

УДК 520.62; 520.82; 520.82

## Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС) для наблюдений за искусственными спутниками Земли

*В.В. Прокофьева-Михайловская,<sup>1</sup> Н.З. Стрыгин<sup>2</sup>, П.П. Сухов<sup>2</sup>, Г.Ф. Карпенко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>2</sup> Астрономическая обсерватория ОНУ

Поступила в редакцию 28 июля 2006 г.

**Аннотация.** Кратко описана история наблюдения искусственных спутников Земли (ИСЗ). По объективным причинам на сегодня нет достаточно отработанной методики создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС). Показаны некоторые проблемы методологического, технологического, алгоритмического и т.д. характера, которые необходимо решить для разработки этой методики. Для некоторых проблем указаны возможные пути решения.

SOME MODERN PROBLEMS OF CREATION ASTRONOMICAL TELEVISION-MEASURING SYSTEMS (ATVMS) FOR ARTIFICIAL EARTH SATELLITES OBSERVATIONS, *by V.V. Prokof'eva-Mikhailovskaja, N.Z. Strigin, P.P. Sukhov and G.F. Karpenko.* History of the artificial satellite observations is briefly described. For objective reasons there is no enough perfected method of the creation astronomical television-measuring systems (ATVMS) for today. There are some methodological, technological, algorithmic and etc. problems, which are necessary to solved for the development of this methods. Possible ways of decisions are specified for some problems.

**Ключевые слова:** искусственные спутники Земли, телевизионные системы, координаты, звездные величины.

---

Исторически первый метод, применявшийся для определения координат ИСЗ, был визуальный, он позволял грубо определять координаты искусственных спутников Земли (ИСЗ), имеющих блеск до 6-7<sup>m</sup>. Использование фотографического метода повысило точность определения координат КО до 1' – 5".

Появление электронно-оптических приборов (ЭОП, ТВ-трубки класса суперорбитон) позволило увеличить проникающую способность и довести оперативность определения координат ИСЗ до нескольких часов. Идея использовать телевидение для наблюдения за ИСЗ принадлежит В.Ф. Анисимову. Она была поддержана В.Б. Никоновым (КрАО) и успешные совместные опыты телевизионных наблюдений ИСЗ были проведены летом 1964 года в КрАО (Агапов и др., 1965). В качестве питающей оптики был использован объектив “Телиос-53” (D = 80мм, F = 200 мм), в качестве приемника света – суперорбитон ЛИ214 с преусилением света с по-

мощью ЭОП УМИ92. Были оперативно получены изображения ряда ИСЗ с блеском до  $9^m$ . При наблюдениях звезд на 50-см менисковом телескопе системы Максудова была достигнута рекордная проникающая способность: при качестве изображений около 3 угловых секунд было получено изображение звезды  $20^m$  (контраст 50% на фоне ночного неба) при времени экспозиции 4 секунды (Абраменко и др. 1965).

На основании этих результатов в Москве была разработана специальная телевизионная аппаратура и установлена в КрАО на 2,6-метровый телескоп ЗТШ. На ней в течение нескольких лет был проведен ряд успешных наблюдений и определений координат ряда далеких искусственных космических объектов (КО). Ошибка определения координат колебалась в пределах десятков секунд дуги. Основную погрешность вносила дисторсия, присущая электронной оптике.

С целью ускорения определения координат ИСЗ, академик А.Б. Северный предложил метод прямого отсчета координат, который и был использован на 2,6-метровом телескопе ЗТШ, имеющем достаточно точный контроль положения инструмента. Метод позволил сократить время определения координат ИСЗ до нескольких десятков минут. Точность наблюдений повысилась до единиц секунд дуги, поскольку отпала необходимость учета ошибок, вносимых дисторсией. За цикл определений координат ряда далеких космических объектов в 1971 г В.Б. Никонов, в группе сотрудников КрАО и инженеров-москвичей, был удостоен Государственной премии СССР.

