удаления столбца (или нескольких столбцов) из матрицы. Использование этой программы позволяет исходить из единого массива многомерных наблюдений, оставляя для конкретных расчетов по программам ФСМ, ПУ и др. произвольные аргументы и функции в соответствии с изложенными инструкциями.

3. Программы преобразования факторов (столбцов исходной матрицы) — логарифмирование, потенцирование и т. п.

#### и) Методы обработки больших массивов.

При построении уравнений между обобщенными значениями показателей исходная информация существенно уменьшается в объеме при переходе от программы ФСМ к программе ПУ. Если размеры исходной матрицы не удовлетворяют условиям п. б, ее можно разбить на несколько «сегментов информации», каждый из которых объединяет несколько инженерно-геологических элементов. После пропуска всех сегментов через программу ФСМ необходимо провести работу по сборке структурного массива и его параметров с учетом результатов по всем сегментам. В частности, дисперсию  $s_{\text{вн}}^2$  следует рассчитать по формуле

$$s_{\text{вн}}^2 = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^J \mu_j s_{\text{вн},j}^2,$$

где  $s_{\text{вн},j}^2$  — внутриэлементная дисперсия в пределах  $j$ -го сегмента,

$\mu_j = m_j - k_j$  и  $\mu = \sum_{j=1}^J (m_j - k_j)$  — соответственно число степеней свободы для дисперсий  $s_{\text{вн},j}^2$  и  $s_{\text{вн}}^2$ ,  $J$  — число сегментов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Айазян С. А. Статистическое исследование зависимостей. М., Металлургия, 1968.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М., Статистика, 1973.
3. Комаров И. С., Хайме Н. М., Бабенышев А. П. Многомерный статистический анализ в инженерной геологии. М., Недра, 1976.
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., Наука, 1969.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Общие положения	5
2. Предварительная геолого-статистическая обработка экспериментальных данных	5
3. Предварительное исследование информативности косвенных признаков (показателей физических свойств пород)	7
4. Выбор и построение прогнозирующих уравнений	8
5. Построение толерантного предела для прогноза расчетных характеристик грунтов	11
6. Исследование устойчивости найденных зависимостей и определение области их применимости	17
7. Построение таблиц	18
8. Рекомендации по оформлению результатов исследований и использованию алгоритмов и программ	22
Приложение 1. Таблицы статистических распределений	24
Приложение 2. Рекомендуемая методика расчленения неоднородных выработок	26
Приложение 3. Пример составления региональной таблицы	27
Приложение 4. Программы построения уравнений между обобщенными значениями показателей для ЭВМ «Наури-2»	34
Рекомендуемая литература	42
	54