

16. Иванов В. А., Чащин С. В. Идентификация и выделение геологических образований в диалоговом режиме.— В кн.: Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1983.
17. Киричук В. С., Кушнир М. В., Яковенко Н. С. Определение лучевых скоростей в атмосфере Солнца с помощью фотометрического автомата «Зенит-2».— Солнечные данные, 1981, № 11.
18. Kiselev N. A. et al. Computer averaging of 50S ribosomal subunit electron micrographs.— J. Mol. Biol., 1983, vol. 169, p. 345—350.
19. Косых В. П., Леонова В. Г., Пустовских А. И. Применение комплекса автоматизированного анализа микроизображений для изучения возрастной динамики рас-

УДК 681.327 : 681.3.06

В. П. КОСЫХ, А. И. ПУСТОВСКИХ, Е. В. ТАРАСОВ, Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР

1. В последние годы возникло интересное направление в проблематике анализа изображений, базирующееся на сравнительно недавно появившейся области математики, названной математической морфологией [1, 2]. Математическая морфология, опираясь на несколько весьма общих принципов, предлагает теоретико-множественный подход к количественному описанию характеристик изображения и на его основе строит аппарат, позволяющий выполнять достаточно широкий класс операций над изображениями, рассматриваемыми как множества, заданные в некотором векторном пространстве.

2. Ниже будут кратко рассмотрены некоторые важные понятия математической морфологии и пояснены их содержательные приложения к обработке изображений. Количественное описание исследуемого множества (изображения) базируется на его преобразовании с помощью некоторого набора эталонных множеств — структурных элементов. Структурным элементом называется множество $B = (B^1, B^2)$, состоящее из пары непересекающихся подмножеств — B^1 и B^2 . Структурный элемент, начало которого помещено в точку x пространства, обозначим через B_x . Сначала рассмотрим важный частный случай, когда в структурном элементе одно из подмножеств пусто. Операция дилатации (dilation) множества X посредством структурного элемента B определяется следующим образом:

$$Y = X \oplus B = \{x : B_x \cap X \neq \emptyset\}. \quad (1)$$

Например, результатом дилатации множества X (рис. 1, а) посредством структурного элемента B , представляющего собой круг радиусом r (рис. 1, б), является множество, «расширенное» относительно исходного на полосу шириной r (рис. 1, в). Двойственная дилатации операция называется эрозией (erosion):

$$Y = X \ominus B = \{x : B_x \subset X\}. \quad (2)$$

Результат эрозии с помощью того же структурного элемента иллюстрируется рис. 1, г.

Из определений (1) и (2) непосредственно следует:

$$X \ominus B = (X^c \oplus B)^c, \quad (3)$$

т. е. эрозия множества X приводит к дилатации его дополнения X^c .

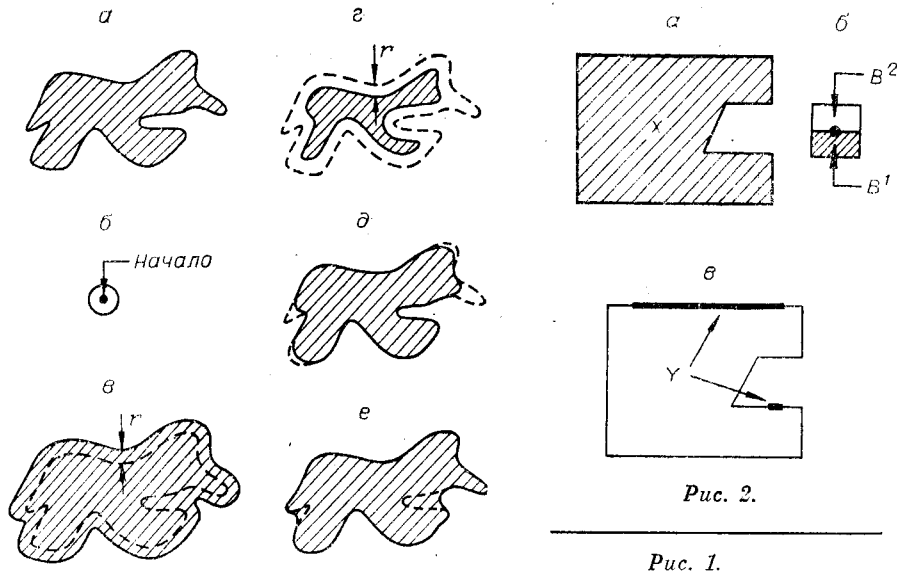


Рис. 1.

