

Процессоры визуализации всех трех рассмотренных моделей реализуются на базе только целочисленной арифметики. Для обеспечения требуемой точности вычислений при растровой развертке и раскраске используется алгоритм Брезенхэма [5], позволяющий также ограничиться при вычислениях только операциями сложения и сравнения.

Система имеет гибкую структуру и допускает модификации и расширения. Для поддержки программной модели разработан обширный инструментарий. Имеется система автоматической триангуляции поверхностей канонических объектов: сферы, тора, конуса, цилиндра и т. д.; система построения сложных объектов из канонических; программа построения в-оболочек и ведения базы данных объектов и т. д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arnold D., Reynolds G. The use of modularity and configurability in the comparison of graphics systems design // NATO ASI Series, 1988.— V. F40.
2. ISO Information Processing Systems — Computer Graphics — Programmer's Hierarchical Interface to Graphics (PHIGS) // Functional Description, ISO DP9592, 1986.
3. Фоли Дж., ван Дэм А. Основы интерактивной машинной графики.— М.: Мир, 1985.— Кн. 1.
4. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений.— М.: Радио и связь, 1986.
5. Bresenham T. E. A linear algorithm for incremental digital display of circular arcs // Commun. of the ACM.— 1977.— 20, N 2.— P. 100.

*Поступила в редакцию 16 января 1990 г.*

УДК 629.7.058.74 : 681.3.06

**А. М. КОВАЛЕВ, А. С. ТОКАРЕВ**

*(Новосибирск)*

### СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ЭЛАЙСИНГА И ОКОНТУРИВАНИЯ

В системах синтеза визуальной обстановки [1] качество изображений во многом определяется средствами антиэлайсинга, устраняющими также визуальные аномалии, как ступеньки на контурах объектов, разрывы тонких граней, мерцания малых объектов, муары и пр., в сочетании с правильным выбором разрядности цифрового кодирования сигналов для плавного, без видимых скачков изменения яркости или цвета на гладких поверхностях объектов.

Франклин Кроу [2, 3] впервые показал, что эффективным средством антиэлайсинга является предварительная фильтрация синтезированных изображений. Джонсон Ян [4] со ссылкой на [5, 6] обратил внимание на то, что фильтр должен обладать свойством равноэнергетичности. И наконец, Эдвин Катмулл [7] показал, что несмотря на фильтрацию, изображение будет иметь элайсинг, если не компенсировать нелинейность модуляционной характеристики воспроизводящих устройств, например электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). В то же время в [7] отмечается, что при использовании общепринятого в машинной графике 8-разрядного двоичного кода интенсивности возникают проблемы квантования («оконтуривания») в области малых яркостей.

В книге по интерактивной машинной графике [8] таблицу  $\gamma$ -коррекции для компенсации нелинейности модуляционной характеристики ЭЛТ рекомендуют составлять с учетом логарифмического распределения уровней интенсивности. Такой подход решает проблему «оконтурива-

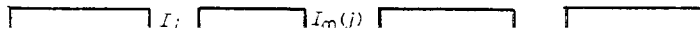


Рис. 1

ния», но при этом остается открытой проблема линейной фильтрации синтезированных изображений.

Для решения обозначенных проблем в настоящей работе предпринята попытка комплексного исследования вопросов фильтрации, дискретизации, коррекции и квантования сигналов с целью определения требований к устройствам синтеза высококачественных изображений, воспроизводимых с помощью телевизионных мониторов на ЭЛТ.

**Фильтрация и дискретизация.** На рис. 1 представлена система синтеза визуальной обстановки, в которой выделены оконечные блоки и сигналы, представляющие интерес для последующего анализа.

Цифровой генератор изображений синтезирует двумерную функцию, которая описывает конечное множество видимых многоугольников в плоскости экрана, раскрашенных в разный цвет или имеющих разную интенсивность  $I(x, y)$ , где  $x, y$  — координаты экранной плоскости. Цифровая память накапливает и хранит фильтрованное изображение, заданное на дискретном растре, который можно представить в виде двумерной  $\delta$ -функции выборки:

$$\delta(p, q) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \delta(x - p\Delta x, y - q\Delta y), \quad (1)$$

где  $M$  — число строк в изображении вдоль оси  $Y$ ;  $N$  — число пикселей (элементов изображения) в строке вдоль оси  $X$ ;  $p, q$  — адрес пиксела в памяти изображения;  $\Delta x, \Delta y$  — расстояние между пикселями вдоль  $X$  и  $Y$  соответственно.