Следующий этап в методике получения координат ИСЗ связан с массовым применением ЭВМ в астрономии с конца 80 годов прошлого века. Высокоскоростные персональные ЭВМ способны без сжатия информации и без пропуска кадров записывать в память машины всю поступающую информацию в реальном масштабе времени. Это позволяет в течение ночи на автоматизированном телескопе получать сотни изображений нескольких десятков ИСЗ. Процедура вычисления координат ИСЗ с использованием ПЭВМ может иметь два варианта.

Первый из них реализован в Одесской астрономической обсерватории и сравним с методом обычной фотосъемки. Оператор на экране ВКУ выбирает момент времени, когда удачная конфигурация звезд “окружает” ИСЗ, и нажатием клавиши проводит “захватывание” аналогово-цифровым преобразователем единичного файла из видеопотока, т.е. оцифровку сюжета звездного неба (ЗН) с ИСЗ в этот момент времени в память машины. Далее производится полуавтоматическая предварительная обработка файла, включающая учет фона, дисторсионных искажений по полю, формирование модельного файла. Затем модельный файл поступает в программу, вычисляющую координаты ИСЗ. Этот способ позволяет вычислять координаты по единичному файлу со среднеквадратичной ошибкой измерений (СКО) до 5 секунд дуги, или 1-2 пиксела при разрешении  $b = 2.6$  секунд дуги на пиксел. Оперативность такого способа вычисления координат ИСЗ находится в пределах нескольких минут.

Второй вариант более автоматизирован и применяется с конца 80-х годов. Он требует наличия на телескопе цифровых датчиков “угол-код”. При этом способе делается “захват” из видеопотока  $N$ -кадров подряд, либо через очень короткий временной интервал. Ввиду наличия обратной связи, компьютер “знает” координаты оптической оси телескопа и вызывает из памяти компьютерный астрометрический каталог этого участка ЗН. Следующий шаг – автоматическое отождествление наблюдаемого изображения ЗН-участка неба с компьютерным изображением этого же участка ЗН, и вычисление координат ИСЗ относительно опорных звезд. Произведя усреднение  $N$ -координат, полученных на очень коротком временном интервале и  $N$ -моментов времени, в итоге можно получить СКО менее  $b/N$  сек. дуги. Оперативность такого способа вычисления координат составляет 10-20 секунд.

В настоящее время разрабатываются наиболее точные алгоритмы определения координат центроидов изображений, яркости информативных объектов, учета фона, различных искажений, присутствующих в любом ТВ-сигнале, получаемом либо с ТВ-трубки, либо с помощью ПЗС-матрицы.

В современных астрономических телевизионно-измерительных системах при обработке изображений космических объектов (КО) выполняются следующие задачи:

1. Выделение информативных областей изображения – участков ЗН.
2. Измерение яркости  $V(x, y)$  по полю изображения.
3. Определение координат  $(x, y)$  выделенных КО.
4. Формирование моделей выделенных КО.
5. Регистрация сигнальных и модельных файлов в памяти ЭВМ.
6. Формирование в памяти ЭВМ атласа рабочей области ЗН.
7. Отождествление наблюдаемых КО с КО-атласа.
8. Вычисление координат ИСЗ.

Они могут многократно повторяться с разной периодичностью.

Рассмотрим проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем для наблюдений за ИСЗ на примере чёрно-белой полутоновой телевизионно-измерительной системы (ТВИС) с цифровой обработкой изображений (ЦОИЗ) при использовании как вакуумных, так и твердотельных формирователей сигнала изображения.

Создание эффективных прикладных (специализированных) ТВИС требует “оптимального согласования отдельных звеньев и всей системы в целом с изучаемыми объектами и преследуемыми в эксперименте целями” (Гуревич, 1970, с. 5), а также разработки оптимальных методов извлечения требуемой информации путём цифровой обработки получаемых телевизионных изображений (ТВИЗ).

Фундаментальный характер астрономии как науки, т.е. отсутствие непосредственной связи её с производством и малый объём возможного спроса, не позволяет организовать разработку и промышленный выпуск астрономических ТВИС (АТВИС).

Проблема решается инициативной разработкой АТВИС или доработкой серийных ТВИС в АТВИС силами и средствами обсерваторий. “Штучный” характер изделия и слабые информационная, конструкторская, технологическая и т.д. базы не позволяют рассчитывать на их достаточные точностные, функциональные, эксплуатационные и технико-экономические показатели (Горелик, 1980, табл. 1.2, с. 9; Грязин, 1988).