Отметим одно практически важное свойство этих операций. Если через X_b обозначить исходное множество X , сдвинутое на вектор b , где b принадлежит структурному элементу, то легко убедиться в том, что

$$Y = X \ominus B = \bigcap_{b \in \check{B}} X_b$$

и

$$Y = X \oplus B = \bigcup_{b \in \check{B}} X_b, \quad (4)$$

где \check{B} — множество, симметричное множеству B относительно начала координат.

Последовательное применение эрозии и дилатации называется за-
полнением (opening) множества X посредством B и, как показывает
рис. 1, d , удаляет «тонкие отростки» исходного множества. Наоборот,
операция пополнения (closing), состоящая в последовательном выполне-
нии дилатации и эрозии, заполняет «узкие каналы» (рис. 1, e). Приме-
нение этих операций с использованием гомотетического семейства струк-
турных элементов, зависящего от числового параметра, позволяет при-
дать строгий количественный смысл понятиям формы и размера анали-
зируемого множества.

С помощью структурного элемента, состоящего из двух непустых
подмножеств, определяется более общая операция математической
морфологии — сравнение (hit or miss):

$$Y = X \otimes B = \{x : B_x^1 \subset X, B_x^2 \subset X^c\}.$$

В результате этой операции выделяются только те элементы исходного
множества, окрестность которых совпадает с данным структурным эле-
ментом (рис. 2, $a-d$). Применение последовательности операций срав-
нения с использованием различных структурных элементов выявляет
разнообразные топологические свойства исследуемого множества.

Имеется простая связь между операциями эрозии, дилатации и
сравнения. Во-первых, эрозия есть не что иное, как сравнение, при
условии, что $B^2 = \emptyset$, во-вторых,

$$X \otimes B = (X \ominus B^{-1}) \cap (X^c \ominus B^2) = (X \ominus B^{-1}) \setminus (X \oplus B^2). \quad (5)$$

Весьма содержательными для широкого круга задач обработки изобра-
жений являются включающие операцию сравнения преобразования
гомотетического утоньшения (thinning) и утолщения (thickening), кото-
рые определяются следующим образом:

$$X \circ B = X \setminus X \otimes B, \quad X \odot B = X \cup X \otimes B. \quad (6)$$

Выполнение последовательности подобных преобразований над изображениями посредством подходящих структурных элементов позволяет обеспечивать их сокращенное описание, подчеркивать границу изображения или наиболее интересную ее часть, строить так называемые скелетоны изображения и т. п.

3. Аппарат математической морфологии оказывается весьма полезным в таких задачах обработки изображений, как структурный анализ материалов (изучение микросрезов, микрошлифов), классификация объектов по форме (исследование цитологических и гистологических препаратов), статистический анализ точечных полей (популяционные задачи) и т. д. Поскольку он применим как к непрерывным, так и к дискретным множествам, возможно его использование в цифровой обработке изображений. Практическая реализация операций математической морфологии существенно зависит от структуры вычислительной машины, на которой они исполняются. Из выражений (4) и (5) следует, что эти операции могут быть сведены к сдвигам исходных изображений, определенным структурным элементом, и выполнению со сдвинутыми изображениями поэлементных логических операций либо к сравнению каждого элемента исходного изображения и его окрестности с заданным структурным элементом. Из соображений, обусловленных возможностями реализации, размеры окрестности, на которой задаются структурные элементы, удобно зафиксировать (например, структурный элемент может состоять из центрального элемента и некоторых его ближайших соседей, определяемых в соответствии с выбранным способом дискретизации изображения). При этом не умаляется общность выполняемых операций, поскольку можно показать [1], что операции со структурными элементами произвольных размеров можно свести к последовательности операций со структурными элементами фиксированной величины. Эффективное применение методов математической морфологии для решения реальных задач анализа изображений ограничено по той причине, что соответствующие алгоритмы оказываются, как правило, итеративными, а выполнение морфологических операций на универсальных вычислительных машинах весьма трудоемко. С другой стороны, очевидно, что эти операции допускают такое распараллеливание вычислений, при котором все элементы окрестности сравниваются со структурным элементом одновременно; нужно только организовать специальные связи в процессоре, осуществляющем это сравнение. Более того, принципиально возможны параллельные преобразования всех элементов исходного изображения, поскольку в морфологических операциях эти преобразования одинаковы для всего исходного множества. Поэтому весьма целесообразно создание специализированных вычислительных средств, структура которых позволяет организовать необходимые связи и быстро производить такие операции над большими массивами данных. Этому требованию в значительной мере соответствуют так называемые процессоры клеточной логики, получившие в последнее время широкое распространение [3].

