

Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA)

А.А. Златопольский

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: aazlat@mail.ru*

Производственные технологии анализа изображения, опираются на яркостные и спектральные характеристики, и нет такой же практики измерения и использования иных объективных характеристик. Предлагается использовать ориентационные характеристики, которые отражают присутствие тех или иных направлений в рисунке разных областей изображения. Конкретно рассматривается расчет по технологии LESSA, в которой есть также возможность выявлять протяженные линеаменты. Цель статьи - обратить внимание на то, как анализировать результаты расчета, как к ним относится, что именно объективно, как сказываются на результатах выбор исходных данных и параметров расчета. Предложенный подход проиллюстрирован на изображении и ЦМР района Калуги.

Введение

Распространенные технологии анализа изображения опираются непосредственно на яркостные, спектральные свойства, и нет такой же практики измерения и использования других столь же объективных, но менее очевидных характеристик, которые предварительно нужно измерить, а для интерактивного анализа и визуализировать.

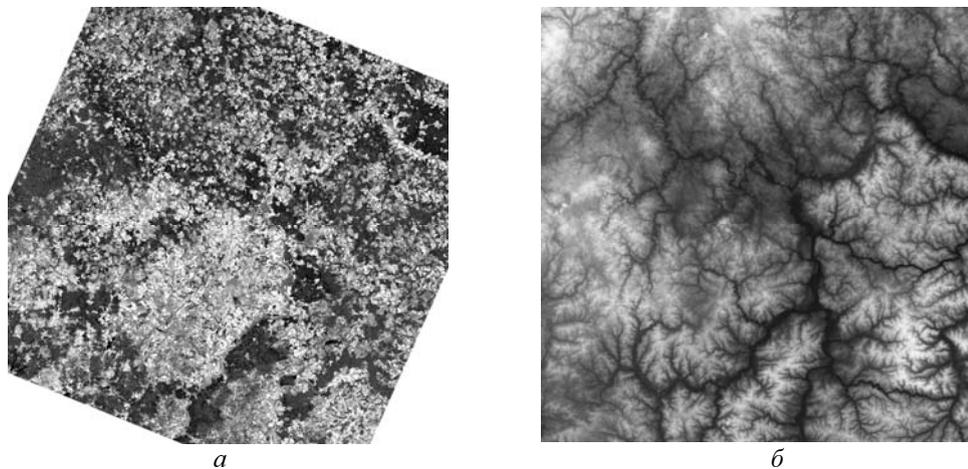
Рассмотрим текстурные, ориентационные характеристики, которые показывают, какие ориентации присутствуют в рисунке данной области изображения. Возможны разные технологии измерения этих характеристик, например, по спектру пространственных частот, по направлению градиентов яркости, по направлению линейных элементов (линий, границ). Практическое сравнение этих подходов [1] показало, что, в целом, результаты измерения сходны, но последний способ более чувствителен к локальным особенностям. Кроме того, в этом случае явно видно, какими особенностями рисунка обусловлены результаты. Эта технология, названная LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis), позволяет в едином ключе анализировать ориентационные характеристики и изображения и данных другого типа таких, как схемы и ЦМР.

Внешнее сходство с анализом фотолинеаментов, получаемых при ручном дешифрировании, часто мешает адекватно оценивать результаты таких измерений, безосновательно провоцирует непосредственно переносить на результаты LESSA прежние методики. Иногда такой перенос возможен, но в этом необходимо убедиться. Статья посвящена не подробному изложению алгоритма, не показу всех возможностей программы и не демонстрации решения конкретной прикладной задачи – все это уже есть в публикациях (например, в перечисленных на сайте www.lineament.ru). Цель статьи - обратить внимание на то, как анализировать результаты, как к ним относится, что объективно, что случайно, как сказываются на результатах параметры расчета и т.д..

Выбор исходных данных и параметров расчета

В качестве демонстрационного примера выбран район Калуги, 200*200 км, с сильным антропогенным влиянием на рисунок изображения (рис. 1). Важно понять, на сколько сильно это влияние сказывается на ориентационных характеристиках, можно ли их использовать.