При отображении данные подвергаются коррекции, цифроаналоговому преобразованию и воспроизведению на ЭЛТ.

Процесс фильтрации и дискретизации в системах синтеза изображений неразрывен [9]. Он сводится к тому, что в каждый  $p, q$ -й пиксел (точку выборки) устанавливают фильтр  $H(x, y)$ , вычисляют веса, равные двойному интегралу от функции фильтра над областью каждого  $j$ -го из  $n$  многоугольников, и взвешенные интенсивности многоугольников суммируют:

$$I_{\Phi}(p, q) = \sum_{j=1}^n I_j S_j, \quad (2)$$

где  $I_j, S_j$  — интенсивность и вес  $j$ -го многоугольника, причем функция интенсивности в пределах апертуры фильтра считается постоянной величиной.

Как правило, цифровой генератор изображения выдает данные последовательно и вразнобой по пикселям. Поэтому, во-первых, для накопления интенсивности  $I_{\Phi}(p, q)$  нужна память на полное изображение и, во-вторых, процесс накопления происходит итеративно:

$$I_{\Phi(j)} = I_{\Phi(j-1)} + I_j S_j. \quad (3)$$

**Равноэнергетические фильтры.** Фильтр обладает свойством равноэнергетичности тогда и только тогда, когда сумма амплитуд выборок дискретизированного изображения фильтра, помещенного в произвольную

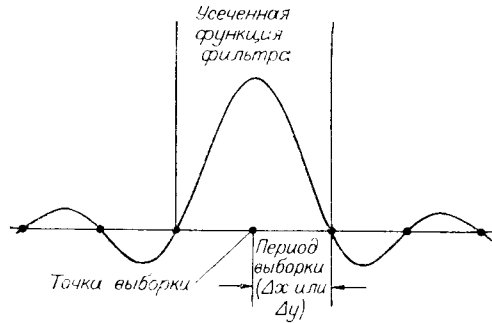


Рис. 2

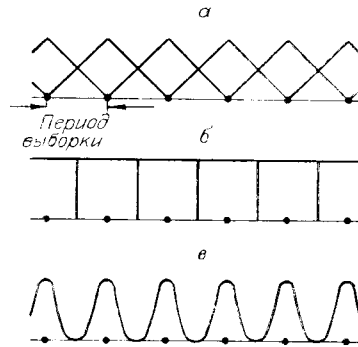


Рис. 3

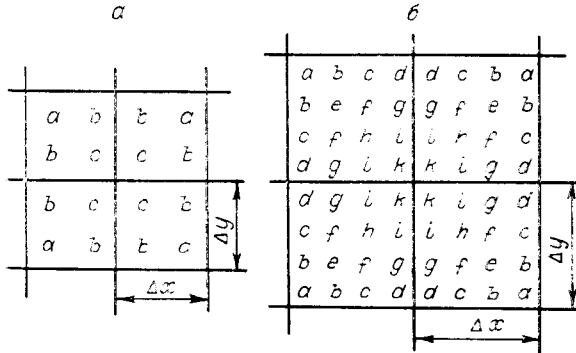


Рис. 5

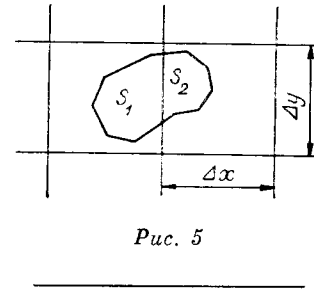


Рис. 4

точку экрана с координатами  $x = a$ ,  $y = b$ , является постоянной величиной, т. е.

$$\sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \delta(p, q) H(x - a, y - b) = \text{const.} \quad (4)$$

Другое определение. Фильтр обладает свойством равноэнергетичности тогда и только тогда, когда фильтрованное изображение двумерной  $\delta$ -функции выборки есть постоянная величина, т. е.

$$\sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} H(x - p\Delta x, y - q\Delta y) = \text{const.} \quad (5)$$

В некогерентной системе воспроизведения изображения энергия излучения ЭЛТ, или интенсивность, яркость, зависит только от амплитуды сигнала. Равноэнергетический фильтр в сочетании с дискретизацией только распределяет или концентрирует «энергию» входного сигнала по пикселям, но не изменяет ее. Это очень важное следствие, необходимое для получения высококачественного изображения.