АТВИС относится к классу информационно-измерительных систем (ИИС); последний совместно с классами вычислительных, передачи информации (СПИ), контроля и управления, хранения и поиска информации систем образует научно-техническое направление “информационные системы” (Цапенко, 1985, с. 6).

Общий объект исследования, стимулы развития, принципы построения и т.д. всех классов ИС позволяют рассчитывать на появление аналогий и взаимное проникновение новых терминов, понятий, алгоритмов, технических решений, требований на разработку систем и т.д. между разными классами ИС.

Наблюдения ИСЗ происходят в естественной физической среде, в естественных условиях освещения, неустойчивой проницаемости атмосферы и т.д. Поток излучения от космических объектов (КО), проходя через атмосферу, искажается за счёт случайных процессов рассеяния, поглощения, дифракции, рефракции, турбулентности и т. д. Это не позволяет полностью автоматизировать процессы получения и анализа изображений, поэтому АТВИС будут и далее системами *полуавтоматическими*.

Площадь отражающей поверхности ИСЗ, его блеск, воспринимаемые наблюдателем на Земле в приборной системе координат, являются случайными функциями времени. ИСЗ воспринимается АТВИС в каждом телевизионном кадре как световой импульс, заданный в компактной односвязной области плоскости кадра площадью от нескольких пикселей до нескольких сотен пикселей.

Звёздное небо воспринимается как световое двумерное импульсное параметрическое поле (ДИПП), наблюдаемое на фоне естественных двумерных случайных динамических полей (или совместно с ними) и в присутствии естественных пространственно-распределённых шумов и помех. При этом, изображение звёзд из-за атмосферной турбулентности имеет размер в не-

сколько раз больше теоретического и размытую форму. Уровень естественных шумов в обычных условиях достаточно мал.

С позиций информационного содержания и структуры изображение ЗН относится к локально-информационному типу, в котором в соответствии с семантикой задачи могут быть выделены объекты интерпретации и фоновая часть (Вальтерис и др., 1983, ч.2).

При ЦОИЗ звёзды могут быть как фоновыми помехами, затрудняющими обнаружение и выделение ИСЗ, так и сопутствующими КО, выделение и определение числовых характеристик которых необходимо для определения последних у ИСЗ.

Фоновыми помехами являются звёзды, их ореолы, светящиеся облака и т.д. Изображения фоновых образований могут быть компактными и протяжёнными, односвязными и многосвязными, находиться на заднем плане и на переднем плане (Баканас, 2003), взаимодействие световых потоков фонов и ИСЗ может быть аддитивным и неаддитивным.

Поскольку от типа фона и характера взаимодействия световых потоков ИСЗ и фона зависит способ выделения ИСЗ на изображении, необходимо разработать классификацию фонов с позиций ЦОИЗ и определить для известных алгоритмов выделения объектов область применимости их на классах фонов и предельное качество выделения. Последнее обусловлено тем, что числовые характеристики (модель) КО, наблюдаемого на сложном фоне, выделенного, например, сегментацией методом пороговой обработки, будут зависеть от выбранного порога  $\Delta$ .

В процессе наблюдения за ИСЗ измеряют их фотометрические и координатные характеристики. Поскольку условия текущего наблюдения *не воспроизводимы* и существуют в ограниченном интервале времени, возникает проблема *достоверности и надёжности* результатов измерений АТВИС.

По аналогии со СПИ (Смирнов, 1979; с. 10–11; Красильников, 1976; Красильников, 1986; Зубов, Глориозов, 1989) для АТВИС необходимо наполнить своим содержанием понятия “качество изображения”, “качество измерения на изображении”, “качество АТВИС”. Качество АТВИС будет определяться качеством измерения на изображениях и качеством интересующих потребителя показателей (функциональных, эксплуатационных, технико-экономических) системы.

Качество измерения на изображениях принято определять СКО-измерения (некоторой величины, например сигнала или яркости (Красильников, 1976, с. 4)). Такой критерий качества пригоден для ТВИС, измеряющих одну величину. В АТВИС измеряются три величины: линейные расстояния между КО, площади КО, величины сигналов пикселей КО.

