

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. С. КИРИЧУК, А. Л. РЕЗНИК



В. С. Киричук



А. Л. Резник

Что же такое цифровая обработка сигналов и изображений? Чтобы ответить на этот вопрос, можно, конечно (кстати, так и поступают серьезные ученые, к числу которых авторы настоящей главы себя однозначно относят), провести логически стройное и аксиоматически безупречное построение теоретического фундамента этой действительно многогранной и быстро развивающейся области знаний. Но поскольку целью коллективного издания является освещение 50-летней истории Института и рассказ о некоторых научных чудесах, невольными авторами или активными свидетелями которых оказались сотрудники различных подразделений Института, то слишком академичное повествование об объектах и субъектах, предметах и методах любого из разделов науки, объединяемых общим брендом “Автоматика и электрометрия”, представляется достаточно скучным и не очень интересным.

Сначала мы приведем два простых примера, которые покажут, какие чудеса возможны при

цифровой обработке, а потом расскажем о сотрудниках и лабораториях Института, которые в течение 50 лет иногда успешно, а иногда и не очень (в науке, как и в спорте, всегда побеждать невозможно) предпринимают попытки расширить этот список чудес.

Первый пример касается обработки изображений. Еще раз оговоримся, что речь будет идти именно о *цифровых* методах обработки.

Перед вами (рис. 1) пример изображения, которое нужно перевести в цифровой вид и ввести в память компьютера (обратите внимание на хорошее качество изображения). Но в реальной жизни процесс регистрации и ввода изображений не бывает идеальным и сопровождается различными шумами, например, внутренними шумами регистрирующего тракта. Уровень шума в регистрирующем приборе можно заранее изучить, исследовать, калибровать, но его нельзя ни снизить, ни тем более устранить, так как он носит случайный характер.

Обратимся к другому примеру (рис. 2) того же самого изображения, зафиксированного на фоне небольшого шума. Как видим, контрастные детали изображения (в частности, контуры) прослеживаются, а слабоконтрастные сегменты размыты шумом.

А вот (рис. 3) то же самое изображение, когда уровень шума многократно превосходит амплитуду изображения (как видим, изображение абсолютно подавлено шумом).

Возникает вопрос: можно ли улучшить эти изображения или они (особенно последнее) подлежат утилизации, так как вся информация



Рис. 1 Исходное изображение



Рис. 2 Изображение, искаженное небольшим шумом

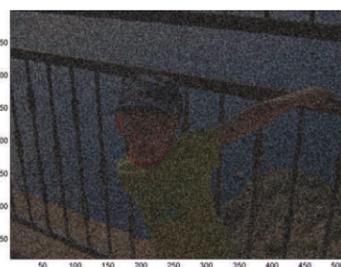


Рис. 3 Изображение, искаженное сильным шумом



Рис. 4 Результат восстановления по 50 сильно зашумленным изображениям



Рис. 5 Результат восстановления по 5000 сильно зашумленным изображениям

либо искажена, либо уничтожена шумом?

Ответ на этот вопрос таков: если зашумленное изображение существует в единственном экземпляре, то дела плохи, а если имеется возможность с помощью того же самого регистрирующего прибора (пусть и не очень качественного) получить несколько изображений одной и той же сцены, то улучшение не только возможно, но более того - возможно восстановить исходное изображение с *любой* точностью при *любом* уровне шума - просто потребуется большое число зашумленных изображений.

На рис. 4 и рис. 5 приведены примеры изображений, восстановленных по 50 и 5000 изображений с таким же уровнем шума, как и на рис. 3. (Видно, что чем больше зашумленных изображений имеется, тем точнее восстанавливается исходное изображение.)

Итак, произошло удивительное - имея изображения такого качества, как показано на рис. 3, нам удалось получить изображение, практически не отличающееся от оригинала (см. рис. 1). А если учесть, что процесс обработки при этом элементарно прост (нужно сложить все зашумленные цифровые изображения, затем результат поделить на число изображений, а от результата отнять математическое ожидание шума и все), то можно представить, на какие чудеса способна цифровая обработка при использовании более изощренных алгоритмов.