Идеальный фильтр, обеспечивающий наибольшую четкость изображения при полном подавлении элайсинга, — двумерный сепарабельный фильтр в виде произведения двух sinc-функций, т. е.  $H(x, y) = \text{sinc}(x) \text{sinc}(y)$ . Одномерная версия этой функции показана на рис. 2. К сожалению, идеальный фильтр не является практичным, так как требует вычислений над всей областью изображения. Поэтому апертуру идеального фильтра усекают до нескольких периодов выборки, а центральную часть функции аппроксимируют.

Примеры равноэнергетических непрерывных фильтров показаны на рис. 3, а, б. На рис. 3, в приведен неравноэнергетический фильтр.

В системах синтеза изображений широко применяют дискретные фильтры типа «Bed of nails» («кровать с гвоздями») с использованием субпиксельной выборки [4]. На рис. 4 показаны такие фильтры с основанием  $4\Delta x\Delta y$  и количеством субпикселей  $4 \times 4$  (рис. 4, а) и  $8 \times 8$

(рис. 4, б); буквами обозначены веса субпикселей — «гвоздей». Для приведенных фильтров «энергия» точки, помещенной на экран в любую позицию с субпиксельным разрешением, распределяется на 4 пикселя. Фильтр на рис. 4, а равноэнергетичен в соответствии с (4), если  $a + 2b + c = \text{const}$ . Для фильтра на рис. 4, б условие равноэнергетичности  $a + 2d + k = b + c + g + i = e + 2j + h$ .

**Коррекция нелинейности модуляционной характеристики ЭЛТ.** Яркость экрана ЭЛТ определяется статической модуляционной характеристикой, обусловленной обычно степенной функцией

$$B = kU^\gamma, \quad (6)$$

где  $B$  — яркость;  $U$  — напряжение на модуляторе;  $k$  и  $\gamma$  — константы в первом приближении.

Что получится, если не вводить никакой коррекции кода интенсивности на выходе памяти изображения?

Рассмотрим пример распределения энергии. Пусть имеется прямоугольный фильтр и многоугольник с площадью  $S \leq \Delta x \Delta y$  и расчетной интенсивностью  $I$ . Пусть площадь этого многоугольника попала на два смежных пикселя в соответствии с рис. 5. Доля интенсивности в первом пикселе  $S_1 I$ , во втором —  $S_2 I$ . Суммарная интенсивность  $S_1 I + S_2 I = SI$ . Понятно, что суммарная интенсивность будет оставаться равной  $SI$  при перемещении многоугольника по экрану независимо от того, покрывает ли он при этом один, два, три или четыре пикселя. Постоянство суммарной интенсивности предотвращает мерцание этого малого объекта при перемещении, что важно, например, для таких объектов, как сгнн, звезды, тонкие линии и т. д. И это постоянство суммарной интенсивности — следствие свойств равноэнергетического фильтра. Однако если напряжение на модуляторе ЭЛТ пропорционально вычисленной интенсивности, то суммарная яркость пикселей будет равна  $B = B_1 + B_2 = k(S_1 I)^\gamma + k(S_2 I)^\gamma \neq k(SI)^\gamma$ . Возникает погрешность, достигающая максимума при  $S_1 = S_2 = S/2$ . При  $\gamma = 2, 4$  и  $S = 1$  эта погрешность равна  $-62\%$  и яркость малого объекта при перемещении его по экрану будет меняться почти втрое.

Нетрудно убедиться, что в случае концентрации энергии в одном пикселе от разных многоугольников

$$B = k \left( \sum_{j=1}^n S_j I_j \right)^\gamma \neq k \sum_{j=1}^n (S_j I_j)^\gamma,$$

т. е. появляется погрешность интенсивности или нарушение соотношения компонент цветосмеси, вызывающее искажение цвета.