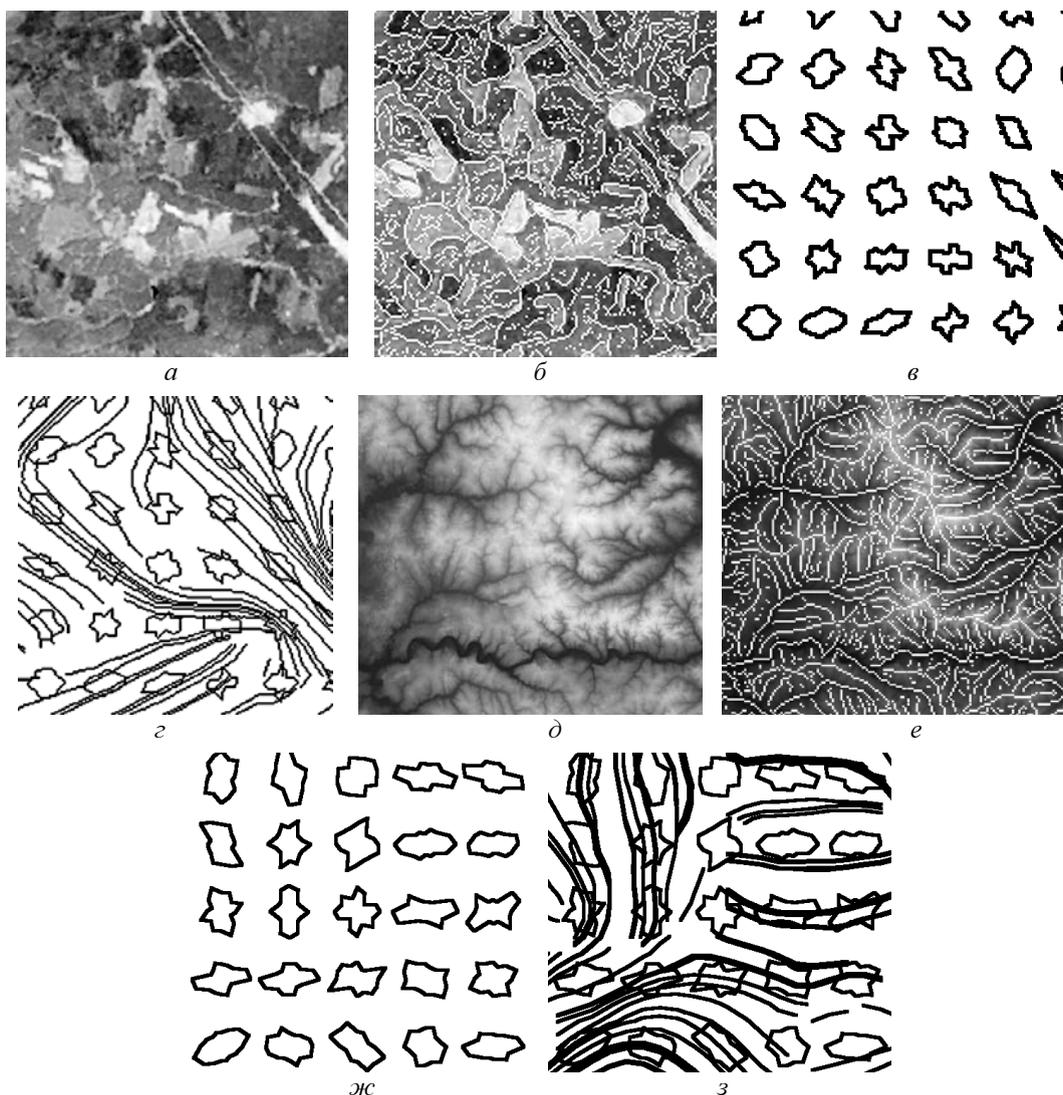
Измерение ориентационных (текстурных) характеристик в LESSA начинается с выявления линейных элементов – спрямленных границ полутоновых областей в изображении и хребтов/долин в ЦМР (рис. 2). Эти линейные элементы рисунка будем называть штрихами. В каждой точке штриха



а

б

Рис. 1. Изображение и ЦМР района Калужской области: а – изображение, полученное с Landsat-7 ETM+ 07.08.1999, 5-ый канал, ИК ; б – цифровая модель рельефа получена с SRTM



а

б

в

г

д

е

ж

з

Рис. 2. Штрихи и их статистические характеристики в изображении и ЦМР: а – фрагмент изображения (172 * 175 пикс.); б – белым отмечены выявленные в изображении штрихи (границы полутонных областей); в – розы-диаграммы по штрихам изображения (диаметр окна расчета 64 пикс.) г – розы-диаграммы и линии вытянутости роз – диаграмм по штрихам изображения; д – фрагмент ЦМР (485 * 455 пикс.); е – белым отмечены выявленные в ЦМР штрихи (хребты и долины); ж – розы-диаграммы по штрихам ЦМР (диаметр окна расчета 192 пикс.) з – розы-диаграммы и линии вытянутости роз – диаграмм по штрихам ЦМР

определяется его направление. В скользящем окне строятся розы-диаграммы, отражающие распределение штрихов по направлению, а также рассчитываются и многие производные характеристики: плотность каждого направления, сходство розы с крестом, среднее направление розы, линии вытянутости, показывающие изменение среднего направления роз в разных частях изображения и др.

Цель анализа текстурных характеристик – выявить, как локально преобладающие направления распределяются по территории, какие области территории однородны по ориентационным свойствам, где проявляются аномальные зоны и линии и т.п.

Эта информация может помочь как при построении гипотез, так и при подтверждении выдвинутых предположений. В нашем примере будем сопоставлять результаты измерения с имеющимися данными о региональной геодинамической ситуации района (рис. 3).

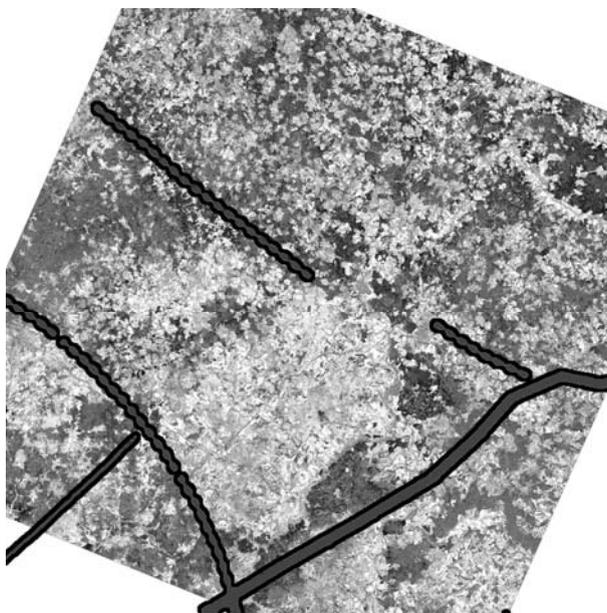


Рис. 3. Региональная геодинамическая ситуация района (по "Международной тектонической карте Европы и смежных областей" М 1:2 500 000). Толстая линия – Дугнинский грабен (глубинный разлом, ограничивающий древние платформы под чехлом). Толстый пунктир – разломы предположительно из системы Пачелмского авлакогена (региональные разломы неуставленного типа в фундаменте платформ, частично проникающие в чехол); тонкая линия – Клиновский грабен (разлом неуставленного типа в фундаменте платформ или частично проникающий в чехол)

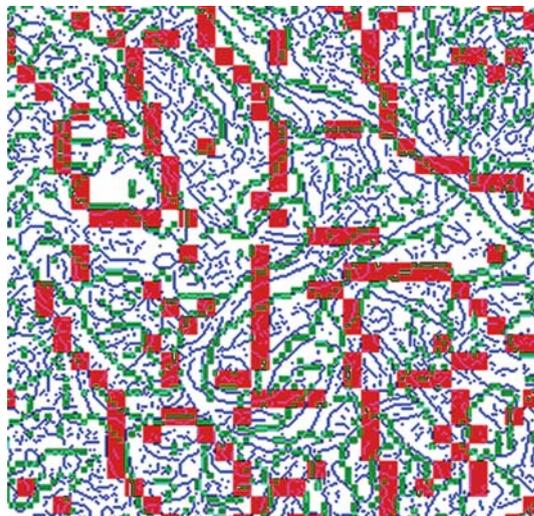
Для получения адекватных результатов измерения принципиально важно понимать, как называются параметры, использованные в расчетах. При любых параметрах – результаты объективны, но они характеризуют разные структуры и обладают разной статистической достоверностью. Выбирая параметры расчета, необходимо ориентироваться на искомый объект, на то, что мы хотим найти, что хотим увидеть.