Второй пример относится к цифровой обработке сигналов. Имеется аналоговый сигнал постоянного уровня, т.е. амплитуда сигнала не меняется со временем. Требуется измерить амплитуду сигнала. Сложность заключается в том, что шкала прибора, с помощью которого производятся измерения, слишком “груба”, так что шаг квантования не позволяет проводить измерения с нужной точностью. Возникает вопрос, можно ли с помощью такого прибора (а другого у нас нет) провести измерение сигнала с требуемой (т.е. более высокой) точностью? На первый взгляд, грубая “линейка” не может дать результат точнее своего минимального деления. На самом деле - можно. Рассмотрим один из возможных способов. Добавим к аналоговому сигналу детерминированную составляющую, например, синусоиду, причем частота и фаза синусоиды не имеют значения, важно лишь, чтобы ее амплитуда была больше кванта нашего измерительного прибора. Теперь будем измерять не сам исходный сигнал, а его сумму с синусоидой. Делать это будем в случайные моменты времени. Измерений проведем достаточно много. Если бы не было постоянной “подставки” в виде нашего сигнала, амплитуду которого мы и хотим измерить, то мы

бы знали частоту, с которой значения синусоиды попадают в тот или иной квант приборной шкалы. “Подставка” же сбивает эту частоту, делая более частым попадание суммарного сигнала в более высокий квант. По этому отклонению можно вычислить величину этой подставки, причем с любой точностью, если провести достаточное число измерений. Для этого нужно лишь корректно обработать результаты измерений. Итак, с помощью “линейки” с аршинным делением мы можем проводить измерения с микронной точностью. Вот на что способна цифровая обработка сигналов.

А теперь, как и обещали, вернемся к истории развития методов обработки сигналов и изображений в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН.

Активный научный и практический интерес к проблемам обработки изображений возник в связи с открывшимися возможностями регистрации поверхности Земли с космических носителей. Появившиеся в 70-е годы космические информационные комплексы обеспечили регистрацию на фотоносителях различных явлений и событий, происходящих в атмосфере, на поверхности Земли и океана, и сразу были востребованы для решения научных и прикладных задач в интересах обороны страны, метеорологии, геологии, картографии, геофизики, сельского хозяйства, транспорта, геофизики, охраны окружающей среды и т.д. Однако при реальном анализе космических снимков возникало противоречие между колоссальным объемом поступающих снимков и медленными ручными методами их анализа. Для создания автоматизированных систем анализа, способных в принципе обеспечить тематическую обработку, потребовались совершенно новые комплекты и системы, такие как: ввод изображений с фотоносителей, тематическая цифровая обработка изображений, оперативное отображение поступивших изображений и результатов их обработки, архивирование и комплексирование.

В Институте в 70-е годы и начались активные работы по созданию всех необходимых компонентов таких комплексов автоматизированной обработки изображений. Были созданы:

- подсистема прецизионного ввода в ЭВМ фотоизображений «Зенит-2». Авторским коллективом (С.Т. Васьков, Б.М. Пушной, Чейдо Г.П., Л.В. Бурый, А.К. Поташников, А.М. Щербаченко, Ю.В. Обидин, С.Е. Ткач и др.) были получены уникальные характеристики, обеспечивающие точность позиционирования пятна считывания ~0,3 мкм при размере фотоносителя 400x400 мм и времени считывания



Рис. 6 "Зенит-2".



Рис. 7 "Зенит-К".

~10 мкс. При создании «Зенит-2» имел лучшие характеристики в мире (рис. 6).

- устройство «Ромб», обеспечивающее ввод в ЭВМ координат и оптической плотности элементов изображения. Разработчиками устройства, возглавляемыми В.П. Бессмельцевым, обеспечено считывание с управляемым диаметром пятна 25, 50, 100 мкм с высоким темпом регистрации.

- системы оперативного отображения на основе TV-мониторов, разработанные коллективом под руководством Ю.Н. Золотухина.

- подсистема обработки микроизображений «Зенит-К», созданная под руководством В.П. Косых, обеспечившая возможность исследовать структуры с характерными размерами в единицы микрон.

