

УДК 681.142

О СПОСОБЕ РЕАЛИЗАЦИИ ВЕТВЯЩИХСЯ ПРОГРАММ
ПРИ РАБОТЕ ОДНОРОДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
В СИНХРОННО-ПРОГРАММНОМ РЕЖИМЕ

Ю.К. Дмитриев

Описывается эвристический алгоритм функционирования однородных вычислительных систем (ОВС), обеспечивающий выполнение ветвящихся программ произвольного вида в синхронно-программном режиме. Алгоритм может быть положен в основу разработки аппаратно-программных средств ОВС.

1. Постановка задачи и определения. Синхронно-программным называется такой режим (С-режим) работы ОВС [1], в котором специально выделенные элементарные машины (С-ЭМ) выполняют над своими операндами одну и ту же программу, которая выдается покомандно одной из С-ЭМ. С-ЭМ, которая хранит, выдает и исполняет программу, называется ведущей машиной (В-ЭМ), а С-ЭМ, которые только исполняют эту программу, называются ведомыми (В-ЭМ).

Основные достоинства и недостатки С-режима описаны в [2]. В данной работе рассматривается вопрос об организации работы ОВС при выполнении в С-режиме программ, содержащих команды ветвления. Логическая структура программы представляется в виде операторной схемы Янова [3]. Исследуются только операторные схемы, не содержащие пустых периодов и операторов без входных стрелок, что является естественным для реальных программ. Используется понятие маршрута в операторной схеме, которое эквивалентно понятию конфигурация работы [3]. В выполнении операторной схемы определяется как движение от её

входной вершины к выходной по одному из возможных маршрутов. Считается, что операторная схема выполнена, когда достигнута ее конечная вершина. Маршрут полностью определяется набором значений логических переменных, по которым вычисляются значения логических условий, для распознавателей, входящих в операторную схему. Значения логических переменных задаются в исходных данных или (и) вычисляются при выполнении операторной схемы.

Приведенное выше для одиночной машины определение выполнения операторной схемы может быть распространено на случай коллективной работы ℓ машин ОВС. Операторная схема выполнена, если конечная вершина достигнута в каждой из ℓ С-ЭМ.

Наборы значений переменных, определяющих маршруты в операторной схеме, для разных ЭМ могут быть различны. Для простоты рассмотрения ниже предполагается, что в В-ЭМ "отслеживание" несовпадающих частей маршрутов ведомых машин не совмещено во времени. (Ясно, что это не нарушает общности исследования.)

Последовательный характер выдачи маршрутов операторной схемы из В-ЭМ определяет необходимость введения для каждой С-ЭМ двух состояний:

- 1) выполнение операторной схемы разрешено (выдается маршрут данной ЭМ) и
- 2) выполнение операторной схемы запрещено (выдается маршрут другой ЭМ).

Этими состояниями все С-ЭМ разделяются на два множества: $\mathcal{M}_0$, включающее С-ЭМ, работа которых разрешена, и $\mathcal{M}_1$, содержащее С-ЭМ, работа которых блокируется. ЭМ в процессе выполнения операторной схемы могут многократно переходить из $\mathcal{M}_0$ в $\mathcal{M}_1$ и (или) обратно в соответствии с чередованием выдачи из В-ЭМ частей различных маршрутов. Назовем интервалом блокировки работы машины время непрерывного пребывания ее в $\mathcal{M}_1$.

Время выполнения операторной схемы в С-режиме находится в прямой зависимости от общего числа распознавателей, для которых $\mathcal{M}_1 \neq \emptyset$. Здесь мы не останавливаемся на определении величины потерь времени, вызываемых последовательным характером выдачи маршрутов из В-ЭМ. Отметим только, что общее число распознавателей в операторной схеме не определяет фактически го числа распознавателей, для которых $\mathcal{M}_1 \neq \emptyset$. Например, рас-

смотрение задач линейной алгебры показало, что для большинства распознавателей $\mathcal{M}_1 = \emptyset$ (см. таблицу).