В Институте автоматизации и электротехники СО АН СССР в 1982—1983 гг. был разработан и изготовлен специализированный процессор, названный морфологическим; теоретической основой его создания послужили работы по применению математической морфологии для анализа изображений, выполненные в Центре математической морфологии в Фонтенбло [2].

Вычисления в данном процессоре распараллелены только на уровне сравнения со структурным элементом; входной массив данных при этом обрабатывается последовательно. Преобразования над двухградационными изображениями форматом 256×384 элемента выполняются со скоростью около 8 кадр./с. Работа с двухградационными изображениями позволяет свести к минимуму число анализируемых связей между соседними элементами массива и дает возможность задавать структурные элементы в виде таблицы масок, где каждой возможной окрестности

входного изображения приписывается маска, указывающая на результат сравнения ее с заданным структурным элементом. Тип окрестности программируемый (8- или 6-связные окрестности). Поле исходных данных может быть разбито на несколько непересекающихся подполей таким образом, чтобы ни один элемент данного подполя не имел соседей, принадлежащих этому же под полю. Такое разбиение необходимо при выполнении операций, которые не должны нарушать homotopию исходного изображения. На рис. 3, а показано разбиение гексагонально упакованного массива на три подполя.

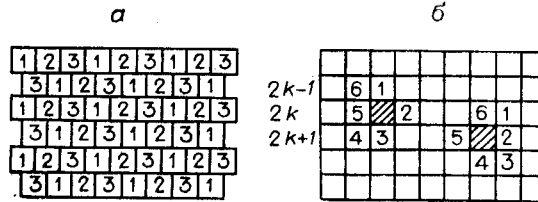


Рис. 3.

4. Основным функциональным узлом процессора является процессорный элемент (рис. 4, а), состоящий из схемы формирования окрестности, табличного запоминающего устройства (ТЗУ), хранящего табли-