Поводом для разработки системы анализа

микроизображений «Зенит-К» явилась начатые в 1975 г. по инициативе Л.А. Андрианова исследования по выявлению в клеточных популяциях аномальных клеток, отличающихся от основной массы клеток по своим фотометрическим и морфологическим характеристикам. Первые эксперименты по дифференциальному морфологическому анализу клеточных множеств, выполненные в 1976 г. на макетном образце комплекса «Зенит», показали принципиальную возможность использования этой техники, однако оказалось, что разрешающая способность и спектральные характеристики сканирующего узла «Зенита» не обеспечивают необходимой детальности при получении изображений клеток. Поэтому для анализа микроизображений был создан сканирующий микроденситометр «Зенит-К», в основу которого было положено аналогичное примененному в первом «Зените» сканирующее устройство, но с микроскопной оптикой, более широким спектральным диапазоном и более простой (но тем не менее достаточно точной) системой механического перемещения препаратов. Создавался «Зенит-К» в тесном сотрудничестве с СКБ НП СО АН СССР (А.К. Поташников, Н.Ф. Трубицын, С.Н. Третьякова, Н.К. Бенинг, Э.Л. Емельянов, Л.Б. Касторский), основным разработчиком прецизионной механики был В.М. Крылов.

Общий вид системы «Зенит-К» с Электроникой-60 в качестве управляющей и обрабатывающей ЭВМ приведен на рис. 7.

В совокупности с мини-ЭВМ (сначала ЕС-1010, а затем «Электроника-60») «Зенит-К» представлял собой систему ввода и обработки микроизображений с весьма высокими эксплуатационными характеристиками (дискретность сканирования - 0,25 мкм, диаметр сканирующего пятна - 1,2 мкм, точность позиционирования механической системы перемещения ~5 мкм, скорость считывания изображений - до 10^5 точек/с, диапазон измеряемых оптических плотностей - 0-2Б).

Эти характеристики позволили выполнить ряд уникальных для того времени исследований. В частности, совместно с Институтом физики СО АН СССР (г. Красноярск) и Красноярским государственным медицинским институтом были осуществлены исследования возрастной динамики эритроцитарных популяций человека. С использованием системы «Зенит-К» проанализировано более 1000 мазков крови, полученных у представителей различных возрастных групп, у каждого из них измерялись размеры и распределение оптической плотности более 500 эритроцитов. Имеющиеся данные позволили получить статистически достоверные выводы об изменениях в составе эритроцитарных популяций в

процессе созревания кроветворной системы человека. Роль Института заключалась не только в обеспечении исследований уникальной инструментальной базой, но и в создании методов и средств анализа достаточно сложных изображений, содержащих конгломераты клеток, из которых необходимо было выделять отдельные, неповрежденные, с неискаженной формой клетки, и кроме того, требовалась методика статистического анализа неоднородных выборок (В.П. Косых, А.И. Пустовских).

Другим примером применения системы «Зенит-К» может быть работа по восстановлению структуры биологических микрообъектов по их электронным микрофотографиям, полученным при слабых электронных дозах в присутствии контрастирующего вещества. С этой задачей в ИАиЭ СО АН СССР обратился в 1980 г. заведующий лабораторией электронной микроскопии Института кристаллографии АН СССР чл.-кор. АН СССР Н.А. Киселев. Для таких микрофотографий характерно наличие сильных шумов, маскирующих структуру изучаемого объекта. Зато на одной микрофотографии можно зарегистрировать множество объектов исследования, обладающих идентичной структурой. Задача заключалась в создании методики подавления шума путем совмещения и накопления множества изображений микрообъектов. Разработанный в лаборатории цифровых методов обработки изображений подход (В.С. Киричук, В.П. Косых, А.И. Пустовских) обеспечил статистически оптимальное совмещение микроизображений и позволил успешно решить задачу выявления структуры изучаемых объектов. На рис. 8 показаны фрагмент исходной микрофотографии, содержащий квазипериодический монокристаллический слой исследуемых частиц, и результат ее обработки.

Продолжением работ по анализу изображений биологических микроструктур, начатых на «Зените-К», явилось создание в 1995 г. (Г.И. Громилин, В.П. Косых) по заказу Новосибирского муниципального центра планирования семьи аппаратно-программного комплекса для построения и анализа кариограмм представленных стандартным образом изображений хромосомных наборов пациентов. Комплекс, состоящий из биологического микроскопа, видеокамеры, персонального компьютера и специализированного редактора изображений, позволяет врачам-генетикам строить из микроизображений метафазных пластинок кариограммы и анализировать их с использованием справочника, содержащего стандартные изображения хромосом. На рис. 9а показано микроизображение метафазной пластинки, на рис. 9б - кариограмма, построенная врачом с помощью редактора изображений.