Первый параметр – это размер искомых объектов. Очевидно, что при слишком большом окне расчета роз мы пропустим искомый объект, а если это окно существенно меньше объекта, то получим не более точные контуры объекта, а только его более мелкие подструктуры.

Далее нужно определить, в каких данных и в рисунке какого масштаба может проявляться искомый объект. Используя разрешение выше необходимого, мы не получим более точный результат, мы будем изучать рисунок другого уровня. Вместо общей линии русла реки получим линии меандров русла, боковые хребты вместо основных, т.е. с ростом детальности можно перейти к другому рисунку с ортогональными направлениями. Существенное изменение набора и направления штрихов в рисунке разного уровня легко видеть при существенном изменении разрешения исходного изображения - 30, 90 и 270 м/пикс (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Штрихи в рисунке разного уровня генерализации:
 а – фрагмент изображения (267 * 260 пикс.); б – выявленные в изображении штрихи при разрешении 30 м/пикс (синий), 90 м/пикс (зеленый) 270 м/пикс (красный)

Подробно выбор этих параметров описан в [2]. Если априорной информации об искомом объекте не достаточно, то важно просмотреть разные варианты – использовать разные данные и разные параметры расчета. Трудно надеяться на адекватные результаты, используя только оказавшиеся под рукой данные и параметры расчета «по умолчанию».

Анализ статистических результатов

Посмотрим, как анализировать получаемые характеристики штрихов:

- на что важно обратить внимание,
- что видно в разном масштабе (что изменяется, а что сохраняется),
- как эти результаты соотносятся с другими данными (со схемой разломов),
- какие новые особенности обнаруживаются.

Считаю важным, в первую очередь, обращать внимание на аномалии характеристик, так как аномалии рисунка – это, возможно, свидетельство об искомых особенностях территории, о местах изменения в ее строении, о нарушениях. Само изображение территории и свойства рисунка изменяются во времени и от условий съемки, от обработки, но расположение аномалий может сохраниться.

Будем рассматривать характеристики штрихов разного уровня генерализации, но рассчитывать розы-диаграммы в одних и тех же участках (окнах), т.е. размер скользящего окна расчета постоянен в метрах (17 км), но, соответственно, разный в пикселях. Исходные данные - изображение ИК канала (разрешение 30 м/пикс), изображение теплового канала (разрешение 60 м/пикс) и ЦМР (разрешение 90 м/пикс). Рассчитываем характеристики рисунка при разрешении 30 (только у ИК), 90 и 270 м/пикс.

На рис. 5 представлены псевдораскрашенные плотности штрихов: в первом ряду плотности штрихов в ИК изображении, во втором – в тепловом изображении, а в третьем – в ЦМР. Наиболее яркая аномалия в плотностях по изображению – между двумя структурами Пачелмского авлакогена. Особенно ярко она проявляется при низком разрешении (270 м/пикс), как максимум, а вот при разрешении 30 м/пикс в этом месте минимум (рис. 5а). Существенно, что градиентные зоны проходят точно по линиям этих структур (особенно в тепловом изображении). Вдоль Дугнинского разлома четкая градиентная зона видна только в результате по тепловому снимку при разрешении 90 м/пикс (рис. 5д) и немного в ЦМР (рис. 5и).

Самое интересное – это прямолинейная градиентная зона на продолжении Клинцовского грабена там, где он не показан на схеме. Эта градиентная зона наиболее отчетлива в результатах по

тепловому снимку, разрешение 270 м/пикс (рис. 5е). Отметим, что ее прямолинейность – не может быть артефактом расчета, так как окно расчета круглое. Еще существеннее результаты по ЦМР, где именно по этой линии проходит граница между областями повышенной и пониженной плотности штрихов, особенно наглядно при разрешении 270 м/пикс (рис. 5и).