Т а б л и ц а

Тип задачи	Общее число распознавателей	Число распознавателей, для которых возможно $\mathcal{M}_1 \neq \emptyset$
Обращение матриц методом пополнения	53	17
Вычисление коэффициентов характеристического полинома методом Данилевского	78	29
Решение систем линейных уравнений методом последовательных приближений	10	2

Нашей задачей является решение вопросов организации работы ЭМ ОВС в С-режиме при выполнении программы, предназначенной для одиночной электронной вычислительной машины и не требующей взаимодействий с другими ЭМ ОВС.

Целесообразность такой постановки определяется возможностью предоставить ОВС в распоряжение такого пользователя одиночной машины, которому необходимо решать задачу, связанную со счетом по одной и той же программе для различных вариантов исходных данных.

2. С о с т о я н и е п р о б л е м ы. При реализации С-режима в управляющей линейной ОВС Института математики СО АН СССР [4] выделение интервала блокировки работы осуществляется выполнением трудоемких процедур перенастройки, задаваемых из ведущей ЭМ. Время перенастройки зависит от числа участвующих в С-режиме машин и от их взаимного расположения в системе. Организация С-режима требует также выполнения стандартных программ анализа вхождения в $\mathcal{M}_0$ или в $\mathcal{M}_1$ в каждой С-машине и последовательной передачи результатов анализа в В-ЭМ через каналы обмена. Трудоемкость организации С-режима для системы оценивается временем выполнения программы из $(10 - 20) \times \ell_0$ команд, где ℓ_0 - число ЭМ, входящих в $\mathcal{M}_0$.

Процедура, описанная в [5], позволяет в С-режиме организовывать выполнение операторных схем, содержащих простые кратные циклы в каноническом представлении [6]. В соответствии с [6] простым называется цикл, не содержащий других распознавателей, кроме организующих данный цикл. При каноническом представлении кратных циклов распознаватель, организующий цикл, замкнет его, а каждый внутренний цикл входит в охватывающий внешний, по крайней мере, организующим его распознавателем.

3. Алгоритм управления С-режима. Описываемый ниже эвристический алгоритм работает над операторной схемой произвольного вида. Он обеспечивает выполнение операторной схемы без какого-либо согласования маршрутов отдельных ЭМ. Алгоритм осуществляет автоматическое переключение ЭМ из M_0 в M_i и обратно, а также определяет порядок чередования частей маршрутов операторной схемы из набора маршрутов, заданного конкретными значениями логических переменных в С-ЭМ. Алгоритм строится для нумерованной операторной схемы, т.е. такой, вершинам которой произвольно приписаны попарно различные числа натурального ряда. Вопрос о выборе очередности частей маршрутов С-ЭМ решается в процессе выполнения операторной схемы. Направление движения по операторной схеме определяется в момент выполнения очередного распознавателя (как функции от сопоставленного ему логического условия). Предлагаемые правила предпочтения направлений движения по операторной схеме определились соображениями простоты и удобства для схемной реализации. Машины, работающие в С-режиме, произвольно пронумерованы числами натурального ряда от 1 до ℓ .

Процесс выполнения операторной схемы в С-режиме в приводимом ниже алгоритме имитируется составлением так называемой маршрутной матрицы. Матрица содержит ℓ столбцов, причем j -й столбец соответствует ЭМ с номером j , $1, \ell$. Размерность маршрутной матрицы по вертикали определяется характером выполнения операторной схемы и специально не оговаривается (считается, что маршрутная матрица имеет счетное множество строк). В последовательные строки каждого столбца маршрутной матрицы выписывается содержимое вершин операторной схемы, входящих в маршрут соответствующей ЭМ. Началу маршрута соответствует верхняя стро-

ка столбца маршрутной матрицы. Кроме содержимого вершины операторной схемы, в строку могут быть вписаны значения логических переменных ω, k, B , смысл которых поясняется ниже, а также номер N одной из вершин нумерованной операторной схемы. Все элементы i -го столбца имеют соответствующий индекс. В начальный момент времени маршрутная матрица имеет нулевые значения во всех позициях. В дальнейшем маршрутная матрица заполняется в порядке выполнения операторной схемы.

Алгоритм выполняется для каждой вершины операторной схемы, начиная с вершины, отмеченной входной стрелкой. Рассматриваемая вершина отмечается звездой (*). Пусть первые $(j-1)$ строк маршрутной матрицы заполнены. j -я строка маршрутной матрицы заполняется в процессе рассмотрения вершины операторной схемы, отмеченной звездой. Рассмотрение * -отмеченной вершины осуществляется ℓ раз. Заметим, что в алгоритме между ЭМ (или, точнее, между значениями N в последней заполненной $(j-1)$ -й строке) предполагается существование отношения порядка. Природа и характер его в данном случае не существенны.