В 1982 г. все созданные подсистемы были объединены в единый комплекс во главе с базовой ЭВМ ЕС-1045 с помощью унифицированной магистральной системы обмена, созданной коллективом под руководством Ю.Н. Золотухина.

Уникальные возможности комплекса позволили решить ряд задач по обработке изображений в содружестве со многими научными и производственными коллективами, а именно: анализ изображений лесных массивов, классификация ледовых поверхностей, обработка астронегативов, восстановление слабоконтрастных электронно-микро-

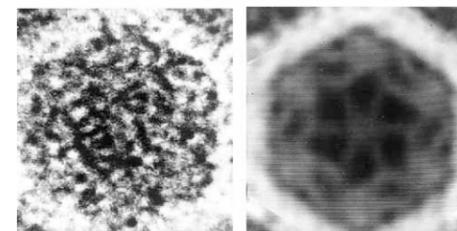
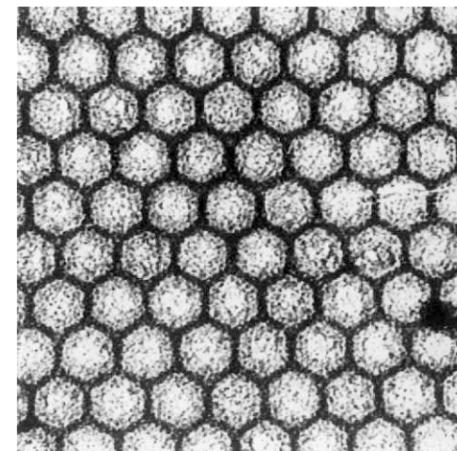


Рис. 8 Восстановление структуры объектов по электронным микрофотографиям. Вверху фрагмент исходной микрофотографии, внизу: слева одно из изображений объекта исследования, справа восстановленное изображение.

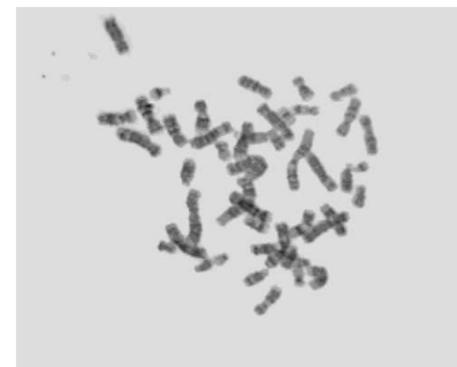


Рис. 9а

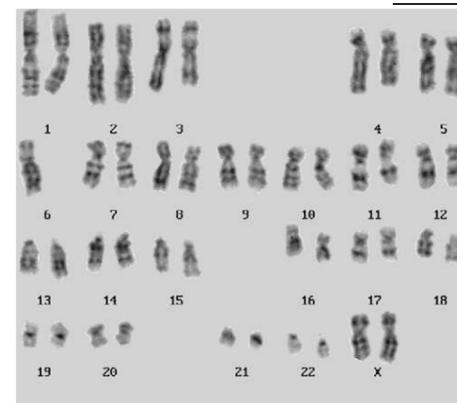


Рис. 9б

Автоматизированное построение кариограммы.



С. А. Попов



Г. И. Громилин



В. А. Иванов



В. П. Косых

скопических изображений, анализ биологических препаратов, обработка космических изображений и т.д. Разработка методов, алгоритмов и программных средств осуществлялась в тесном взаимодействии коллективов, возглавляемых В.С. Киричуком, В.М. Ефимовым и А.Л. Резником.

