Получение ориентационных характеристик территории с помощью технологии LESSA. Методика и тестирование на цифровой модели рельефа Предбайкалья

А. А. Златопольский

Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия

E-mail: aazlat@gmail.com

Статья посвящена методике получения статистически достоверного описания направлений структур рельефа изучаемой территории и представления, как эти направления соотносятся между собой. Используется программа LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), в которой анализ цифровой модели рельефа начинается с поиска осей хребтов и долин, далее называемых «штрихи». В скользящем окне рассчитывается статистика направления штрихов, которая отражается в розах-диаграммах. Определяется направление и степень вытянутости роз-диаграмм. В статье приводятся результаты тестирования роз-диаграмм. Эти результаты подтверждают, что в измерении направления структур рельефа с помощью LESSA нет погрешностей, связанных с преимущественным присвоением штрихам каких-то направлений. Рассматривается общее описание направления структур рельефа с помощью глобальной розы-диаграммы штрихов, розы вытянутости и линий вытянутости. Отмечается, что наиболее информативное описание ориентации структур рельефа дают линии вытянутости. Анализируется возможность использования для представления статистики направлений розы-диаграммы протяжённых линеаментов, которые в LESSA автоматически строятся из штрихов. Обосновывается, почему при достоверном индивидуальном анализе этих линеаментов роза-диаграмма линеаментов с единым порогом по выраженности статистически несостоятельна. Приведён пример мультимасштабного анализа направлений хребтов и долин для участка Предбайкалья.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, хребты и долины, линейные элементы, роза-диаграмма, линии вытянутости, протяжённые линеаменты

Одобрена к печати: 13.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110

Введение

Автоматизированная методика LESSA (*англ.* Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) состоит в выявлении в растровых данных мелких линейных элементов (штрихов) и в их статистическом анализе. Существует также возможность выстраивать из штрихов протяжённые прямые линии — линеаменты, но этот аспект мы рассмотрим ограниченно, так как ему посвящена недавняя работа (Златопольский, 2020). За 30 лет LESSA реализовывалась на различных вычислительных системах: от ЭВМ и специальных процессоров до ERDAS и от отдельной программы WinLessa до блока «Структурный анализ» в системе коллективного пользования «Вега» Института космических исследований Российской академии наук (Златопольский, Кашницкий, 2019).

При работе с цифровой моделью рельефа (ЦМР) выявляемые на первом шаге линейные элементы (штрихи) — это хребты и долины, которые можно анализировать отдельно, но, как правило, разделять их нет смысла. В настоящей статье мы будем работать с ЦМР, но совершенно аналогично осуществляется анализ изображений, где штрихи — это спрямлённые границы полутоновых областей. По штрихам в скользящем окне подсчитывается суммарная длина штрихов каждого направления, и результаты расчёта представляются в виде локальных роз-диаграмм и их характеристик.

В первую очередь необходимо обратить внимание на два принципиально важных параметра статистического анализа. Первый — это степень детализации, разрешение, масштаб, который определяется размером пикселя d . Выбор разрешения для работы в LESSA отличается

от традиционного выбора масштаба данных для визуального анализа. Необходимо ориентироваться на размер базовых структур, т. е. тех хребтов и долин, которые «создают» штрихи — основу всего анализа. Выявляются хребты и долины шириной и длиной не меньше $5d$. Под шириной долины в данном случае понимается локальное расстояние между гребнями ограничивающих её хребтов (аналогично для хребтов). Объекты, которые существенно меньше, не выявятся, а те, что существенно больше, будут представлены своими деталями, зачастую с иной ориентацией (например, боковыми хребтами). Необходимо учитывать, что, меняя масштаб, мы можем получить не более (или менее) точное описание рисунка рельефа, а описание ДРУГИХ рисунков — структур иных масштабов, которые, как мы увидим на примере ниже, могут существенно различаться.

Второй параметр — это размер окна статистического анализа. С одной стороны, окно должно быть достаточно велико, больше 30 пикселей в диаметре, чтобы получаемая роза-диаграмма была статистически устойчива (при меньшем окне в среднем окажется менее 20 измерений на один луч розы (Златопольский, 2016)). Вполне хорош в этом смысле размер окна в 64 пикселя. С другой стороны, если окно слишком велико, то «пропадут из вида», «усреднятся» области, ширина которых меньше окна.