Чтобы не было искажений, нужно обеспечить линейность яркости  $B$  от интенсивности  $I_\Phi$ . Для этого и служит корректор нелинейности ЭЛТ (см. рис. 1), осуществляющий так называемую  $\gamma$ -коррекцию. Если напряжение на модуляторе

$$U = I_\Phi^{1/\gamma}, \quad (7)$$

то с учетом (6)  $B = kI_\Phi$ , и нет проблем.

Таким образом, для обеспечения антизлайсинга необходимо: 1) применять равноэнергетические фильтры и 2) обеспечивать линейную зависимость яркости ЭЛТ от кода интенсивности.

**Разрядность кода интенсивности.** После того как в системе установлен  $\gamma$ -корректор, работающий в соответствии с (7), необходимо определить требуемую разрядность интенсивностей  $I$ ,  $I_j$  и  $I_\Phi$  из условия отсутствия видимых скачков при любых градиентах яркости на гладких поверхностях криволинейных объектов. Для решения этого вопроса нужно учесть реальный контраст изображения и закон Вебера — Фехнера.

На практике при  $I_\Phi = U = 0$  невозможно получить нулевую яркость изображения из-за внутренней и внешней паразитной засветки. Поэтому

с учетом  $\gamma$ -коррекции

$$B = B_{\min} + kI_{\phi}, \quad (8)$$

где  $B_{\min}$  — величина паразитной засветки. Контраст изображения

$$K = B_{\max}/B_{\min},$$

где  $B_{\max}$  соответствует  $I_{\phi \max}$ .

Согласно закону Вебера — Фехнера, глаз реагирует на относительные приращения яркости. Различные глазом приращения  $\delta$  лежат в пределах 0,02—0,05, причем  $\delta$  увеличивается в области малых яркостей. Приращение яркости на единицу дискретности интенсивности  $\Delta I_{\phi}$  в области малых яркостей не должно превышать  $\delta B_{\min}$ . Поэтому количество уровней интенсивности

$$N_I = \frac{I_{\phi \max}}{\Delta I_{\phi}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{\delta B_{\min}} = \frac{K - 1}{\delta}. \quad (9)$$

При максимальном контрасте  $K = 100$ , различимом человеческим глазом,  $N_I = 1980—4950$ . Таким образом, только 11-12 разрядов кода интенсивности гарантируют плавное (без скачков) изменение яркости при самых малых градиентах интенсивности. Из (9) следует, что меньшую разрядность кода интенсивности можно допустить только при уменьшении контраста. Так, для 8-разрядного кода интенсивности контраст изображения не должен превышать  $K = 6—13$ , что явно недостаточно для высококачественных изображений.

**Разрядность цифроаналогового преобразователя.** В [10] показано, что разрядность цифроаналогового преобразователя зависит только от постоянной Вебера — Фехнера  $\delta$ , контраста изображения  $K$  и коэффициента  $\gamma$  в формуле модуляционной характеристики трубки и никак не связана с  $\gamma$ -коррекцией, фильтрацией и дискретизацией. При этом количество уровней квантования для цифроаналогового преобразователя

$$N_U = \frac{(K - 1)^{1/\gamma}}{\delta} (\gamma - 1)^{1-1/\gamma}. \quad (10)$$

При максимальном контрасте  $K = 100$ , типовом  $\gamma = 2,4$  и  $\delta = 0,05—0,02$   $N_U = 165—413$ . Таким образом, для цифроаналогового преобразователя, а следовательно, и на выходе таблицы  $\gamma$ -коррекции достаточно иметь 8—9 разрядов.