Новой значимой работой, выполняемой на комплексе «Зенит-2», явилась совместная обработка спектрозональных снимков, полученных из космоса камерой МКФ-6, которая регистрировала изображение участка земной поверхности в шести спектральных диапазонах. Потребовались не только доработка комплекса «Зенит-2», создание специальных кассет для размещения снимков, но и создание алгоритмов и специализированного программного обеспечения. Был разработан комплекс алгоритмов и программ, обеспечивающий проведение основных базовых операций над многоспектральными изображениями: поиск заданных объектов; определение координат объектов и их геометрических характеристик; отслеживание границ и анализ формы и структуры областей; спектральный анализ, сегментация и классификация изображений; совмещение изображений с целью накопления или синтеза цветных изображений; линейная или нелинейная фильтрация и т.д.

Задача обработки астронегативов, решаемая совместно с сотрудниками Главной астрономической обсерватории АН СССР, явилась серьезной проверкой возможностей не только коллектива лаборатории, но и комплекса «Зенит-2». Многовековая культура измерений, присущая ученым-астрономам, и требования достижения максимальной точности измерения координат звезд заставили провести



Слева направо: С.А. Попов, В.С. Киричук, В.П. Косых, В.А. Иванов, Г.И. Громилин.



Слева направо: В.М. Ефимов, А. Соловьев, А.Л. Резник, А.В. Торгов, Е.А. Кузнецова, М.Л. Кожевников.



М. Л. Кожевников



В. М. Ефимов



Е. А. Кузнецова



А. В. Торгов

тщательный анализ всех мыслимых источников погрешностей комплекса «Зенит-2» («кривизна» направляющих, искажение растра, «дрожание» стола и т.д.) и разработать оригинальные алгоритмы их компенсации. Также были созданы специализированные алгоритмы обработки информации, необходимое программное обеспечение, реализующее автоматическую обработку астронегативов. Коллективом разработчиков (В.А. Иванов, Н.С. Яковенко, В.П. Косых и др.) в кратчайшие сроки был выполнен весь необходимый объем работ и в результате обработки сотен астронегативов были вычислены параллаксы заданного множества звезд, при этом погрешность оценивания координат звезд составила $\sigma=0,47$ мкм, что более чем в 2 раза улучшило достигнутые ранее результаты. Причем эти данные прошли тщательную многократную проверку учеными-астрономами. В рамках этой совместной работы были получены уникальные данные по определению структуры поля вертикальных скоростей грануляции и вертикальных колебаний хромосферы по результатам обработки спектров Солнца.

Совместно с Институтом леса и древесины СО АН СССР велись работы по анализу аэрофотоснимков леса. Были созданы методики, алгоритмическое и программное обеспечение обработки фотоснимков леса (В.А. Иванов, Г.И. Перетягин, Г.А. Иванченко). Программная реализация осуществлена на комплексе обработки изображений на базе фотометрического автомата «Зенит-2» под управлением ЭВМ ЕС-1010. Решен ряд задач морфологии леса, показана возможность автоматизированной обработки черно-белых и цветных аэроизображений. Алгоритмы и программы применимы для автоматизированного дешифрирования снимков леса по ряду таксационных показателей. Использование созданного математического

обеспечения позволило сократить объем наземных измерений, повысить точность и исключить субъективные факторы дешифрирования. Ряд полученных результатов внедрен в ИЛИД СО АН СССР. Созданные алгоритмические и программные средства позволили:

- проводить первичный статистический анализ таксационных параметров древостоев;
- осуществлять сегментацию лесных участков на выделы по различным наборам признаков;
- выделять и вычислять координаты крон и оценивать их площадь;
- анализировать статистические свойства размещений деревьев и определять их тип;
- классифицировать выделы по продуктивности;
- определять степень повреждения лесных участков вредителями (рис. 10);
- разделять деревья по классам роста;
- осуществлять разделение деревьев по породам и анализировать их взаимодействие;
- осуществлять таксацию вырубков (рис. 11);
- создавать модели развития разновозрастных сосновых древостоев.