Рис. 1

В настоящей статье сосредоточимся на определении, какие направления присутствуют в рисунке рельефа исследуемой территории, как они соотносятся между собой. Речь пойдёт об общем описании территории, а не о поиске отдельных структур. Существует привязанность к привычному для нас описанию этих свойств территории через глобальную розу-диаграмму, которую рассчитывают по линеаментам, дешифрованным вручную, а мы сделаем акцент на более детальном, менее обобщённом способе описания (линии вытянутости), который стал возможен за счёт автоматизации анализа.

Цель работы — продемонстрировать, как можно получать статистически достоверное описание направлений, представленных в рисунке территории. Вопрос о том, какие можно сделать тематические выводы из результатов измерений, не затрагивается. В качестве примера используем район Предбайкалья с интересным рельефом (*рис. 1*, см. с. 99), примерно $52\text{--}56^\circ$ с. ш. и $102,5\text{--}108^\circ$ в. д., 668×757 км. При разрешении 0,167 км в пикселе размер ЦМР получился 4000×4530 пикселей. Минимальный размер выявляемых при этом штрихов (хребтов и долин) — около 1 км.

Проверка «равноценности» направлений

Аккуратное определение на растре направления коротких линий, 5–10 пикселей, требует отдельного внимания и специальных инструментов. Иначе какие-то направления будут в среднем определяться чаще, а какие-то — реже. В LESSA направление штриха определяется в каждой его точке с точностью $22,5^\circ$ (т. е. возможно 8 направлений). Чтобы продемонстрировать работоспособность данного инструмента, воспользуемся круглым фрагментом используемой ЦМР (*рис. 2а*), диаметр 2525 пикселей, 422 км. В этом фрагменте штрихи всех направлений представлены почти одинаково часто, роза-диаграмма почти круглая (чуть вытянута по вертикали) (*рис. 2б*). Повернём фрагмент на $22,5^\circ$ против часовой стрелки, найдём штрихи, рассчитаем розу-диаграмму и повернём её в обратном направлении (на $22,5^\circ$ по часовой стрелке). Аналогичную операцию проделаем с поворотом ЦМР на 45° .

Рис. 2

Поворачивая круглый фрагмент, мы в точности сохраняем анализируемую область, но конкретные значения высоты в пикселях меняются (интерполируются), штрихи выявляются несколько иначе, а главное — с совсем другими направлениями и с другим числом пикселей

(особенно при повороте на 45°). Если штрихи какого-то направления выявляются или изменяются хуже, то при повороте соотношение лучей розы-диаграммы изменится.

На *рис. 2б* представлены все три розы-диаграммы (приведённые к одному положению). Как мы видим, они практически совпадают. А значит, нет систематической ошибки в поиске штрихов и в определении их направления. Следовательно, получаемым в LESSA розам-диаграммам и производным от них ориентационным характеристикам можно доверять.

Направление вытянутости роз-диаграмм. Линии вытянутости. Гистограмма вытянутости

Как мы видим, глобальная роза-диаграмма надёжно показывает соотношение разных направлений в рельефе региона. Однако эта характеристика очень обобщённая, в то время как есть более детальное описание, которое основано на параметрах локальных роз-диаграмм. На *рис. 3б* показаны штрихи, найденные на небольшом (160×160 пикселей) участке ЦМР (*рис. 3а*). В скользящем окне диаметром 64 пикселя рассчитаны розы-диаграммы, и часть из них (с шагом 32 пикселя) показана на *рис. 3в*.

Рис. 3

Розы-диаграммы в скользящем окне содержат и демонстрируют большой объём информации о распределении по территории штрихов разного направления и об их соотношении. Однако часто удобнее анализировать не сами розы-диаграммы, а их характеристики. Наиболее привычны такие характеристики, как общая плотность штрихов в окне и плотности штрихов отдельных направлений. Однако существенную информацию можно почерпнуть из векторной характеристики, которую будем называть «вытянутость». Она показывает, в каком направлении вытянута роза-диаграмма в среднем и насколько существенно она вытянута (средняя результирующая длина и среднее круговое направление (Чини, 1986)). Эта пара величин рассчитывается для каждого пикселя (центр окна расчёта розы в данном пикселе). В дополнение, чтобы различить ситуации, когда роза-диаграмма мало вытянута, рассчитываются такие характеристики, как близость розы-диаграммы к кругу или к кресту. Перечисленные и другие характеристики можно интерактивно анализировать с помощью специальных инструментов LESSA, а можно загрузить в геоинформационную систему для совместного анализа с другими данными.

