

УДК 550.8.013:551.4.012 (571.63/55)

© С.А. Устинов, В.А. Петров

С.А. Устинов, В.А. Петров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ СТРУКТУРНО-ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА (НА ПРИМЕРЕ УРТУЙСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА, ЮВ ЗАБАЙКАЛЬЕ)



Моделирование геообъектов и геопроцессов

Введение

Под цифровой моделью какого-либо геометрического (географического) объекта понимается определенная форма представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий «вычислять» (восстанавливать) объект путем интерполяции, аппроксимации или экстраполяции [3]. Цифровые модели рельефа (ЦМР) – это особый вид трехмерных математических моделей, представляющий собой отображение рельефа как реальных, так и абстрактных геополей (поверхностей). При этом в качестве «рельефа поверхности» в цифровой модели могут выступать, кроме реального рельефа, различные другие показатели и характеристики: атмосферное давление, температура воздуха, осадки, пластовое давление нефти, геофизические и геохимические поля, концентрация загрязняющих веществ [11].

Следует различать цифровые модели картографического изображения рельефа (цифровые карты) и собственно цифровые модели рельефа, под которыми на практике зачастую понимаются цифровые модели высот, создаваемые с использованием ограниченного набора исходных картографических данных о рельефе (X, Y, Z) [6].

Создание ЦМР и пересчет их из одного вида в другой базируется на использовании математического аппарата. От правильного его применения зависит не только адекватность построенной модели, но и оптимальность затрат ресурсов машинной памяти и времени вычисления [1].

Способ построения ЦМР по нерегулярной сети исходных точек требует постановки задачи восстановления (интерполяции) поверхности и пересчета сети на регулярную. В настоящее время существует много методов, позволяющих решать эту задачу. Среди них – интерполяция на основе триангуляции Делоне, средневзвешенная интерполяция, крайгинг и др. Однако в любом случае при

вычислении отметки точки необходимо пользоваться алгоритмами интерполяции (значения, получаемые в исходных точках, совпадают с истинными абсолютно точно) или аппроксимации (значения, получаемые в исходных точках, совпадают с истинными с некоторой степенью точности).

На основе построенных ЦМР может быть проведен линейный анализ. Данный анализ заключается в выявлении диагностических признаков – линейментов, которые чаще всего представляют собой прямолинейные отрицательные формы рельефа, экспонированные прямолинейные склоны, эскарпы и уступы, последовательность прямолинейных отрезков мелких водотоков, пересекающих в одном направлении водоразделы и долины, прямолинейность осевых линий водоразделов, участки сгущения и перегибов горизонталей [2]. Данный анализ является одним из наиболее эффективных дистанционных методов изучения каркаса разрывных нарушений и глубинного строения территорий.

Объектом проведенных дистанционных исследований являлся Уртуйский гранитный массив (УГМ). Он находится в юго-восточном Забайкалье к северо-западу от города Краснокаменска. В геологическом отношении массив расположен в северо-западном обрамлении Стрельцовой кальдеры, в пределах которой сосредоточено 19 урановых месторождений, формирующих Стрельцовское рудное поле (СРП). Массив занимает площадь порядка 42 км² и сложен крупно- и среднезернистыми порфировидными гранитами, относящимися к позднепротерозойскому урулюнгуевскому комплексу [8]. Необходимость проведения подобных исследований именно для этого объекта объясняется тем, что одним из возможных источников промышленной урановой минерализации Стрельцовой кальдеры могла быть рассеянная урановая минерализация, установленная в домезозойских породах. Данная минерализация проявилась как в пределах СРП, так и в регионе

в целом. Именно поэтому геологическая и геотектоническая история развития УГМ, расположенного вне Стрельцовской кальдеры, представляет большой интерес. При этом ограниченные возможности проведения комплексных геологических изысканий на данном объекте, а также недостаточный объем достоверных структурных данных заставляют прибегать к помощи дистанционных методов. Предполагается, что проведенное исследование позволит выявить узлы пересечения долгоживущих флюидопроводящих разломов, определяющих положение перспективных участков для проведения поисково-разведочных работ.