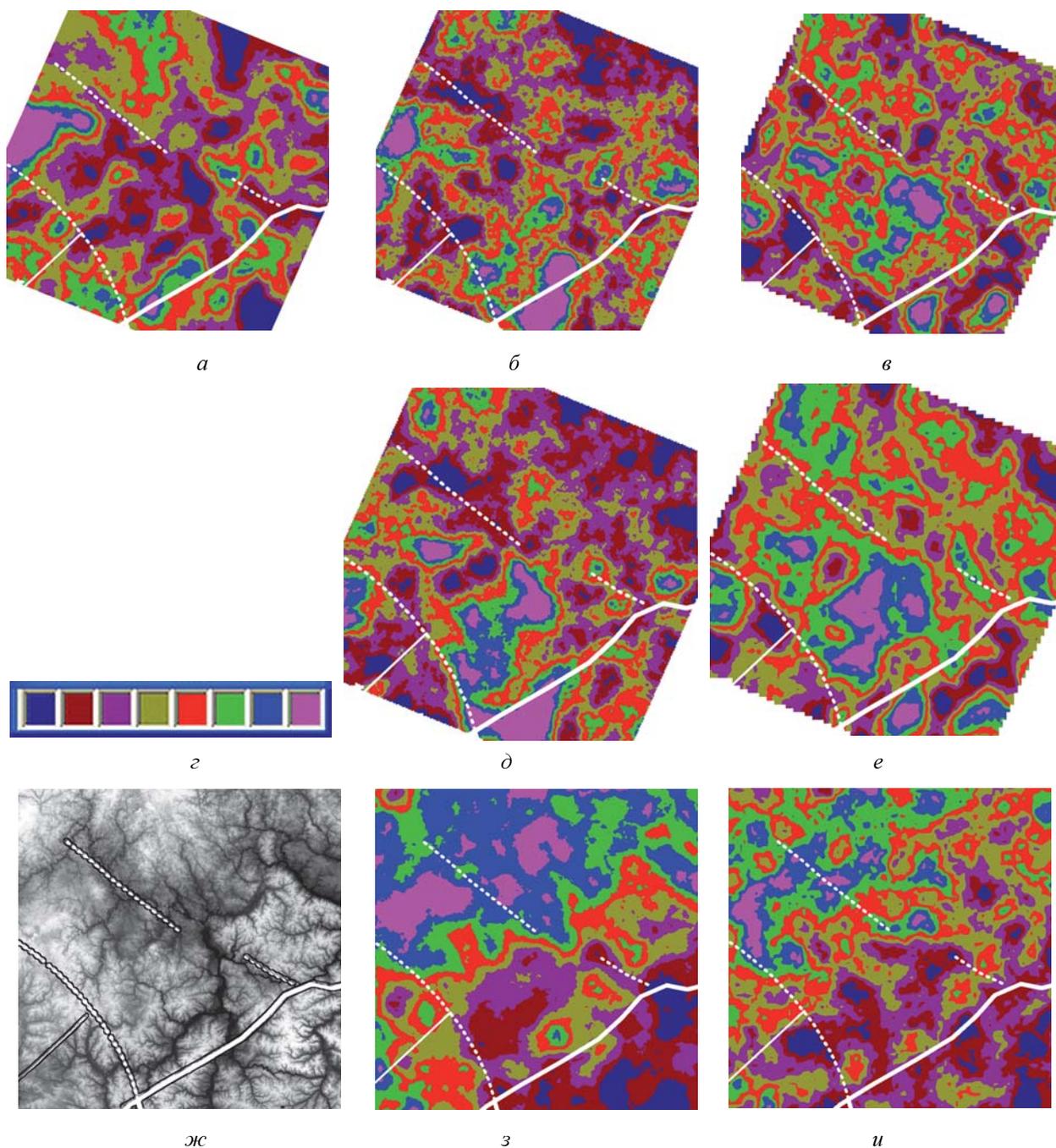


Рис. 5. Плотность штрихов в рисунке изображения и ЦМР при разном уровне генерализации. Белым наложены линии разломов.

а – плотность штрихов в рисунке ИК изображения при разрешении 30 м/пикс; б – плотность штрихов в рисунке ИК изображения при разрешении 90 м/пикс; в – плотность штрихов в рисунке ИК изображения при разрешении 270 м/пикс; г – шкала последовательности цветов псевдораскраски (розовое – максимум, темно синее - минимум); д – плотность штрихов в рисунке теплового изображения при разрешении 90 м/пикс; е – плотность штрихов в рисунке теплового изображения при разрешении 270 м/пикс; ж – изображение ЦМР з – плотность штрихов в рисунке ЦМР при разрешении 90 м/пикс; и – плотность штрихов в рисунке ЦМР при разрешении 270 м/пикс

Перечисленные особенности это не все, на что стоит обратить внимание, есть и другие, например, вертикальная зона правее центра, на продолжении спрямленного участка Оки, или зона северо-северо-западного направления севернее структуры Пачелмского авлакогена. Заметим, что часть линейных зон, которые проявляются, как «градиентные» линии, видна непосредственно в изображении – сразу или после «подсказки» LESSA, но очень яркое и редкое различие плотности штрихов, обнаруженное в результатах по ЦМР, совершенно не видно «на глаз» в исходных данных.

Теперь рассмотрим ориентационные свойства текстуры, представленные в графическом виде линиями вытянутости роз-диаграмм. Линии вытянутости – наглядная форма представления основных ориентационных свойств. Эта характеристика, как правило, очень устойчива. На рис. 6 представлены розы-диаграммы, рассчитанные по ИК изображению (при указанных выше условиях, диаметр окна расчета роз составляет соответственно, 576, 192 и 64 пикс). При нашем увеличении размера окна число точек штрихов, формирующих розу-диаграмму, увеличивается почти на порядок, и форма розы-диаграммы сглаживается, приближаясь к кругу, особенности формы плохо видны. Величина вытянутости роз при этом резко уменьшается, но в тоже время небольшие изменения этой величины становятся гораздо более подтвержденными статистически. В результате сохраняется достоверность картины линий вытянутости.

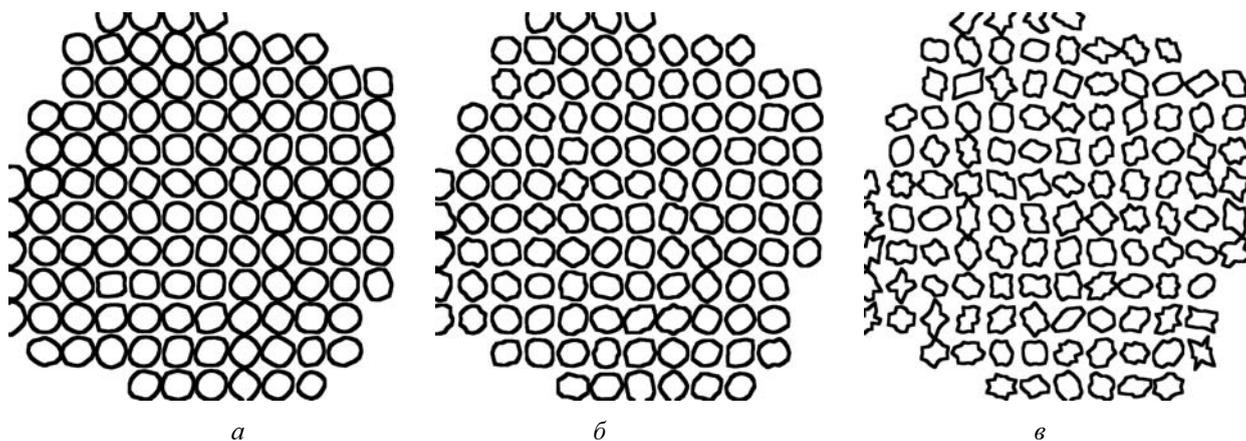


Рис. 6. Розы-диаграммы в рисунке ИК изображения при разном уровне генерализации
а – при разрешении 30 м/пикс; б – при разрешении 90 м/пикс; в – при разрешении 270 м/пикс