**Кодировка интенсивности по различным грациям яркости.** Из [11] известно, что максимальное число различимых градаций яркости в изображении, которое способен воспринимать наблюдатель, ограничено и равно  $m = \ln K / \ln(1 + \delta)$ . При  $K = 100$  и  $\delta = 0,02—0,05$   $m = 94—236$ , т. е.  $m < 2^7—2^8$ . Эти различные градации яркости образуют дискретный ряд значений, меняющихся по показательному закону

$$B_i = B_{\min}(1 + \delta)^i, \quad (11)$$

где  $i = 0—m$  — номер градации. Для их представления, как следует из (9), требуется линейная шкала, содержащая  $N_I \cong 2^{11}—2^{12}$  дискретных значений. Составляя  $m$  и  $N_I$ , можно заметить, что разрядность кода интенсивности нерационально избыточна, так как его разрешающая способность используется полностью только в ограниченной области очень малых абсолютных значений. Эта избыточность будет устранена, если код интенсивности  $I_i$  линейно связать с номером градации яркости  $i$ , т. е.  $0 \leq I_i = i/m \leq 1$ .

Подставляя значение  $i = mI_i$  в (11) и принимая во внимание, что контраст  $K = (1 + \delta)^m$ , получим

$$B_i = B_{\min} K^{I_i}, \quad (12)$$

или

$$I_i = \log_K(B_i/B_{\min}). \quad (13)$$

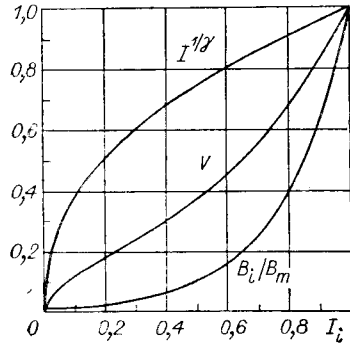


Рис. 6

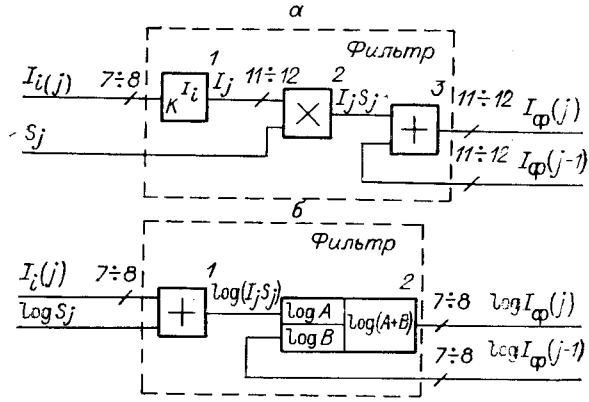


Рис. 7

Из (6) с учетом паразитной засветки  $B_i = B_{\min} + kU_i^\gamma$ . Пусть  $V_i = U_i/U_{\max}$ , тогда  $V_i$  лежит в диапазоне  $0 \leq V_i \leq 1$  и

$$B_i = B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min}) V_i^\gamma = B_{\min} [1 + (K - 1) V_i^\gamma]. \quad (14)$$

Решая совместно (12) и (14), найдем

$$V_i = \left( \frac{K^{I_i} - 1}{K - 1} \right)^{1/\gamma}, \quad (15)$$

что отражает передаточную характеристику таблицы  $\gamma$ -коррекции для кодировки интенсивности в соответствии с (13). Вид этой характеристики показан на рис. 6, где одновременно представлена также относительная яркость  $B_i/B_{\max}$  как функция  $I_i$ . Здесь же приведена кривая  $I_i^{1/\gamma}$ , отражающая функцию  $\gamma$ -коррекции для линейной кодировки интенсивности.

Рассмотренная интерпретация кода интенсивности (13) устанавливает линейную связь с визуальной яркостью изображения, поскольку зрительное восприятие пропорционально логарифму светового раздражения. Однако алгоритм фильтрации (2), (3) требует линейного соответствия  $I \sim B$ , и, чтобы реализовать вышеизложенные преимущества логарифмического кода интенсивности  $I_i$ , процедурам фильтрации должна предшествовать операция потенцирования  $I = K^{I_i}$ . На рис. 7, а показана структура фильтра, на вход которой поступают логарифмический код интенсивности  $I_i$  и линейный код  $S$  площади грани в апертуре фильтра. Фильтр, содержащий умножитель 2 и сумматор 3, оперирует линейными кодами интенсивности  $I$ , получаемыми от потенцирующей таблицы  $I$  и имеющими повышенную по отношению к коду  $I_i$  разрядность. Таблица  $\gamma$ -коррекции реализует функцию (7), а сквозная передаточная характеристика соответствует (15). Другая возможная структура представлена на рис. 7, б. В отличие от предыдущей в ней блок фильтрации выполнен как устройство логарифмической арифметики. Здесь логарифм произведения  $I_j S_j$  получается с помощью сумматора 1. Сумматор 2 может быть выполнен, например, по принципу потенцирование — сложение — логарифмирование или табличным способом, чему способствует пониженная разрядность логарифмических операндов. В этом случае таблица  $\gamma$ -коррекции реализует функцию (15). Пониженная разрядность операндов и отсутствие умножителя являются преимуществами этой структуры.