Рассмотрим векторное представление вытянутости (*рис. 3г*) (для наглядности векторы показаны вдвое чаще, чем розы). Если двигаться вдоль этих векторов, то получим линии вытянутости, которые отражают среднее направление штрихов в той или иной части анализируемой территории (*рис. 3д*). Там, где нет явного преобладающего направления (например, проявляются два ортогональных направления), линии вытянутости обрываются. Если на довольно большом участке преобладает одно среднее направление, то образуются пучки параллельных линий вытянутости. Обратим внимание на то, что наиболее яркие пучки линий вытянутости в этом примере (и при этом разрешении) порождаются не долинами больших рек, а рисунком мелких притоков. Влияние масштаба анализа на линии вытянутости рассмотрим в следующем разделе.

Линии вытянутости отображают ориентационные свойства территории наглядно и гораздо детальнее, чем общая роза-диаграмма. Они позволяют не только понять, какие направления преобладают в рисунке рельефа, но и где именно они проявляются. Естественно, рисунок линий вытянутости, как и розы-диаграммы, в целом сохраняется при повороте изображения. Для примера на *рис. 4а* представлены линии вытянутости, рассчитанные для круглого фрагмента (см. *рис. 2а*), а на *рис. 4б* — линии вытянутости, рассчитанные для ЦМР, повернутой на 45° против часовой стрелки.

Рис. 4

Есть ещё одна возможность обобщённо описать направления, представленные на территории. Это описание более детально, чем глобальная роза-диаграмма по штрихам, но гораздо менее детально, чем рисунок линий вытянутости. Речь идёт о гистограмме, рассчитанной из направлений вытянутости локальных роз-диаграмм, назовём её «роза вытянутости». Такая роза для круглого фрагмента (см. *рис. 2а*) представлена на *рис. 5а*.

Рис. 5

Достоверность розы вытянутости зависит от числа независимых измерений, т.е. от неперекрывающихся окон расчёта роз-диаграмм. Точнее, будем ориентироваться на «условно независимые» окна, которые перекрываются меньше чем на половину (на 40 %). Если размер окна мал относительно размера всего анализируемого участка, то условно независимых локальных роз-диаграмм и векторов вытянутости будет очень много. В этом примере использовано скользящее окно диаметром 64 пикселя, которое примерно в 40 раз меньше диаметра анализируемого участка. Это соотношение даёт возможность получить достаточно много «условно независимых» измерений — примерно 35 измерений на один отсчёт гистограммы. Результирующая роза усреднена по пяти соседним отсчётам. Вторая роза вытянутости (рис. 5б) построена для ЦМР, повернутой на 45° против часовой стрелки. Как видим, роза вытянутости повернулась на тот же угол и вполне сохранила форму, включая мелкие детали.

Отметим, что при таком количестве измерений роза вытянутости оказывается надёжной, но сглаженной, с малым числом деталей. Видно, что она всё же детальнее, чем роза-диаграмма по штрихам, которая для этой территории почти равномерна (см. рис. 2б). Роза вытянутости может немного аккуратнее показать преимущественное направление рисунка, чем роза-диаграмма по штрихам. Но линии вытянутости гораздо информативнее.

Отображение свойств территории в линиях вытянутости

На примере Предбайкалья (см. рис. 1) рассмотрим, как линии вытянутости отображают направление структур территории, как «читать» их рисунок и как этот рисунок изменяется при переходе от структур одного масштабного уровня к структурам другого уровня.