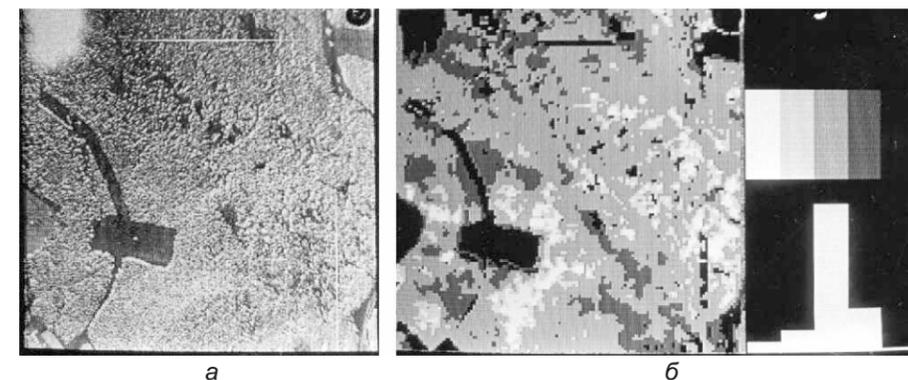


Рис. 10 Исходное изображение (а), результат сегментации леса по степени повреждения вредителями (б).

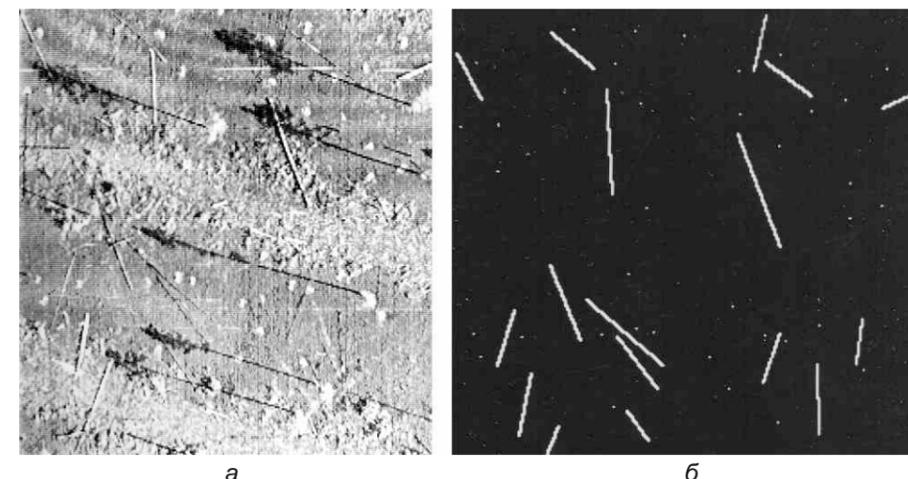


Рис. 11 Исходное изображение (а), выделенные на изображении не вывезенные деревья (б).

В сотрудничестве с Западно-Сибирским НИГНИ СО АН СССР были разработаны методики, на основе которых решены задачи алгоритмического обеспечения для совместного анализа геолого-геофизических данных и изображений (В.А. Иванов, Г.А. Иванченко). Созданное программное обеспечение позволило:

- на базе графопостроителя-кодировщика "Планшет" (разработчики С.А. Кузнецов, Н.Н. Карлсон) кодировать карты, содержащие геолого-геофизические данные;
- совмещать карты и изображения с топоосновой;
- преобразовывать геолого-геофизических данные в цифровую форму, аналогичную изображениям;
- проводить анализ и сравнение карт, осуществлять многомерный статистический анализ, проводить сегментацию территории для выделения участков, «подозрительных» на содержание углеводородов (рис. 12).

В дальнейшем крайне интенсивное развитие вычислительной техники, элементной базы и систем восприятия изображений изменило приоритеты в создании системы обработки изображений, что в первую очередь коснулось систем ввода и отображения изображений. Системы ввода стали строиться на многоэлементных матричных и линейных сканирующих датчиках видимого и ИК-диапазонов, а системы отображения, как правило, оказались встроены непосредственно в вычислительный процесс.