1. Присвоить i значение 1 (т.е. $i := 1$).
2. Если для i -го элемента $(j-1)$ -й строки маршрутной матрицы имеет место $B_i \vee k_i = 1$ - перейти к 4.
3. Содержимое отмеченной вершины записать в j -ю строку i -го столбца маршрутной матрицы. Перейти к 5.
4. Переписать содержимое элементов B, k и N из $(j-1)$ -й строки i -го столбца маршрутной матрицы в j -ю строку этого столбца.
5. Если отмеченная вершина не операторная - перейти к II.
6. Отмеченная * вершина операторной схемы - операторная. Если $i = \ell$ - перейти к 8.
7. $i := i + 1$ и перейти к 2.
8. Отметить знаком Δ вершину, инцидентную выходной дуге вершины, отмеченной *.
9. Стереть отметку *.
10. Заменить отметку Δ на *. Перейти к I.
- II. Отмеченная * вершина операторной схемы - логическая или выходная. Если отмеченная вершина не является распознавателем - перейти к 24.

12. Если для j -й строки маршрутной матрицы имеет место $B_i \vee k_i = 1$ - перейти к 16.

13. Вычислить значения логического условия α_i , сопоставленного рассмотренному распознавателю.

14. $\omega_i := \alpha_i$, записать значение ω_i в j -ю строку i -го столбца маршрутной матрицы.

15. Если $i = \ell$ - перейти к 17, иначе перейти к 7.

16. $\omega_i := 1$, записать ω_i в j -ю строку i -го столбца маршрутной матрицы. Перейти к 15.

17. Если для значений $\omega_i, i = \overline{1, \ell}$, j -й строки маршрутной матрицы выполняется $\bigwedge \omega_i = 1$ - отметить знаком Δ вершину операторной схемы, инцидентную выходной дуге отмеченного * распознавателя в направлении $\alpha_i = 1$. Перейти к 9.

18. $i := 1$

19. Если для j -й строки маршрутной матрицы выполняется $B_i \vee k_i = 1$ - перейти к 21.

20. Если для j -й строки маршрутной матрицы выполняется $\omega_i = 1$ - записать в j -ю строку i -го столбца маршрутной матрицы значение $B_i = 1$ и номер вершины операторной схемы, инцидентной выходной дуге отмеченной * вершины в направлении $\alpha_i = 1$.

21. Если $i = \ell$ - перейти к 23.

22. $i := i + 1$. Перейти к 19.

23. Отметить знаком Δ вершину операторной схемы, инцидентную выходной дуге отмеченной * вершины в направлении $\alpha_i = 0$. Перейти к 9.

24. Рассматривается выходная вершина операторной схемы. Если для j -й строки маршрутной матрицы выполняется условие $B_i = 1$, то перейти к 26.

25. $k_i := 1$, и записать k_i в j -ю строку маршрутной матрицы.

26. Значение k_i из j -й строки маршрутной матрицы присвоить переменной ω_i и записать ω_i в j -ю строку маршрутной матрицы.

27. Если $i \neq \ell$ перейти к 7.

28. Если для значений $\omega_i, i = \overline{1, \ell}$, j -й строки маршрутной матрицы выполняется $\bigwedge \omega_i = 1$, процесс заканчивается. Операторная схема выполнена.

29. Найти старшую из машин со значением $k_i = 0$ в j -й строке.

30. $i := 1$.

31. Если для j -й строки маршрутной матрицы имеет место $B_i = 0$ - перейти к 33.

32. Если номер N в j -ой строке старшей ЭМ равен номеру в j -ой строке i -го столбца маршрутной матрицы, то $B_i := 0$ и записать B_i в j -ю строку i -го столбца маршрутной матрицы.

33. Если $i \neq \ell$, перейти к 35.

34. Отметить знаком Δ вершину с номером, содержащимся в j -ой строке старшей ЭМ. Перейти к 9.

35. $i := i + 1$. Перейти к 31.