Для того чтобы по линиям вытянутости (рис. 6а, см. с. 104) районировать территорию в целом, линейный размер окна расчёта роз-диаграмм должен быть примерно в 10 раз меньше, чем меньший линейный размер всего участка. В данном случае диаметр этого окна — 512 пикселей, а размер ЦМР — 4000 пикселей. Анализируются базовые структуры размером примерно в 1 км. Как видно на рис. 6б, в глобальной розе явно преобладает северо-западный луч, немного меньше — северо-северо-западный и в среднем она вытянута в направлении 324°. В розе вытянутости на рис. 6в, которая рассчитана в окнах диаметром 128 пикселей, также один пик с максимумом в направлении 330°. А вот в линиях вытянутости на рис. 6а очень чётко проявляются три совсем разных участка территории. Один участок — в юго-западной трети, где все линии вытянутости идут в направлении, близком к северо-западному (примерно 325°). Второй — вдоль северного берега Байкала с линиями северо-восточного направления (около 55°). И треугольный участок между ними с линиями разного направления (в этом месте был взят тестовый участок с круглой розой-диаграммой). Как мы видим, анализ линий вытянутости даёт не менее обоснованную, но гораздо более подробную информацию, чем глобальная роза-диаграмма, в которой отразился только самый «яркий» юго-западный участок.

Рассмотрим, как меняется рисунок линий вытянутости на этой территории при изменении масштаба анализа. Если перейти к вдвое большим структурам (разрешение 0,334 км в пикселе), то рисунок линии вытянутости изменится не принципиально. Поэтому перейдём сразу к структурам размером около 4 км (разрешение 0,668 км в пикселе). Для сопоставимости результатов окно расчёта роз-диаграмм остаётся прежнего размера на местности и, соответственно, меньше в пикселях (128 пикселей). Теперь в глобальной розе-диаграмме максимален северо-восточный луч и меньше северный и северо-западный лучи (рис. 6д). В розе вытянутости на рис. 6е (рассчитана в окнах диаметром 32 пикселя) максимальный пик также переместился на направление $55 \pm 15^\circ$ и появился меньший пик в направлении $350 \pm 15^\circ$. А вот по линиям вытянутости на рис. 6г можно определить, где конкретно и какие изменения рисунка произошли. Так, на юго-западе сохранилась, но уменьшилась область с северо-западным направлением структур. А область линий северо-восточного направления на востоке существенно расширилась на север, заняв большую часть «промежуточного треугольного» участка.

Рис. 6

При переходе к ещё вдвое большим базовым структурам (размером в 8 км) есть зримые изменения в линиях вытянутости, но для экономии места мы перейдём сразу к базовым структурам размером в 16 км (разрешение 2,672 км в пикселе). Ориентация этих структур отличается очень существенно. Самые большие отличия — в западной половине территории, где направление линий вытянутости во многих местах изменилось на ортогональное (рис. 6ж). При этом в глобальной розе-диаграмме (рис. 6з) мы не видим таких существенных изменений, а только усиление северо-восточного направления. Розу вытянутости при таком разрешении рассчитать уже нет возможности — слишком мала матрица ЦМР.

Если перейти к ещё более крупным базовым структурам (размер 32 км, разрешение 5,344 км в пикселе), размер ЦМР оказывается слишком малым, чтобы рассчитать и линии вытянутости. Остаётся рассмотреть сами эти структуры (штрихи) (рис. 6и), которые теперь гораздо больше отражают крупные речные долины и хребты меридионального направления, что проявляется и в глобальной розе-диаграмме (рис. 6к).

Таким образом, мы видим, насколько информативен рисунок линий вытянутости и как наглядно в этих линиях отражается направление структур разного масштаба. А вот в глобальных розах существенные детали могут быть затушёваны. Розы вытянутости дают более точное измерение основных направлений, чем глобальные розы, хотя, если обеспечена высокая статистическая достоверность, они также довольно сглажены. Кроме того, их нельзя рассчитать для небольших матриц ЦМР.

Протяжённые линеаменты

В заключение рассмотрим встречающуюся практику использования розы-диаграммы протяжённых линеаментов, найденных в LESSA (с одним порогом выраженности), для обобщённого описания направлений, представленных в рисунке территории. Протяжённые линеаменты строятся из тех же штрихов (базовых структур), которые используются для статистического описания рисунка. Найденные линеаменты исследователи просматривают, задавая (в качестве фильтра) два параметра: направление линеамента и степень его выраженности (насколько хорошо линеамент трассируется штрихами). Параметр выраженности нужно воспринимать не как количественную оценку линеамента, а, скорее, как возможность показать, больше линеаментов этого направления или меньше (подробно этот параметр описан в работе (Златопольский, 2020)).