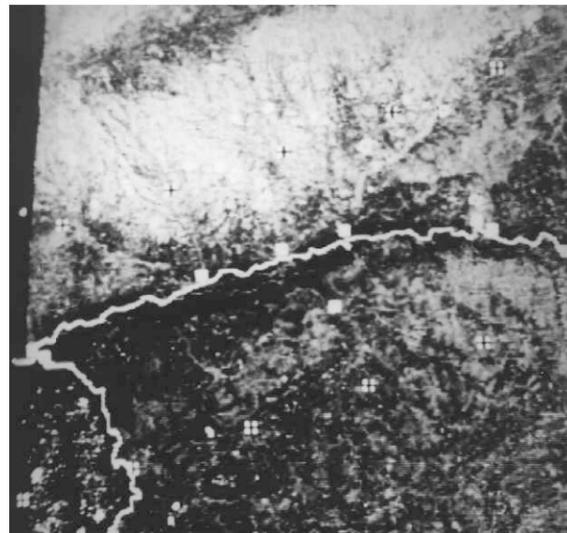
Увеличение на несколько порядков вычислительных возможностей обеспечило постановку новых задач обработки изображений, охватывающих существенно более широкий спектр проблем от охранных систем, систем анализа микрообъектов до анализа последовательностей космических изображений.

Так, в последнее время были созданы алгоритмическо-программные комплексы анализа последовательности ИК-изображений, поступающих с космических носителей, с целью поиска динамических высокоподвижных объектов. При этом создана вычислительная среда, обеспечивающая обработку поступающей информации в реальном времени.

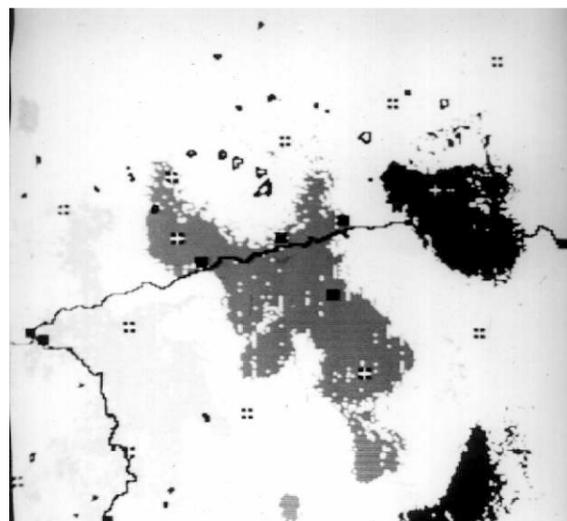
При наблюдении заданного района поверхности Земли с нескольких космических аппаратов были созданы программно-алгоритмические комплексы, обеспечивающие реконструкцию пространственной структуры и оценивание параметров движения трехмерных динамических сцен. Эти системы позволяют

проводить анализ и предсказывать динамику развития облачных образований, циклонов (рис.13), извержения вулканов (рис. 14), лесных и промышленных пожаров и т.д.

Космические информационные комплексы относятся к системам, обеспечивающим непрерывные наблюдения заданных районов поверхности Земли и решающим задачи оценки масштабов и прогноза развития чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и военного характера. На современном этапе развития такие задачи, к сожалению, становятся все более актуальными.

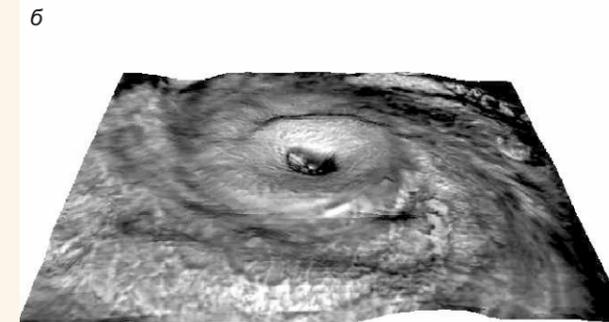
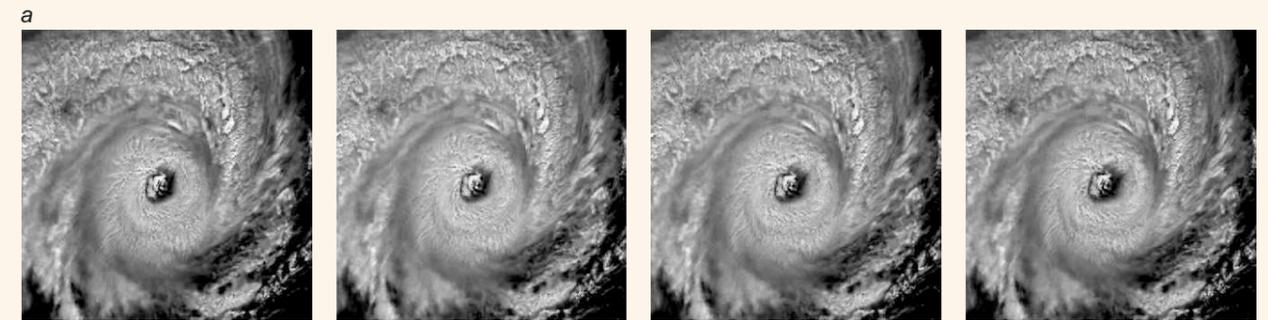