Нумерованной операторной схеме, показанной на рис. I, а, соответствует маршрутная матрица (рис. I, в). Операторная схема выполняется в С-режиме для $\ell = 4$. Путь обхода вершин операторной схемы показан на рис. I, б.

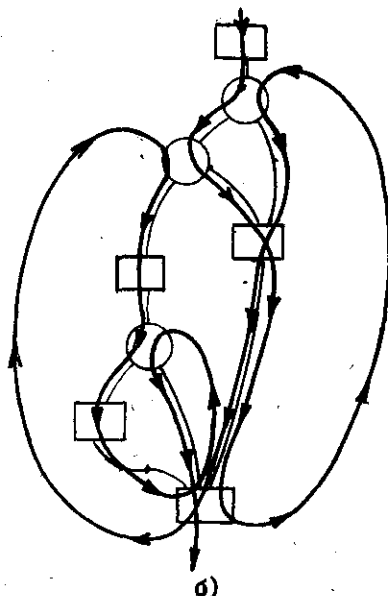
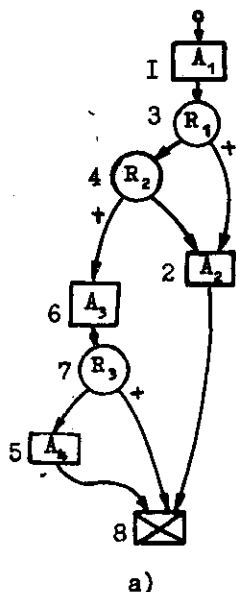
Интервал блокировки работы в маршрутной матрице для каждой ЭМ соответствует последовательности строк одного столбца, отмеченных значениями $B_i = 1$ или $k_i = 1$.

Недостатком приведенного выше алгоритма является то, что мощность множества M_0 в процессе каждого очередного прохода по операторной схеме от входной вершины до выходной вершины не возрастает. Это можно видеть на примере выполнения операторной схемы, показанной на рис. I. Так, оператор A_2 при первом проходе по операторной схеме выполняется лишь машинами из M_0 , которое определяется результатом выполнения R_2 (см. строку 4 таблицы на рис. I, в), а выходная вершина выполняется при втором проходе операторной схемы только машинами, выполняющими A_4 (см. строку 10 таблицы на рис. I, в). Указанное обстоятельство снижает эффективность работы ЭМ в С-режиме.

Для устранения описанного недостатка все вершины операторной схемы, имеющие более одной входной дуги, отмечаются знаком $\oplus$, и в алгоритм вводятся изменения и дополнения (приводимые ниже), которые несколько усложняют реализующий его автомат. Последнее обстоятельство определило целесообразность выделения следующих ниже дополнений алгоритма.

6. Отмеченная знаком * вершина операторной схемы - операторная. Если данная вершина не отмечена знаком $\oplus$ - перейти к 36, иначе перейти к 37.

12. Если для j -ой строки маршрутной матрицы имеет место $k_i = 1$ - перейти к 16, иначе перейти к 39.



A_1	A_2	A_3	A_4	
$R_1, w=1$ $B=1 \rightarrow N=2$	$R_1, w=0$	$R_1, w=0$	$R_1, w=0$	$k_1=0$
$B=1; N=2$	$R_2, w=0$	$R_2, w=1$ $B=1 \rightarrow N=6$	$R_2, w=0$ $B=1 \rightarrow N=6$	$k_1=0$
$B=1; N=2$	A_2	$B=1; N=6$	$B=1; N=6$	
$B=1; N=2; k=0$	Z	$k=1$ $B=1; N=6; k=0$	$B=1; N=6; k=0$	$k_1=0$
A_2		$k=1$ $B=1; N=6$	$B=1; N=6$	$N=2$
Z	$k=1$	$k=1$ $B=1; N=6; k=0$	$B=1; N=6; k=0$	$k_1=0$
	$k=1$	A_3	A_3	$N=6$
	$k=1$	$R_3, w=1$ $B=1 \rightarrow N=8$	$R_3, w=0$ $B=0$	$k_1=0$
	$k=1$	$B=1; N=8; k=0$	Z	$k=1$
	$k=1$	Z	$k=1$	$k_1=1$

в)

Рис. 1

IIО

24. Рассматривается выходная вершина. Если для j -й строки маршрутной матрицы выполняется $B_i = 1$ - перейти к 43.