На рис. 7 представлены линии вытянутости рассчитанные по ИК, по тепловому изображению и по ЦМР при разном уровне генерализации. Главное, что необходимо отметить – в целом рисунок линий вытянутости одинаков. Следовательно, он отражает общие свойства местности, которые проявляются как в изображениях при существенной доле антропогенных объектов, так и непосредственно в рельефе. И, что бывает не всегда, сходные особенности рисунка линий вытянутости видны в структурах разного масштаба, разной величины.

Основные особенности рисунка линий вытянутости этой территории состоят в следующем.

1. В основном среднее направление роз-диаграмм – это северо-восток и северо-запад.
2. Выделяются 4 зоны с разным рисунком (рис. 7г)
 - 1 – смесь СЗ и СВ направления;
 - 2 – в основном СЗ направление;
 - 3 – смесь СЗ и СВ направления;
 - 4 – преимущественно ВСВ и СВ направление (вдоль Дугнинского разлома).
3. Явная прямолинейная линия раздела зон 2 и 3, которая идет точно вдоль продолжения Клинецовского грабена (особенно четко на рис. 7з)
4. Две вертикальные аномалии (правую мы видели и в плотностях) видны на всех масштабах, но в ЦМР хуже, правая особенно ярко видна на рис. 7з.

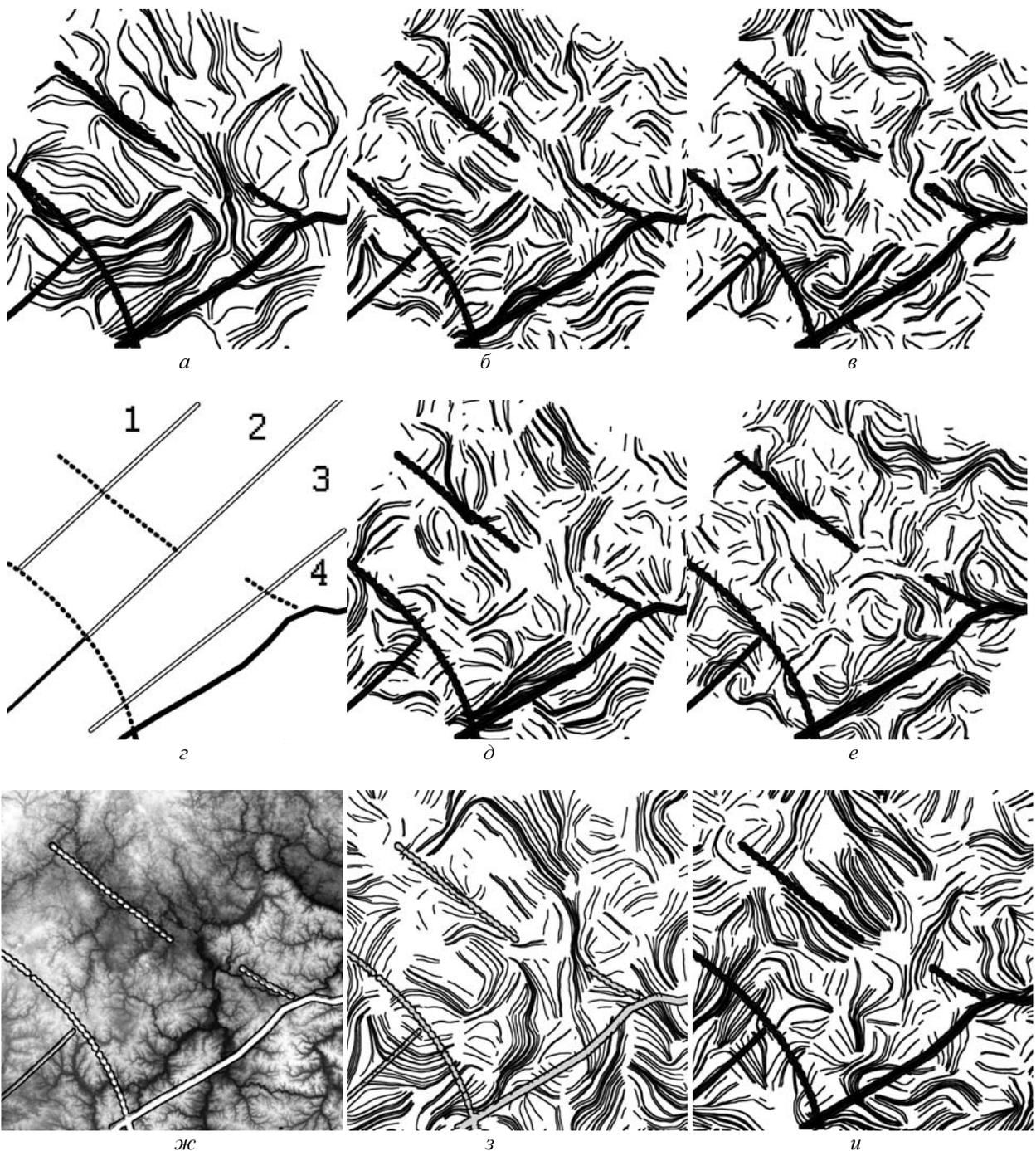


Рис. 7. Линии вытянутости роз-диаграмм в рисунке изображения и ЦМР при разном уровне генерализации. Белым наложены линии разломов.

a – линии вытянутости в рисунке ИК изображения при разрешении 30 м/пикс; *б* – линии вытянутости в рисунке ИК изображения при разрешении 90 м/пикс; *в* – линии вытянутости в рисунке ИК изображения при разрешении 270 м/пикс; *г* – участки с разным рисунком линий вытянутости; *д* – линии вытянутости в рисунке теплового изображения при разрешении 90 м/пикс; *е* – линии вытянутости в рисунке теплового изображения при разрешении 270 м/пикс; *ж* – тепловое изображение; *з* – линии вытянутости в рисунке ЦМР при разрешении 90 м/пикс; *и* – линии вытянутости в рисунке ЦМР при разрешении 270 м/пикс

Отметим главное:

эти особенности рисунка совершенно не видны непосредственно в исходных данных, сильное антропогенное влияние не изменило этих общих свойств рисунка, линия раздела областей с существенно разной плотностью штрихов ЦМР

проходит точно там же, где и граница областей с разным направлением вытянутости.