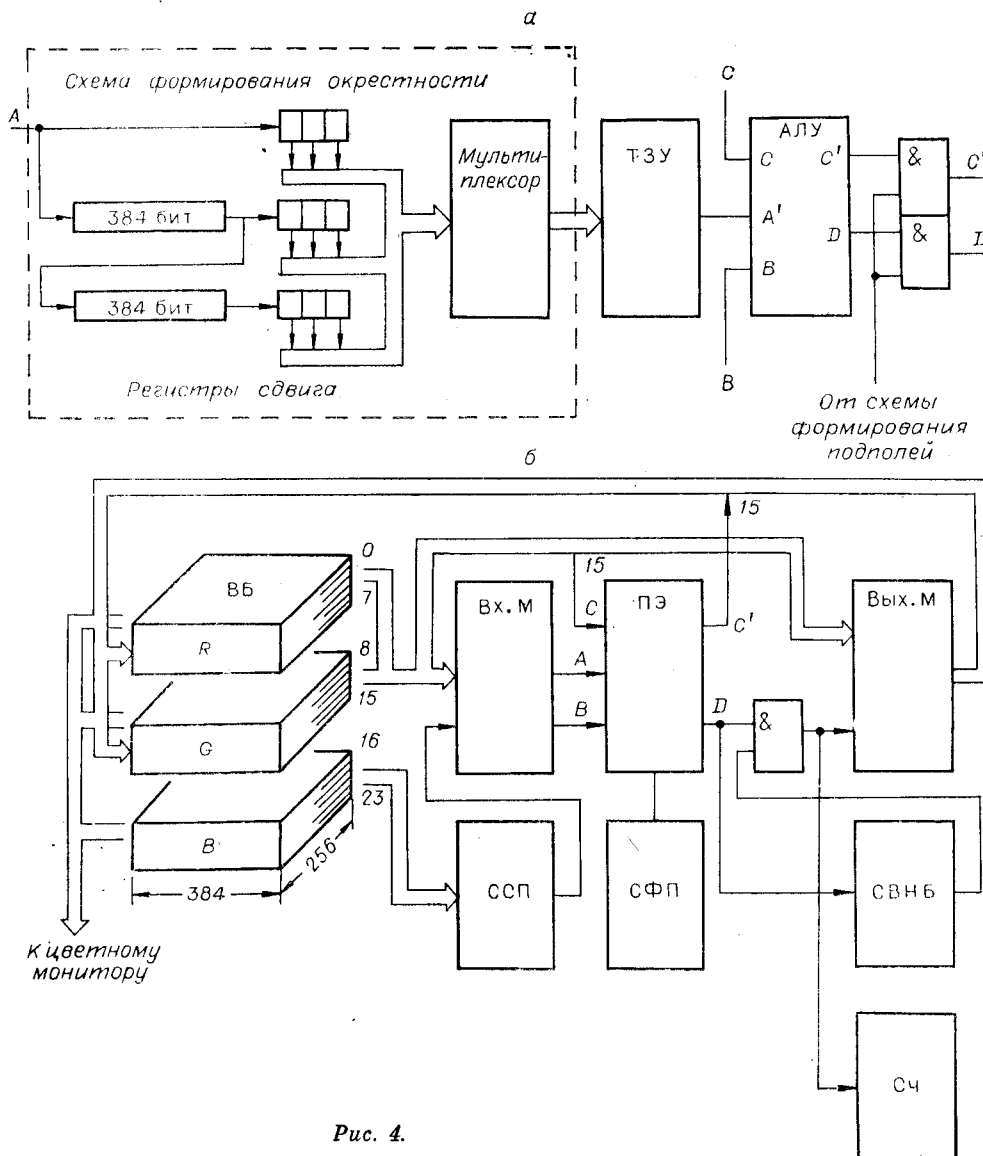


Рис. 4.

цу заданных масок, и одноразрядного АЛУ. Схема формирования окрестности содержит два последовательно соединенных сдвиговых регистра, каждый из которых имеет длину, равную длине обрабатываемой строки, три 3-разрядных сдвиговых регистра, предназначенных для хранения значений текущего элемента массива и его окрестности, и мультиплексор, преобразующий при необходимости прямоугольную окрестность в гексагональную способом, показанным на рис. 3, б. На выходе мультиплексора формируется 9-разрядный код, соответствующий выбранной окрестности, который интерпретируется как адрес ТЗУ. С выхода ТЗУ результат операции поступает на вход *A* АЛУ как один из операндов, второй операнд приходит на вход *B* непосредственно из буферной памяти, хранящей обрабатываемое изображение. Для выполнения одноразрядных арифметических операций между двумя изображениями АЛУ имеет вход и выход переноса — C и C' . Для использования арифметического, что необходимо при последовательном анализе односвязных областей в массиве. Данные, которыми оперирует процессор, хранятся в видеобуфере (ВБ), организованном в виде трех разделов памяти, каждый из которых имеет объем $384 \times 256 \times 8$ бит. Содержимое видеобуфера выводится на цветной телевизионный монитор, за каждым разделом закреплен свой цвет: *R*, *G*, *B*. Поскольку процессор одноразрядный, в него введены входной (Вх.М) и выходной (Вых.М) мультиплексоры, позволяющие выбирать из двух разделов (*R* и *G*) видеобуфера две любые битовые плоскости в качестве входных операндов и одну битовую плоскость — в качестве выходного. Одна из 16 плоскостей (пятнадцатая) зафиксирована как плоскость переноса для арифметических операций. В третьем разделе (*B*) видеобуфера хранится исходное полутоновое изображение, которое преобразуется схемой сравнения с порогом (ССР) в двухградационное и может использоваться в качестве операнда процессорного элемента.