36. Если $i = \ell$ - перейти к 8, иначе перейти к 7.

37. Вершина отмечена знаком $\oplus$. Если для j -й строки маршрутной матрицы $B_i = 0$ - перейти к 36.

38. Если для j -й строки маршрутной матрицы N_i равен номеру рассматриваемой вершины, то в j -ю строку маршрутной матрицы записать содержимое данной вершины и $B_i := 0$, $N_i := 0$. Перейти к 36.

39. Если данная вершина отмечена знаком $\oplus$ - перейти к 41.

40. Если для j -й строки маршрутной матрицы имеет место $B_i = 1$ - перейти к 16; иначе перейти к 13.

41. Если для j -й строки маршрутной матрицы имеет место $B_i = 0$ - перейти к 13.

42. $B_i = 1$. Если в j -й строке маршрутной матрицы содержимое N_i равно номеру вершины операторной схемы, инцидентной выходной дуге распознавателя в направлении $\alpha_i = 0$, - записать в j -ю строку маршрутной матрицы $B_i = 0$, $N_i = 0$, $w_i = 0$ и перейти к 15; иначе перейти к 16.

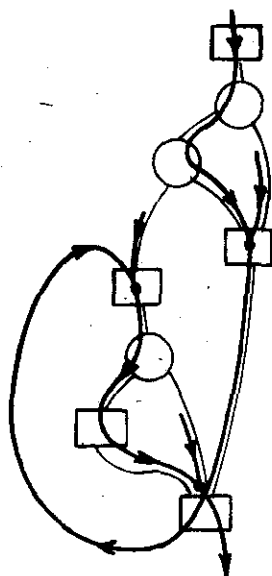
43. Если рассматриваемая вершина не отмечена знаком $\oplus$ - перейти к 26.

44. Если содержимое N_i j -й строки маршрутной матрицы равно номеру рассматриваемой вершины - записать в j -ю строку маршрутной матрицы $B_i = 0$, $N_i = 0$ и $k_i = 1$. Перейти к 26.

Для дополненного алгоритма порядок обхода и маршрутная матрица для операторной схемы, показанной на рис. 1, приведены на рис. 2.

4. Дополнительные проблемы. Пусть в С-режиме выполняется р-программа, составленная для автономного режима (программа и данные находятся в памяти каждой ЭМ). Проблема, возникающая для нее, связана с возможностью системных взаимодействий между ЭМ (например, обменов данными). Взаимодействующие ЭМ могут либо все находиться в $\mathcal{M}_0$, либо часть из них может находиться в $\mathcal{M}_1$, а часть - в $\mathcal{M}_2$. В последнем случае возможность взаимодействия определяется его характером и зависит от выбранных способов его реализации. В общем случае можно считать, что взаимодействие с ЭМ из $\mathcal{M}_1$ невозможно.

III



а)

A_1	A_1	A_1	A_1
$R_1, \omega=1$ $B=1 \rightarrow N=2$	$R_1, \omega=0$	$R_1, \omega=0$	$R_1, \omega=0$
$(N=N_{\text{верш}})$ $B=1; N=2$	$R_2, \omega=0$	$R_2, \omega=1$ $B=1 \rightarrow N=6$	$R_2, \omega=1$ $B=1 \rightarrow N=6$
A_2	A_2	$B=1; N=6$	$B=1; N=6$
Z $k=1$	Z $k=1$	$B=1; N=6; k=0$	$B=1; N=6; k=0$
$k=1$	$k=1$	A_3	A_3
$k=1$	$k=1$	$R_3, \omega=1$ $B=1 \rightarrow N=8$	$R_3, \omega=0$
$k=1$	$k=1$	Z $(N=N_{\text{верш}})$ $B=1; N=8; k=1$	Z $k=1$

б)

Рис. 2.

II2

Заметим, что обеспечить одновременное вхождение всех С-ЭМ в $\mathcal{M}_0$ при выполнении операторов взаимодействия можно, используя легко реализуемую в составе операционной системы процедуру преобразования операторной схемы. В этом случае программа (операторная схема) расчленяется по операторам взаимодействия на фрагменты, каждый из которых оформляется как отдельная операторная схема (имеющая начальную и конечную вершины). Составляются программы сцепления операторных схем, то есть программы, определяющие порядок выполнения выделенных операторных схем. Указанная проблема "синхронизации" взаимодействующих ЭМ поддается также простой аппаратной реализации.