Коротко рассмотрим пример линеаментов всех направлений с одним порогом выраженности на рис. 7а (см. с. 106) (разрешение 0,668 км/пикселей, искали линеаменты длиной около 270 км, порог 171). В северной части территории линеаменты видны хорошо, а чтобы разобраться в их «сгустках» на юге, нужно повысить порог (меньше линеаментов). Попутно обратим внимание на одно важное обстоятельство. Сгущение параллельных линеаментов часто происходит там, где наблюдается пучок однонаправленных линий вытянутости (рис. 7б), причём направление сгущения совпадает с направлением пучка. Дело в том, что пучок указывает место с большим числом штрихов этого направления, которые и составляют параллельные линеаменты. Такие линеаменты фактически дублируют информацию, присутствующую в линиях вытянутости. Поэтому больший интерес представляют линеаменты, идущие вкрест линиям вытянутости. Как, например, самый северный субширотный линеамент (в восточной половине), который идёт под большим углом к линиям вытянутости, проходит через полосу без линий вытянутости, где сошлись ортогонально направленные структуры, а далее западнее проходит через примечательный узел линеаментов ещё трёх направлений (северо-восточного, западно-северо-западного и северного).

Для технологических целей в LESSA можно построить розу-диаграмму линеаментов всех направлений с единым порогом по выраженности — розу линеаментов. Фактически для линеаментов каждого направления определяется суммарная длина входящих в них штрихов. Ниже будет показано, как можно использовать розу линеаментов. Однако как статистическую характеристику местности использовать её нельзя, так как выборка, полученная

по порогу, для этой цели не репрезентативна. Дело в том, что линии разных направлений находятся в разном положении относительно анализируемого прямоугольного участка, областей «нет данных» и раstra, и поэтому разные направления представлены в такой розе-диаграмме заведомо неравноценно. Рассмотрим аналогию, где разные направления — это различные страны. Пусть для сравнения развития бега мы запросили в разных странах число бегунов, чья средняя скорость на дистанции выше порога. Наши выводы будут заведомо ошибочны, если порог общий, но в каждой стране бегут свою дистанцию и по своей (отличной от других) местности.

Рис. 7

Дополнительно подробно поясним, почему роза линеаментов не может служить достоверным описанием территории. В первую очередь отметим, что форма розы линеаментов существенно зависит от выбора порога по выраженности, при котором она рассчитывается. Если порог высок, линеаменты трассируются штрихами хорошо, но таких линеаментов мало и роза-диаграмма статистически совершенно неустойчива. А если порог низкий, то учитывается большинство имеющихся штрихов и роза линеаментов близка к розе-диаграмме по штрихам — не даёт новой информации, но содержит искажения (см. ниже). Остаётся субъективный выбор каких-то промежуточных значений порога.

Но основная причина несостоятельности розы линеаментов как объективного описания территории — это зависимость её формы от факторов, внешних по отношению к рисунку структур рельефа, в частности от формы и поворота анализируемого участка, а также от расположения областей «нет данных». Рассмотрим «сквозные» линеаменты, одинаково проявленные на местности. Если анализируется участок, вытянутый в широтном направлении, то линеамент субширотного направления даст больший вклад в розу линеаментов, чем субмеридиональный. Вклад линеамента, проходящего через диагональ, больше, чем у такого же, но субширотного, а если линеамент диагонального направления, но пересекает только угол участка, то его вклад существенно меньше. На форме розы линеаментов сказываются и большие участки без данных (скажем, водная поверхность). В примере на рис. 7а такая область расположена в юго-восточном углу территории. Диагональные линеаменты северо-восточного направления в этом месте скрыты и поэтому дадут вклад в розу меньше, чем северо-западные линеаменты.

Когда LESSA используется для анализа больших матриц, можно строить не сквозные, а существенно более короткие линеаменты (во фрагментах), которые на порядок короче линейного размера исследуемой территории. Высказывалось предположение (Малкин Б. В.), что роза линеаментов по очень большому числу коротких линеаментов окажется статистически достоверным и детальным описанием направления структур рельефа. Действительно, на статистику коротких линеаментов существенно меньше влияет форма анализируемого участка и расположение областей без данных, однако различие условий для линеаментов разного направления и расположения сохраняется и во фрагменте, что сказывается на форме розы линеаментов. Покажем это.