а

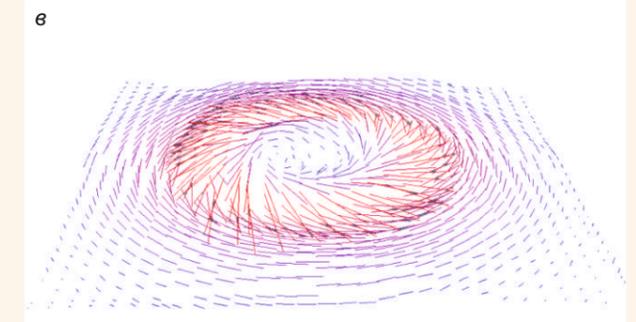


б

Рис. 12 Исходное изображение с топоосновой (а), результат сегментации (темные области соответствуют участкам, «подозрительным» на содержание углеводородов) (б).



б



в

Рис. 13 Облачный покров в зоне тропического урагана: а - последовательность космических снимков (модель); б - рельеф верхней кромки облаков; в - поле скоростей.

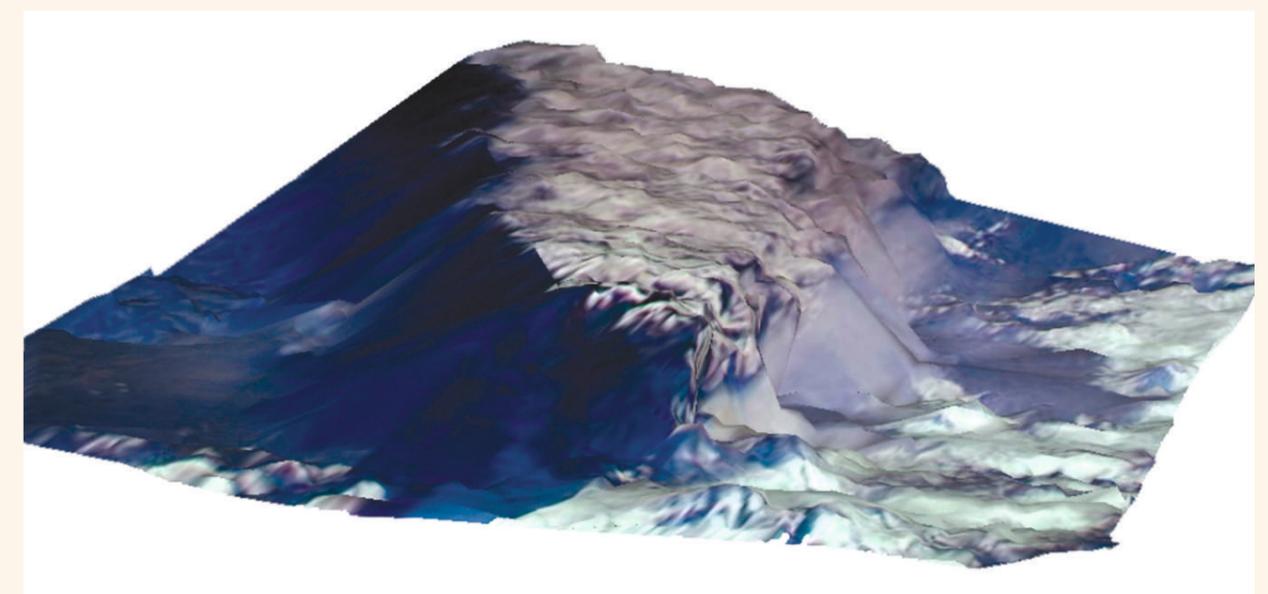


Рис. 14 Восстановленная по двум космическим снимкам структура верхней кромки вулканического шлейфа (извержение вулкана Ключевская сопка).