Нами рассмотрена задача выполнения в С-режиме программы (операторной схемы), составленной для выполнения на одной ЭВМ. Если программа составляется для С-режима, то эффективность её выполнения в ряде случаев может быть повышена. Это достигается заданием маршрута обхода операторной схемы. Для этого необходимо уметь управлять механизмом выбора направления движения по операторной схеме для распознавателей. До сих пор мы предпола-

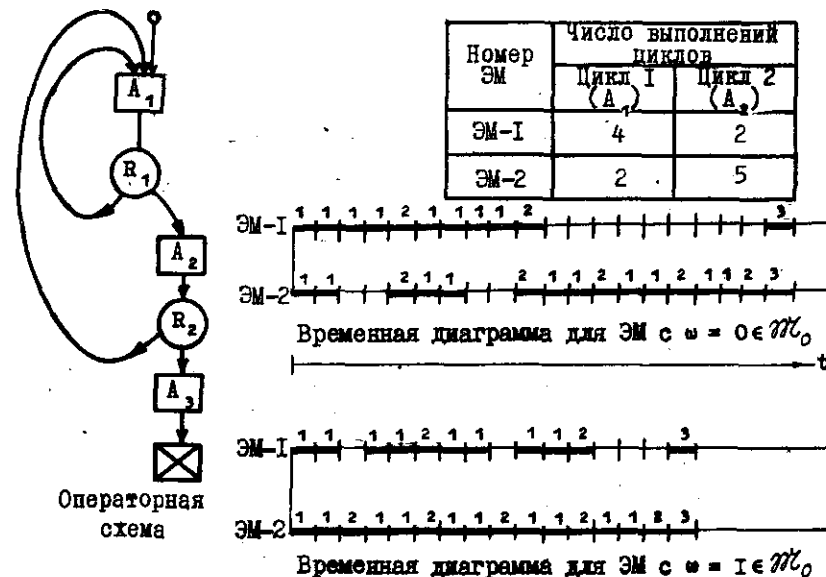


Рис. 3

II3

гали, что в M_0 включаются только машины, для которых значение логической переменной для соответствующего распознавателя равно 0. В ряде случаев может оказаться удобным включить в M_0 ЭМ со значением распознавателя, равным 1. На рис.3 влияние выбора ЭМ для M_0 показано на примере двух ЭМ, выполняющих двукратный цикл. На этом рисунке значения времени выполнения операторов A_1 , A_2 и A_3 положены равными. Число проходов каждого из циклов дано для каждой ЭМ в таблице на рис.3. Интервалы блокировки работы на временных диаграммах (рис.3) показаны тонкой линией. Взято равное время выполнения всех циклов.

Описанный эвристический алгоритм является простым в реализации и может быть положен в основу разработки комплекса аппаратно-программных средств, с помощью которых организуется работа ОВС в С-режиме. Это позволит увеличить гибкость ОВС и расширить область их применения.

Результаты работы позволяют сформулировать требования к операционной системе машины, необходимые для преобразования произвольной программы в пригодную для выполнения в С-режиме.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕИНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука", 1966.
2. ДИМИТРИЕВ Ю.К. О потерях времени при работе однородной вычислительной системы в синхронно-программном режиме. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.
3. ЕРШОВ А.П. Операторные схемы, Ш. В. кн.: Проблемы кибернетики, М., "Наука", 1968, вып.20. стр. 181-200.
4. ДИМИТРИЕВ Ю.К., ШУМ Л.С., ТОМИЛОВ Ю.Ф., ПОТАПОВА Ю.Н. Блок коммутации и взаимодействие элементарных машин управляющей однородной вычислительной системы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, стр. 107-118.
5. ШУМ Л.С. О функциональной организации однородных вычислительных систем. Там же, стр. 81-87.
6. БРУДНО Л.Л. Программирование в содержательных обозначениях. М., "Наука", 1968.

Поступила в ред.-изд.отд.
16 ноября 1973 года