Возникают методологические трудности с обоснованием интегрального критерия качества измерений на изображении и выбора метрик для каждой измеряемой величины, а также методов их измерения. Так, для измерения расстояния между точками в ЦОИЗ наиболее часто используются (Прэтт, 1972, с. 548):

евклидово расстояние

$$d_E = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2};$$

абсолютное расстояние

$$d_A = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|;$$

максимальное расстояние

$$d_M = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|).$$

Но не определено *как* измерить расстояние между объектами конечных размеров. Применительно к КО наиболее достоверный результат даст расстояние между виртуальными точками на их поверхностях – центроидами оптического излучения.

Площадь КО проще всего определить количеством покрываемых им пикселей раstra. Однако даже для пикселей квадратной формы и бинарного изображения простейших геометрических фигур (круг, квадрат, треугольник) погрешности измерения площади зависят от формы, размеров, ориентации объектов (Писаревский и др., 1988, с. 274), положения объектов относи-

тельно дискретизационной решётки, а при наличии неравномерного фона, и от принятого способа выделения объектов (например, локального порога сегментации  $\Delta$ ). При вычислении площади (например, треугольника по известной формуле) результат будет определяться способом вычисления расстояний между пикселями (“объектами конечных размеров”). Так, электронное изображение круга равномерной яркости диаметром, равным стороне квадратного пиксела растра, при локальном пороге  $\Delta = 0.25 U_c$ , где  $U_c$  – уровень сигнала пиксела, соответствующий яркости круга, будет иметь площадь от 1 до 4-х пикселей, в зависимости от положения центра круга в пределах пиксела; на конференции ICASSP’89 Yan Yang показал, что площадь треугольника равномерной яркости, полученного делением пополам квадрата  $4 \times 4$ , вершины которого совпадают с узлами растра, при локальном пороге  $\Delta = 0.5 U_c$  равна: а) 10 пикселям – при непосредственном подсчёте пикселей площади; б) 8 пикселям – при вычислении площади по известной формуле; в) 4,5 пикселям – при определении расстояния между крайними пикселями катета в 3 пиксела и вычислении по формуле.

Качество изображений в вещательном телевидении определяется на основании статистики субъективных визуальных оценок группой потребителей заметности искажений на изображении (Кривошеев, 1989, ч. II).

В связи с отсутствием единого интегрального критерия качества ТВ-изображения, однозначно связанного с субъективным восприятием изображения пользователем, качество изображений оценивают совокупностью частных критериев, представляющих собой параметры ТВ-изображения. Существует тесная связь между параметрами ТВ-изображения и его зрительным восприятием (что и используется при визуальной оценке ТВ-изображения по испытательным таблицам (Хесин, 1969, с. 5–6)).

Основные параметры ТВ-изображения принято разделять на световые (оптические) и растровые (Кривошеев, 1989). К световым параметрам чёрно-белого изображения относятся яркость, контраст, количество воспроизводимых градаций яркости, чёткость изображения, нарушение распределения яркости изображения, вызванные искажениями и помехами. Световые параметры изображения определяются характеристиками всех звеньев ТВ-системы (Хесин, 1969, с. 6).

К растровым параметрам относятся: размеры, формат изображения и геометрическое подобие ТВ-изображения оригиналу (нелинейные и геометрические искажения растра), степень совмещения растров в передающих и приёмных устройствах (преобразователях свет-сигнал (ПСС) и сигнал-свет) (Кривошеев, 1989, Хесин, 1969)). Растровые параметры ТВ-изображения определяются только передающими и приёмными трубками, их развёртывающими и отклоняющими системами (Хесин, 1969, с. 6).

В твердотельных приборах с зарядовой связью (ПЗС), которые с 80-х годов стали широко применяться в научно-прикладных телевизионных системах, растр формируется геометрической топологией ПЗС и поэтому является жёстким, что исключает его искажения и нестабильность во времени (Хромов, 1986, с.15).