5. Системное математическое обеспечение морфологического процессора является развитием использовавшегося в процессоре, смоделированном ранее программным способом на мини-ЭВМ ЕС-1010 [4]. Программное обеспечение (для той же ЭВМ) включает систему базовых модулей нижнего уровня и специализированных модулей среднего уровня [5], которые хранятся в SL-библиотеке и после подгрузки в оперативную память вызываются из проблемной программы, а также исполняемую программу MORPH мониторного типа, работающую в диалоговом режиме.

Базовые модули, состоящие из ассемблерных секций, каждая из которых выполняет отдельную функциональную или служебную операцию, обеспечивают управление аппаратурой и освобождают программиста от знания ее системы команд. Модули среднего уровня осуществляют некоторые часто используемые операции над изображениями с применением морфологических преобразований и вычислений: построение скелетона изображения, фильтрацию, удаление областей, лежащих на границе и т. п. Программный монитор MORPH, реализующий вызовы соответствующих секций управления процессором, позволяет в диалоговом режиме производить морфологические операции над изображением и визуализировать конечные и промежуточные результаты.

Все обращения к процессору представляют собой вызов нужных секций модуля нижнего уровня IMORPH. Обращение к нему, например, из программы, написанной на Фортране, имеет вид

CALL THRESH (LEVEL, IPLANE),

0 0 + 1 + A 1 1	1 + 1 1 0 B 1 +	0 + 0 1 1 C 0 +	1 + 1 0 + D 1 +	+ + 0 1 0 E 0 0	0 0 0 1 0 F 0 0
1 0 0 1 1 G 1 0	1 1 + 1 + H + +	+ + + 0 1 I + +	1 1 1 1 1 L 1 1	0 0 + 1 + S + +	+ + + 1 + T + +

Рис. 5.

где THRESH — одна из функций процессора, LEVEL и IPLANE — ее параметры. Кратко опишем основные секции IMORPH. Секция THRESH производит операцию разбиения полутонового изображения по уровню (LEVEL) и результат заносит в указанную рабочую плоскость (IPLANE). Над полученными двухградационными изображениями могут выполняться поэлементные арифметико-логические либо морфологические операции.

Из 32 арифметико-логических операций процессора 7 наиболее распространенных управляются отдельными секциями модуля IMORPH (ICOMPL — дополнение, LOGAND — логическое И, LOGIOR — логическое ИЛИ, LOGEOR — логическое исключающее ИЛИ, LSUBTR — логическое вычитание, LSEND — пересылка из одной разрядной плоскости в другую, LCLEAR — занесение «0» или «1» в одну из плоскостей). Остальные операции реализуются секцией LOGPRO.

Морфологические операции выполняются с применением структурных элементов, состоящих из центральной точки и 6 или 8 ближайших соседей со значениями «0», «1» или «+» — произвольно (произвольное значение элемента означает, что данная точка окрестности не влияет на результат операции). Имеется 12 стандартных элементов (рис. 5) и 12 их дополнений (в дополнениях все единицы заменяются на нули и наоборот, а элементы «+» остаются без изменения).

Кроме того, пользователю предоставляется возможность сформировать по своему усмотрению до шести таблиц, содержащих произвольные структурные элементы и их комбинации. Присвоение значения нестандартному структурному элементу выполняется секцией NSETEL. Из исходных структурных элементов могут быть получены структурные элементы, повернутые относительно исходного на 1—5 позиций по часовой стрелке. При вызове программной секции, выполняющей морфологическую операцию, структурный элемент задается своим символьным именем и номером позиции в качестве параметра секции.

Модуль IMORPH содержит 7 секций, реализующих морфологические операции: MEROSI — эрозия, MDILAT — дилатация, MOPEN — заполнение, MCLOS — пополнение, MHTOR — сравнение, MTHINN — утолщение, MTHICK — утончение. В качестве параметров секций указываются номера исходной и результирующей плоскостей, а для трех последних операций — и структурный элемент (первые четыре всегда исполняются со структурным элементом L).

Имеется также несколько секций, управляющих служебными операциями. Секция NSEEK в указанной плоскости ведет поиск первого ненулевого элемента и помещает его в результирующую плоскость. В ходе выполнения любой операции процессор подсчитывает количество единичных битов в результате; соответствующий регистр читается секцией RSTATU. Установка количества соседей (6 или 8) выполняется секцией NEIGHB. Она задает процессору тип решетки — гексагональную или прямоугольную. Секция NFRAME указывает значение (0 или 1), присваиваемое всем граничным элементам после выполнения всех последующих операций. Визуализация содержимого указанной плоскости на дисплее осуществляется под управлением секции KDISPL.