Рассмотрим розу по коротким линеаментам, полученную для круглого тестового участка (см. *рис. 2*). Искались линеаменты протяжённостью примерно 42 км (250 пикселей), что в 10 раз меньше размера этого участка. Розу строили при промежуточных значениях порога, когда её форма примерно сохраняется в некотором диапазоне значений вытянутости. В данном случае линеаментов немало при пороге 200: их суммарная длина — 56 000 пикселей, что составляет 9 % от суммарной длины всех штрихов. Роза линеаментов, усреднённая по 11 соседним отсчётам, представлена на *рис. 8а*. Эта форма розы в основном сохраняется при снижении порога до 170 (22 % суммарной длины штрихов), после чего к порогу 100 (78 %) она постепенно переходит к форме глобальной розы по штрихам, и эта форма сохраняется до минимального порога — 1 (*рис. 8в*).

Рис. 8

Из розы линеаментов на *рис. 8а* можно извлечь следующую достоверную, обоснованную информацию:

1. Линеаменты такого размера в северо-восточном секторе направлений представлены существенно больше, чем в ортогональном направлении.
2. Линеаментов такого размера субмеридионального направления больше, чем субширотного.
3. Если исследователя заинтересовали какие-то особенности розы линеаментов, например лучи в направлении 53–63 и 8–18°, то он может «высветить» линеаменты, которые эти лучи формируют (*рис. 9а*), и проанализировать, какие структуры рельефа их порождают (*рис. 9б*).

Ни для чего другого розы линеаментов не предназначены. Прочие выводы, сделанные по розе линеаментов (см. *рис. 8а*), например о количественном соотношении линеаментов направления 53–63 и 8–18° или о других деталях розы линеаментов (где пики, а где провалы), будут несостоятельны и статистически не обоснованы в силу упомянутой «невыверенности» направлений.

Продemonстрируем эту невыровненность. Роза линеаментов при низком пороге выраженности (см. *рис. 8в*) хотя и близка к глобальной розе-диаграмме по штрихам (см. *рис. 2б*), но диагональные направления в ней усилены, а строго в северо-восточном и северо-западном

направлениях — резкие провалы. Такие же провалы есть и в розах линеаментов с другими порогами (см., например, *рис. 8а*), но там они менее заметны. Проверим, отражают ли эти особенности розы линеаментов рисунок рельефа. На *рис. 8г* приведена роза линеаментов, построенная с теми же параметрами для ЦМР, повернутой на 45° против часовой стрелки. В целом роза повернулась: до поворота была небольшая вытянутость в северном направлении, а после поворота — в северо-западном, однако усиление направлений, близких к диагональным, и «провалы» там сохранились, не повернулись, т.е. эти особенности розы не связаны с рисунком рельефа.

Рис. 9

Таким образом, для статистических выводов неверно опираться на розу линеаментов, а следует использовать для этой цели достоверную статистику штрихов. В частности, основную информацию, которую можно извлечь из розы линеаментов (см. *рис. 8а*), а именно, что коротких линеаментов северо-восточного и восточного направлений больше, чем ортогональных к ним, можно найти в статистически обеспеченной розе по штрихам. Покажем это. Короткие линеаменты отражают более крупные структуры, чем базовые штрихи. Поэтому изменим масштаб поиска штрихов (в 4 раза, в пикселе 0,668 км) и увидим преобладание северо-восточного и восточного направлений в глобальной розе-диаграмме этого фрагмента ЦМР на *рис. 8б*. При таком масштабе анализа на данном участке ЦМР преобладают и линии вытянутости северо-восточного направления (соответствующая область на *рис. 6г*).

Надеемся, что приведённый детальный анализ ситуации с розами-диаграммами по линеаментам с одним порогом выраженности — нерепрезентативная выборка — убедит исследователей не использовать их в статистических измерениях.

Выводы

1. Приведённые результаты тестирования демонстрируют, что при получении ориентационных статистических характеристик хребтов и долин по ЦМР с помощью LESSA все направления равноправны, нет технологических искажений. Аналогична ситуация и при анализе изображения (Златопольский, 2008). Таким образом, можно уверенно использовать эту методику для статистического анализа данных дистанционного зондирования Земли.