В твердотельных ПЗС появляются специфические помехи как детерминированные (коммутационные – наводки от импульсных напряжений на электродах матричных ПЗС, геометрический шум – неоднородности темнового тока и чувствительности элементов матрицы), так и флуктуационные (представляющие собой совокупность шумов – фотонных, темнового тока фонового заряда, минимально необходимого для эффективного переноса заряда (Хромов и др., 1986, с.18)). Кроме того, из-за неэффективности переноса заряда в ПЗС происходит уменьшение и расплывание зарядового пакета при его переносе, причём, эти эффекты возрастают с ростом числа переносов (Пресс, 1981, с. 25), т.е. с возрастанием числа элементов  $n \times m$  ПЗС-матрицы, где  $n$  – число строк,  $m$  – число столбцов матрицы.

Оценка качества изображения в АТВИС должна производиться с позиций её функционального назначения, т.е. должна быть объективной и может охватывать не всё поле изображения, а только его рабочий фрагмент, содержащий локальные окрестности выделяемых КО.

Критерием качества изображения, очевидно, должна служить суммарная сложность алгоритмов ЦОИЗ (вычислительная или временная) (Юдин Д., Юдин А., 1985), использованных для выделения и определения числовых характеристик (моделей) ИСЗ и опорных звёзд с заданной достоверностью и надёжностью.

В АТВИС необходимо решать задачи восстановления изображений, т.е. повышения качества изображения апостериорным увеличением разрешения, устранением дефектов аппаратуры и т.д.

Задача восстановления изображения в большинстве случаев сводится к решению линейного интегрального уравнения

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)h(\xi, \eta, x, y)dx dy + n(\xi, \eta),$$

где  $f(x, y)$  – входное,

$g(\xi, \eta)$  – выходное изображение,

$h(\xi, \eta, x, y)$  – весовая функция системы, определяющая все её свойства,

$n(\xi, \eta)$  – случайный аддитивный шум,

т. е. к определению функции  $f(x, y)$  по зашумленным значениям  $g(\xi, \eta)$ . Для нелинейных систем формирования изображений и в случаях неаддитивного шума приведенное уравнение служит некоторым (удобным для анализа) приближением (Василенко, Тараторин, 1986, с. 16). Задачи восстановления изображения, как правило, оказываются некорректными (Василенко, Тараторин, 1986, с. 34), за счёт неустойчивости решения (Василенко, Тараторин, 1986, с. 45), поэтому точное решение получить невозможно. Приближённое решение можно получить методом регуляризации Филлипса-Тихонова и другими (Тихонов, Арсенин, 1979; Теребиж, 2005).

Опыт разработки систем технического зрения для роботов показывает, что алгоритмы ЦОИЗ (например, выделения объектов) эффективны только на тех классах изображений, для которых они разрабатывались (Путятин, Аверин, 1990, с. 255).

Специфика изображений ИСЗ и КО, специфика состава и сложный характер фонов, специфика условий освещения и наблюдения не всегда позволяют с достаточной эффективностью использовать в АТВИС применяемые в ТВ-анализаторах изображения алгоритмы выделения объектов. Поэтому необходима разработка специальных алгоритмов выделения ИСЗ и КО для АТВИС, ориентированных на получение их максимально достоверных и надёжных числовых характеристик.

Внедрение преобразователей свет-сигнал на ПЗС в АТВИС даёт возможность регулировать частоту кадров, число строк  $n$  и число элементов в строке  $m$ , время накопления и форму апертуры.

Эти параметры могут регулироваться управляющими сигналами, формируемыми камерным микропроцессором на основе анализа и оценки статистических характеристик сигналов изображения (Хромов и др., 1986, с. 16).

Таким образом, АТВИС становится адаптивной. Однако новые функциональные возможности порождают и новые задачи; последние объясняются новой технологией формирования сигнала изображения:

1. необходимость компенсировать детерминированную помеху;
2. необходимость обеспечить оптимальную чёткость;
3. необходимость разработать новые алгоритмы выделения и определения числовых характеристик КО;
4. необходимость обеспечить оперативное управление параметрами ТВ-системы (Хромов и др., 1986, с. 17–18).

5. необходимость устранить снижение яркости и чёткости вдоль строки в процессе сканирования–переноса зарядовых пакетов;
6. необходимость разработать алгоритмы адаптации ПЗС.