Программный модуль IMORPH оптимизирован по скорости исполнения операций. При обработке параметров очередного вызова произво-

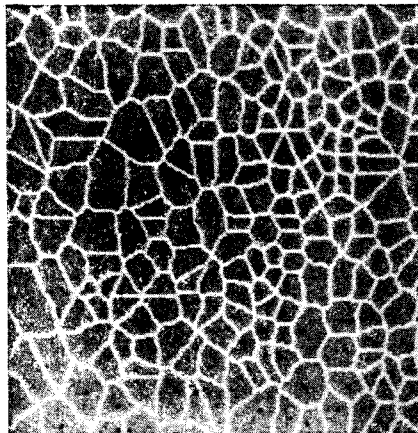


Рис. 6.

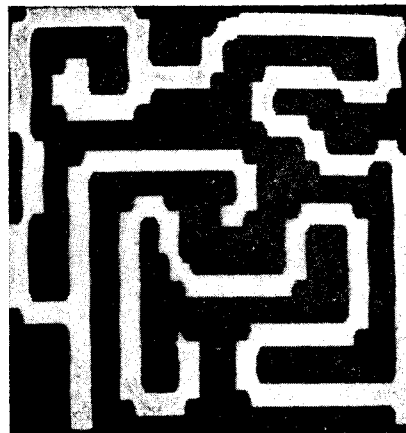


Рис. 7.

дится сравнение с предыдущими вызовами. В случае совпадения соответствующих адресов или структурных элементов лишние аппаратные операции не выполняются.

6. В заключение приведем несколько результатов, иллюстрирующих работу процессора. На рис. 6 показан результат работы алгоритма построения полигонов Вороного по множеству исходных точек (помечены внутри полигонов). Алгоритм сводится к многократному применению операции сравнения с дополнением структурного элемента $A1 \div 5$:

$$Y = \{(X \otimes A^c) \cap X\}.$$

Фигурные скобки обозначают многократное выполнение операции до получения устойчивого результата. Поиск пути в простом лабиринте представлен на рис. 7. Алгоритм решения задачи имеет вид

$$Y' = \{X \setminus (X \otimes A)\},$$

$$Y = \{Y' \setminus (Y' \otimes E)\}.$$

Здесь исходным множеством X является изображение лабиринта.

С помощью процессора можно выполнять фильтрацию изображения, в частности, удалять из него области с заданными линейными размерами или площадью. На рис. 8, *a*, *б* показано исходное изображение и результат фильтрации, при которой удалялись все области с линейными размерами, меньше заданного. Удалены также все области, соприкасающиеся с границей. Алгоритм фильтрации сводится к n -крат-



Рис. 8.

пому применению эрозии и последующему выполнению дилатации до полного восстановления оставшихся областей:

$$Y' = n(X \ominus L),$$
$$Y = \{(Y' \oplus L^e) \cap X\},$$

где n — минимальный радиус удаляемых областей.

Авторы выражают благодарность З. А. Лившицу за ценные замечания, высказанные при подготовке работы к печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матерон Ж. Случайные множества и интегральная геометрия.— М.: Мир, 1978.
2. Serra J. Image analysis and mathematical morphology.— N. Y.: Academic Press, 1981.
3. Денисов В. М., Матвеев Ю. Н., Очин Е. Ф. Принципы организации систем обработки изображений на базе клеточной логики.— Зарубеж. радиоэлектроника, 1984, № 1.
4. Косых В. П., Пустовских А. И., Яковенко Н. С. Программная реализация морфологического процессора.— Автометрия, 1982, № 4.
5. Яковенко Н. С. Организация системного программного обеспечения комплекса обработки аэрокосмической информации.— Там же.

Поступила в редакцию 9 января 1984 г.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В № 3 за 1984 г. замечены следующие опечатки:

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
29	Таблица, 2-я строка снизу	31 В127 (КК. * С.)	31 В127 (К. * С.)
35	14-я (снизу)	Винокуров В. С.	Винокуров Ю. С.
100	4-я (снизу)	масштабы	масштабы