В этой статье мы рассматриваем только формальный анализ изображения без привязки к конкретным задачам. В качестве примера приведем один из выводов, который был сделан геологами по разным данным, включая и эти [3].

«Можно сделать вывод о наличии региональной зоны нарушений, одним из локальных проявлений которой является Клинцовский грабен. В ходе настоящих исследований установлено, что эта зона не оканчивается поперечным разломом, а продолжается далее в северо-восточном направлении, нарушая, в том числе, западную оконечность Камельгинской мульды».

Анализ протяженных линеаментов

Перейдем к следующей операции, цель которой – выявить цепочки штрихов, трассирующие протяженные линеаменты. Анализируются прямолинейные «коридоры» всех положений и направлений, пересекающие изображение, и подсчитывается, сколько в них попадает штрихов соответствующего направления («выраженность» линеамента). Затем можно посмотреть, где мелкие штрихи складываются в протяженные линеаменты. Найденные таким образом цепочки помогут специалисту проверить гипотезу о наличии линеамента или обратят его внимание на новую интересную линию.

Для организации просмотра, перебора используется 2 параметра – выраженность и направление. Обычно рассматриваются наиболее отчетливо выраженные (т.е. наиболее заполненные штрихами) сквозные линеаменты. Можно отобразить:

определенное число самых выраженных линеаментов;

все линеаменты с выраженностью выше порога (рис. 8а);

только линеаменты определенного направления с выраженностью выше порога (рис. 8б и 8в).

Цепочки штрихов, которые при этом выявляются, сопоставляются с другой информацией:

с исходным изображением, чтобы оценить из каких именно объектов складывается линеамент, например, проверить, не состоит ли он в основном из антропогенных штрихов (рис. 8г),

с внешними данными (рис. 8д);

с другими результатами LESSA (рис. 8е).

Что можно отметить в линеаментах, выявленных в нашем примере, есть ли в них поддержка рассматриваемым схемам или особенностям найденным в штрихах? Линеамент вдоль Дугнинского грабена – есть. Две Пачелмские структурные линии в этом масштабе не прямые, и не проявляются в виде линеамента. Надежного линеамента вдоль Клинцовского разлома, найти не мог ни при каких параметрах, ни в снимках, ни в ЦМР. (Хотя встречается мнение о том, что линеамент можно провести где угодно). При этом очевидно, что проявление структуры в статистике штрихов, гораздо более серьезное свидетельство в ее пользу, чем отслеживаемая прямая линия. Что касается других, обнаруженных выше особенностей рисунка, то есть четкие линии вдоль вертикальных неоднородностей в линиях вытянутости (правая и левая в рис 8е).

Все выявленные линеаменты – это подсказка, и не всякий существующий и даже видимый в изображении линеамент должен проявиться в виде такой прямолинейной цепочки штрихов. Также важно учитывать существенное отличие результатов по протяженным линеаментам от статистики штрихов. Эти результаты – и в первую очередь конкретное значение выраженности – существенно зависят

- от исходных данных (не только от разрешения, но и от зоны спектра; лишняя, особенно пустая, часть изображения может быть вредна; излишняя детальность может быть вредна),
- от параметров расчета,
- от расположения структуры относительно изображения – при сдвиге и повороте существенно меняется присутствующая в изображении часть структуры, а значит и значение выраженность.