ПЗС имеет несколько уровней адаптации с разными временными интервалами – параметрический, структурный, структурно-параметрический и алгоритмический (Пустынский и др., 1990, с. 29–31). Последний связан с адаптацией алгоритмов обработки изображений и приспособлением их к задачам, решаемым ПЗС, а также, выбором того алгоритма, который работает наилучшим образом по заданному критерию (Пустынский и др., 1990, с. 30). Однако ПЗС не имеют единственного критерия из-за сложных условий работы и большого числа параметров.

Выбор конфигурации АТВИС будет определяться кругом решаемых задач, в том числе из перечня 1-8 приведенного в начале статьи, условиями наблюдения и ресурсами времени на выдачу результата.

## Литература

- Агапов Е.С., Анисимов В.Ф., Можжерин В.М., Никонов В.Б., Пергамент В.И., Прокофьева В.В., Синенко С. М. // Космические исследования. 1965. Т.3. N 4. С. 630.
- Абраменко А.Н., Агапов Е.С., Анисимов В.Ф., Ефимов Ю.С, Никонов В.Б., Прокофьева В.В., Синенко С.М. // Докл. АН СССР. 1965. Т. 161. № 6. С.1999.
- Баканас В.В. // Сб. “Околоземная астрономия. 2003” Труды конф., Т–2. Терскол, 8–13 сент. 2003 г. Изд. Ин-т Астрономии РАН. С-П. 2003. С. 276–283.
- Вальтерис С.Э. и др. // Автоматизированная обработка изображений. Тр. АН Литовской ССР, 1983. Т. 3 (136). ч. I. Специализированные системы обработки изображений. С. 97-104; ч. II. Основные концепции теории обработки изображений. С. 105–110.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М. // Восстановление изображений. М.Р и С. 1986. 304 с.
- Горелик С.Л. и др. // Телевизионные измерительные системы. М. “Связь”. 1980. 168 с.
- Грязин Г.Н. // Оптико–электронные системы для обзора пространства: системы телевидения. Изд. Л. Машиностроение. Л.О. 1988. 224 с.
- Гуревич С.Б. // Теория и расчёт не вещательных систем телевидения. Л. “Энергия” ЛО, 1970. 236с.
- Зубов Ю.Б., Глориозов Г.П. // Передача изображений. 2-е изд. М. Радио и Связь, 1989. 336 с.
- Красильников Н.Н. // Статистическая теория передачи изображений. М. Связь, 1976. 184 с.
- Красильников Н.Н. // Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и её приложения. М. Радио и Связь. 1986. 248 с.
- Кривошеев М.И. // Основы телевизионных измерений. 3-е изд. М. Радио и Связь. 1989. 608 с.
- Писаревский А.Н и др. // Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение). Л. Машиностроение. Л.О. 1988. 424 с.
- Пресс Ф. П. // Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М. Радио и Связь. 1981. 136с.
- Прэтт У. // Цифровая обработка изображений. М. Мир. 1982. Кн. 2. 480 с.
- Пустынский И. и др. // Адаптивные фотоэлектрические преобразователи с микропроцессорами Л. Энергоатомиздат. 1990. 80 с.
- Путятин Е.П., Аверин С.И. // Обработка изображений в робототехнике. М. Машиностроение. 1990. 320 с.
- Смирнов А.Я. // Математические модели передачи изображений. М. Связь. 1979. 96 с.
- Теребич В.Ю. // Введение в статистическую теорию обратных задач. М. Физматлит. 2005. 375 с.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. // Методы решения некорректных задач. М. Наука. 1979. 286 с.
- Хесин А.Я. // Автоматический анализ качества телевизионного изображения. Рига. Зинатне. 1969. 164 с.

Хромов Л.И. и др. // Твердотельное телевидение, телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. М. Радио и Связь. 1986. 184с.

Цапенко М.П. // Измерительные информационные системы. Структуры и алгоритмы, системно-техническое проектирование. 2-е изд. М. Энергоатомиздат. 1985. 440 с.

Юдин Д.Б., Юдин А.Д. // Число и мысль. В. 8. Математики измеряют сложность. М. Знание. 1985. 192с.