2. В силу особенностей измерения направления коротких отрезков на растре роза-диаграмма, которая демонстрирует результат статистического анализа штрихов, содержит 8 лучей (шаг 22,5°). Однако есть возможность получить более детальные сведения о распределении направлений, опираясь на направление вытянутости розы-диаграммы. В частности, можно использовать более детальную розу-диаграмму вытянутости.
3. Линии вытянутости наиболее наглядно и точно демонстрируют, где и какое направление структур преобладает в изображениях по данным дистанционного зондирования Земли.
4. Принципиально важно адекватно выбрать масштаб анализа (разрешение) и детальность анализа (размер скользящего окна). Масштаб определяет, долины и хребты какой ширины мы хотим анализировать, а размер окна — области какой ширины мы хотим увидеть (аналогично фокусированию оптического прибора).
5. Неправоммерно использовать для статистического анализа протяжённые линеаменты, которые выявляются для индивидуального интерактивного анализа. Роза-диаграмма по линеаментам с одним порогом выраженности нужна как технологический инструмент и не может служить общей характеристикой территории. Если какой-то луч этой розы-диаграммы короче другого, то вполне возможно, что просто хуже оказались условия для учёта линеаментов этого направления.

Литература

1. Златопольский А. А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. С. 102–112.
2. Златопольский А. А. Статистический анализ плотности хребтов и долин по цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 209–216
3. Златопольский А. А. Автоматизация линеаментного анализа — методика LESSA. Протяжённые линеаменты: Методический обзор // Динамическая геология. № 1. М.: МГУ, 2020. С. 55–66
4. Златопольский А. А., Кашицкий А. В. Инструмент анализа рисунка и линеаментов в информационных системах семейства «Созвездие-ВЕГА» // Информац. технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE'2018: сб. ст. конф. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 287–294.
5. Чини Р. Ф. Статистические методы в геологии / пер. с англ. М.: Мир, 1986. 189 с.

Using LESSA technology to obtain territory orientation characteristics. Methodology and testing with digital elevation model for the pre-Baikal region

A. A. Zlatopolsky

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: aazlat@gmail.com*

The paper describes the method of obtaining statistically reliable description of directions that are presented in the relief structures of the studied territory and how these directions correspond to each other. The LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) software is used, in which DEM analysis begins with detection of the axes of ridges and valleys, hereinafter referred to as “stripes”. Statistics of stripes direction are calculated in the sliding window. These statistics are shown in rose diagrams. Then the direction and degree of elongation of the rose diagrams is determined. The paper presents the results of rose diagrams testing. Those results confirm that in measuring the direction of terrain structures using LESSA, there are no errors associated with the preferential assignment of certain directions to stripes. We consider the general description of the direction of relief structures

using the global rose diagram of strikes, using the “elongation rose” and “elongation lines”. It is noted that the most informative description of the orientation of relief structures is given by elongation lines. We analyze the possibility of using the rose diagram of extended lineaments for presenting direction statistics, which are automatically built from stripes in LESSA. It is proved that though individual analysis of these lineaments is reliable at the same time the rose-diagram of lineaments with equal “manifestation” threshold is not statistically valid. An example of multi-scale analysis of the directions of valleys and ridges for a section of the pre-Baikal region is given.

Keywords: digital terrain map, ridges and valleys, linear elements, rose-diagrams, elongation lines, extended lineaments

Accepted: 13.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110

References

1. Zlatopolsky A. A., Metodika izmereniya orientatsionnykh kharakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tekhnologiya LESSA) (Methodology for measuring the orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, pp. 102–112.
2. Zlatopolsky A. A., Statisticheskii analiz plotnosti khrebtov i dolin po tsifrovoi modeli rel'efa (Statistical analysis of the ridges and valleys density via digital terrain model), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 209–216.
3. Zlatopolsky A. A., Avtomatizatsiya lineamentnogo analiza — metodika LESSA. Protyazhennyye lineamenty: Metodicheskii obzor (Lineament analysis automatization — technique LESSA. Extended lineaments. Methodological overview), *Dinamicheskaya geologiya*, No. 1, Moscow: MGU, 2020, pp. 55–66.
4. Zlatopolsky A. A., Kashnitskii A. V., Instrument analiza risunka i lineamentov v informatsionnykh sistemakh semeistva “Sozvezdie-VEGA” (Tool for analyzing pattern and lineaments in information systems of the “Constellation-VEGA” family), *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018* (Information technology in Earth remote sensing), Proc. Conf., IKI RAN, 2019, pp. 287–294.
5. Chini R. F., *Statisticheskie metody v geologii* (Statistical methods in geology), Moscow: Mir, 1986, 189 p.