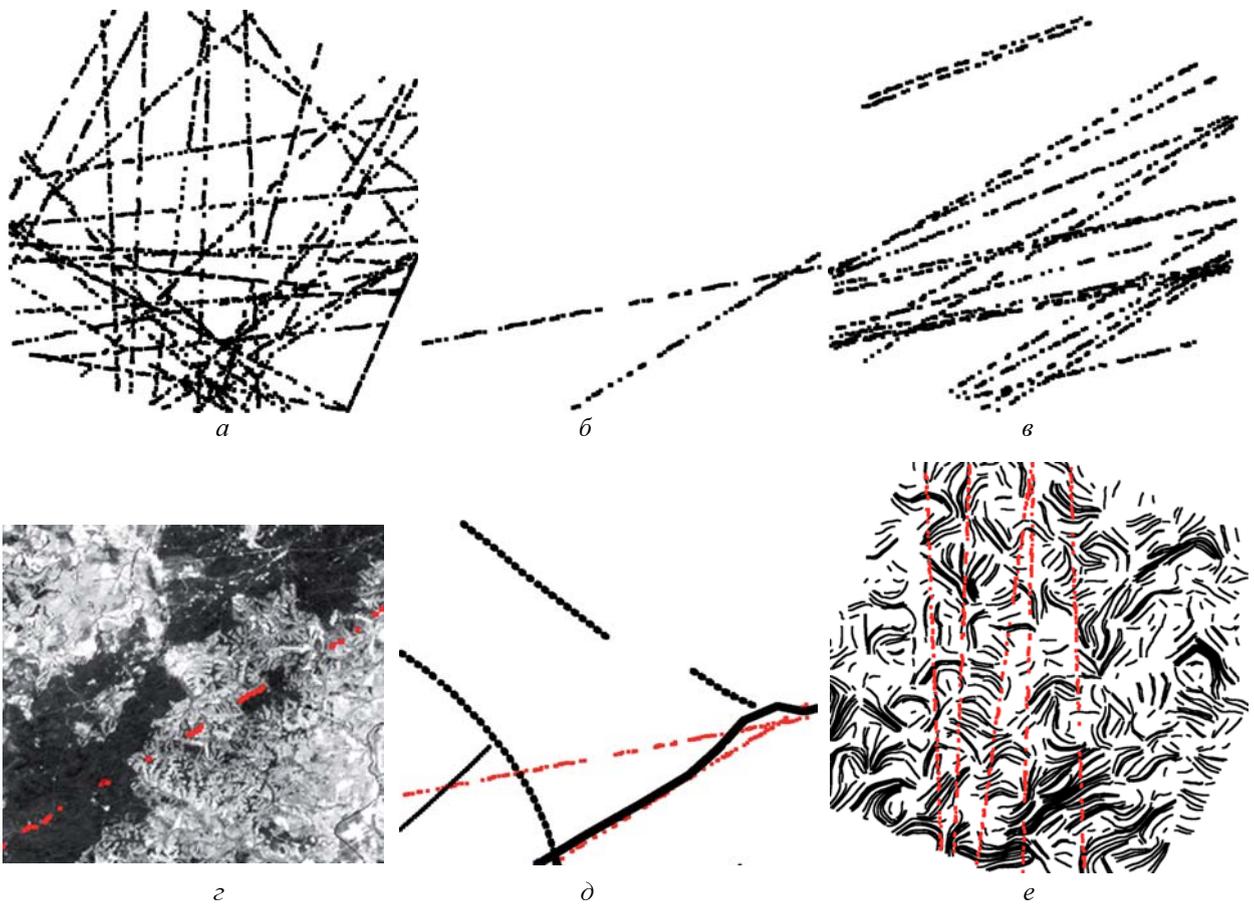


Рис. 8. Пример протяженных линеаментов, рассчитанных по изображению теплового канала при разрешении 180 м/пикс.

а – все линеаменты с выраженностью выше порога 100; *б* – линеаменты восток-северо-восточного направления с выраженностью выше порога 100; *в* – линеаменты восток-северо-восточного направления с выраженностью выше порога 80; *г* – фрагмент изображения со штрихами линеамента; *д* – линеаменты восток-северо-восточного направления с выраженностью выше порога 100. Красным наложены линии разломов.; *е* – линеаменты северного направления с выраженностью выше порога 100 и линии вытянутости

Представленная технология поиска протяженных линеаментов предназначена для их индивидуального анализа. Каждая отображаемая цепочка штрихов реально присутствует в изображении и реально укладывается в прямую линию, и конкретное значение выраженности видимого фрагмента линеамента подсчитывается правильно, но она не является общей характеристикой линеамента (как это было бы, если бы сети линеаментов были регулярными, с постоянной скважностью). Поэтому сложно сопоставлять линеаменты одной выраженности, но разного расположения, а набор линеаментов, который высвечивается при одном пороге выраженности, нельзя считать статистически достоверной характеристикой изображения в целом.

Это нужно иметь в виду, используя розу-диаграмму, рассчитанную не по всем штрихам, а только по тем, которые входят в протяженные линеаменты одной выраженности (рис. 9). Эта характеристика не устойчивая, зависит от исходных данных, от параметров расчета, от сдвига, от поворота и даже от значения порога. Вплоть до того, что вместо минимума в розе при пороге 100 (в северо-северо-западном направлении) появляется максимум при пороге 80. По этой розе можно только аккуратно оценить общие особенности, например то, что горизонтальных линеаментов больше, чем вертикальных, но это можно понять и по глобальной розе, рассчитанной по всем штрихам. Пусть в глобальной розе отличия кажутся не таким яркими, но они очень весомо подтверждены статистически.

Подчеркнем, что стабильность, надежность роз-диаграмм по всем штрихам и их производных статистических характеристик высока (результаты тестирования в [1]). В частности, при повороте изображения меняются конкретные значения яркости пикселей, перепады яркости, а поэтому и точное расположение, а иногда и направление штрихов, но форма розы сохраняется. На рис. 10 показаны результаты по четырем одинаковым изображениям, повернутым соответственно на 0, 11, 22 и 45 градусов, а розы-диаграммы рассчитаны в центре изображения, в круглом окне, повернуты в обратную сторону на соответствующий угол и сведены вместе. Видно, что влияние поворота на форму розы минимально.

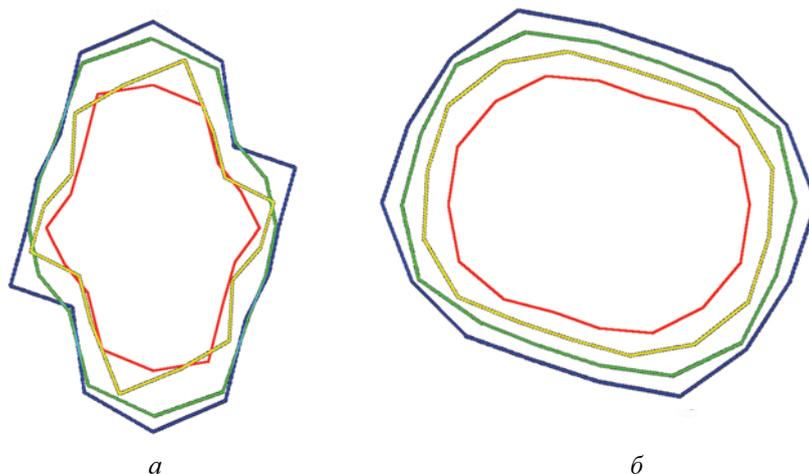


Рис. 10. Розы-диаграммы, рассчитанные по четырем изображениям, повернутым соответственно на 0 22 45 и 67 градусов. После расчета розы-диаграммы повернуты в обратную сторону на соответствующий угол и сведены вместе.