## ВЫВОДЫ

1. Для получения высококачественных изображений в системах синтеза визуальной обстановки необходимо предусматривать средства анти-элайсинга, включающие равноэнергетические фильтры.

2. Возможны две концепции кодирования интенсивности синтезированного изображения: а) код интенсивности линейно связан с яркостью воспроизводящего устройства на ЭЛТ, б) код интенсивности линейно связан с логарифмом яркости или пропорционален визуальной яркости.

3. В случае «а» компенсация нелинейности модуляционной характеристики ЭЛТ осуществляется  $\gamma$ -коррекцией типа  $U = I^{1/\gamma}$ , а устранение эффектов «оконтуривания» в области малых яркостей требует, чтобы код интенсивности был представлен 11—12 двоичными разрядами.

4. В случае «б» возможна наиболее компактная кодировка интенсивности 7—8 двоичными разрядами. Корректное выполнение фильтрации может быть осуществлено двумя способами: либо предварительным потенцированием типа  $K^I$  с получением 11—12-разрядного кода и последующей обработкой по концепции «а», либо применением логарифмической арифметики для фильтра и функции  $\gamma$ -коррекции типа  $U =$

$$= \left( \frac{K^I - 1}{K - 1} \right)^{1/\gamma}.$$

5. Разрядность цифроаналогового преобразователя зависит от постоянной Вебера — Фехнера, контраста изображения и коэффициента  $\gamma$  в выражении для модуляционной характеристики ЭЛТ и не превышает 8—9 двоичных разрядов для типового значения  $\gamma = 2, 4$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А. М., Талныкин Э. А. Машинный синтез визуальной обстановки // Автометрия.— 1984.— № 4.
2. Crow F. C. The aliasing problem in computer-generated shaded images // SACM.— 1977.— N 11.
3. Crow F. C. Advanced image synthesis — anti-aliasing // Advances in Computer Graphics I.— Springer-Verlag, 1986.
4. Yan J. K. Advances in computer-generated imagery for flight simulation // IEEE Comp. Graph.— 1985.— 5, N 8.
5. Schumacker R. A. A new visual system architecture // Proc. Second Interservice/Industry Training Equipment Conf., Nov. 1980.
6. Bunker W. M. Filtering Simulated visual scenes — spatial and temporal effects // Proc. Fourth Interservice/Industry Training Equipment Conf., Nov. 1982.
7. Catmull E. A tutorial on compensation tables // Comput. Graph.— 1979.— 13, N 2.
8. Фолл Дж., ван Дэм А. Основы интерактивной машинной графики.— М.: Мир, 1985.— Кн. 2.
9. Ковалев А. М., Токарев А. С. К оценке производительности алгоритмов фильтрации синтезированных изображений // Автометрия.— 1989.— № 2.
10. Ковалев А. М., Токарев А. С. Фильтрация, дискретизация, коррекция и квантование сигналов в системах синтеза визуальной обстановки.— Новосибирск, 1989.— (Препр./СО АН СССР, ИАиЭ; 419).
11. Телевидение/Под ред. В. Е. Джакониш.— М.: Радио и связь, 1986.

*Поступила в редакцию 12 февраля 1990 г.*

УДК 621.396.96 : 391.2

**А. А. БЕЛОКУРОВ, В. С. БЛЮМ**

*(Ленинград)*

### **РОБАСТНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ОБЛАСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

При создании автоматических устройств обработки сигналов и изображений одним из важнейших требований является устойчивость алгоритмов к изменению условий наблюдения. Особенно актуальным это требование становится при решении задач землеобзора, для которых ха-

© 1990 Белокуров А. А., Блюм В. С.