а – при диаметре окна расчета 100 пикселей; *б* – при диаметре окна расчета 1000 пикселей

Таким образом, при внимательном подходе к выбору исходных данных и параметров расчета, предложенная технология позволяет получить объективные данные о рисунке поверхности, который, в свою очередь может отражать аномалии строения территории. Этот инструментарий можно применять и к другим типам данных - геофизические поля, батиметрия (рис. 11), а особенно там, где многие другие измерения не доступны (рис. 12).

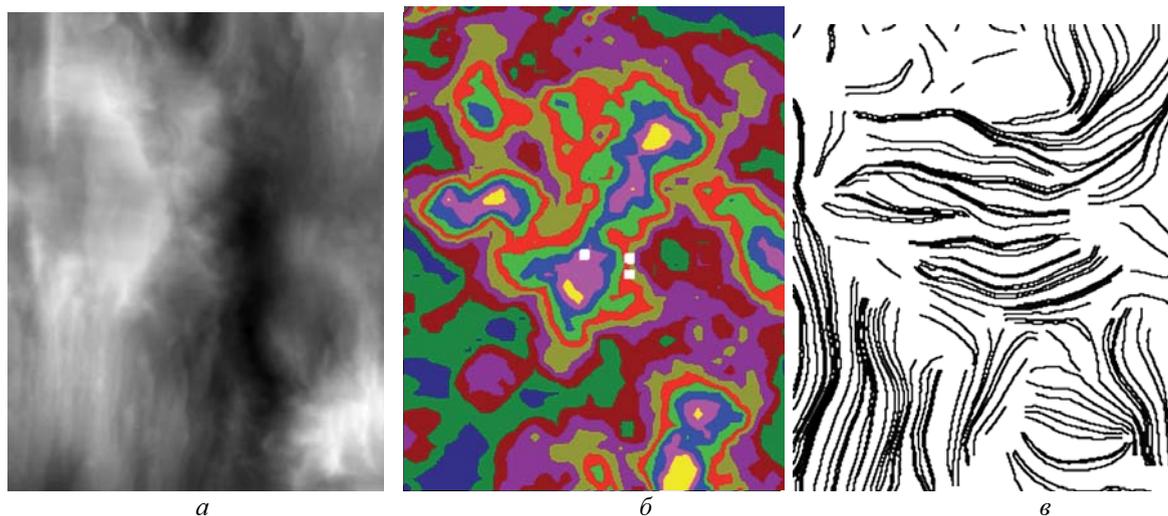


Рис. 11. Один из участков рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта. *а* – изображение батиметрических данных; *б* – плотность штрихов запад-северо-западного направления, белые точки – проявления полиметаллических сульфидов гидротермального генезиса, оказавшиеся на пересечении северо-западной и северо-восточной аномалий плотности; *в* – линии вытянутости роз диаграмм

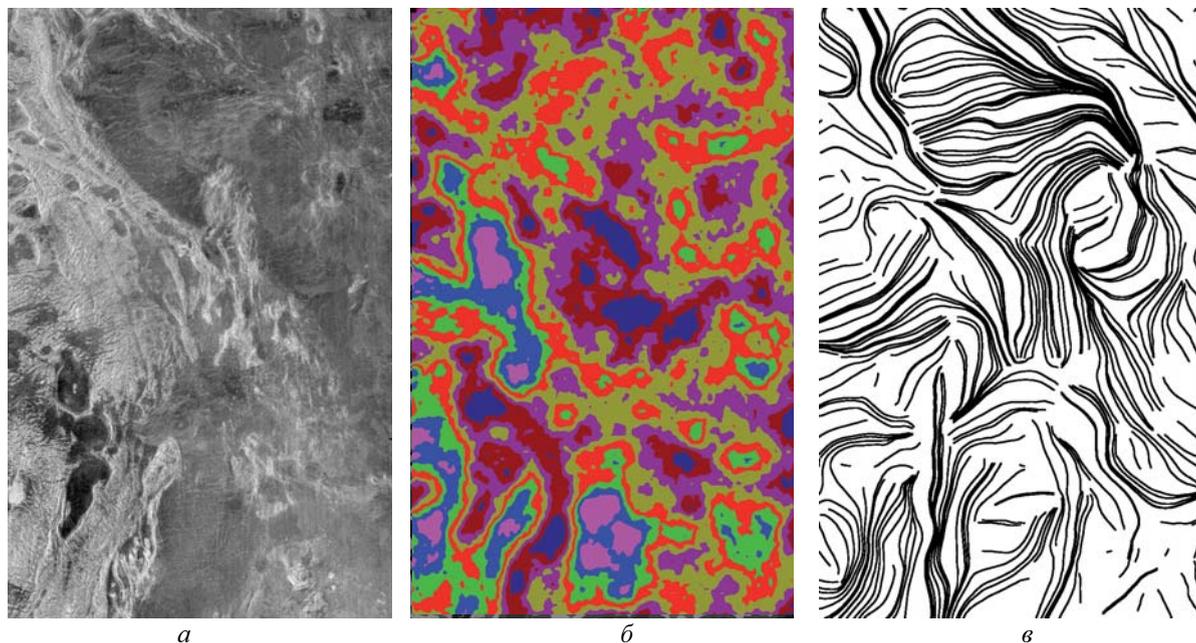


Рис. 12. Участок поверхности Венеры
а – изображение; *б* – плотность штрихов; *в* – линии вытянутости роз-диаграмм

Литература

1. Златопольский А.А. Ориентационно-текстурная характеристика аэрокосмических изображений. Сб. Цифровая обработка видеоинформации при структурно-геологических и сеймотектонических исследованиях // Л., ВСЕГЕИ (Всесоюзный геологический институт), 1991. С. 4-31.
2. Златопольский А.А. Особенности определения направления естественных объектов и текстур по растровым дистанционным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 1. С.52-56.
3. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Микляев М.И., Солдаткин С.Г. Комплексные космические исследования Калужского ПХГ: региональный и локальный этапы. Перспективы поисков месторождений нефти и газа в малоизученных районах и комплексах: Сб. науч. тр. М.: ВНИИ-ГАЗ, 2007. С.107-117.