Фактический материал и инструменты

Основой для рассматриваемого исследования послужил картографический материал в виде топографической основы масштаба 1:25 000. Кроме того, в распоряжении авторов имелись космоснимки и карты рельефа, полученные в результате анализа данных космоснимков. Все это позволило обеспечить необходимую детальность при построении ЦМР и использовании их в дальнейшем для линеаментного анализа.

При изучении рельефа для осуществления более глубокого структурно-линеаментного анализа было рассмотрено два основных механизма построения ЦМР изучаемого участка – с использованием регулярной сети высот (GRID) и с помощью нерегулярной триангуляционной сети (TIN). Оба рассматриваемых механизма моделирования рельефа получили широкое распространение в географических и геологических информационных системах и поддерживаются многими видами программного ГИС-обеспечения. Каждый при этом имеет свои недостатки и достоинства, что определяет необходимость их совместного рассмотрения.

Для анализа имеющегося материала применялось следующее программное обеспечение:

1. Adobe Photoshop CS3 – графический редактор, применялся для подготовки к обработке растровых материалов, удаления ненужных деталей, изменения интенсивности цветов, толщины и четкости контуров изолиний для удобства дальнейшей векторизации;
2. Easy Trace 7.99 Pro (бесплатная версия) – программа-векторизатор, применялась для полуавтоматической векторизации изолиний исходной топографической карты, присвоения атрибутов (в данном случае отметок высот) каждой изолинии, экспорта векторных данных в ГИС;
3. Arcview 3.2 GIS – пакет ГИС программ, применялся для построения ЦМР на основе нерегулярной триангуляционной сети (TIN),

перевода изолиний в точки с отметками высот для дальнейшей обработки и построения модели рельефа на основе регулярной сети высот (GRID);

4. Golden Software Surfer 8 – ГИС-система, использовалась для представления цифровой модели поверхности в виде значений в узлах прямоугольной регулярной сетки, построения контурной карты, карты векторных направлений и наглядных трехмерных изображений поверхности.

Векторизация топографического материала

Начальным этапом работы являлась векторизация картографического материала. Данная задача была осуществлена с помощью программы Easy Trace 7.99 Pro (бесплатная версия). Easy Trace является пакетом программ для полуавтоматической интерактивной векторизации цветных и черно-белых растровых изображений, работающим в среде операционной системы Microsoft Windows. Векторизовать линии на черно-белом растре значительно быстрее и удобнее. Однако это не всегда возможно, поскольку исходным материалом для векторизации в большинстве случаев являются цветные растры. Поэтому в программе Easy Trace предусмотрен инструмент «бинаризация». Бинаризация растра предназначена для выделения из цветного изображения тематического черно-белого слоя. Например, из растра цветной топографической карты можно выделить двухцветный слой горизонталей или рек и сохранить его в виде отдельного двухцветного (бинарного) растра. После такой операции интересующие объекты карты (в данном случае горизонталей) будут представлены одним цветом, а все остальные объекты раскрашены иным цветом. Также перед векторизацией растр топографической основы может быть доработан в графическом редакторе за счет устранения ненужных элементов, цветовой коррекции, усиления четкости и видимости интересующих элементов, что увеличивает точность процесса бинаризации. В качестве графического редактора использовалось программное обеспечение Adobe Photoshop CS3.

Далее проводилась векторизация (трассировка) горизонталей исходной топографической основы. Это достаточно долгий и однообразный процесс, происходящий практически в автоматическом режиме, поэтому подробно останавливаться на нем нет смысла. Векторизовались только утолщенные горизонталей, проведенные через 25 метров. Так как рельеф изучаемой области достаточно расчлененный, то этой информации будет вполне достаточно для построения объективной модели рельефа с необходимой для линеаментного анализа деталь-

ностью. Кроме того, рассматриваемая программа-векторизатор позволяет привязывать отметки высот к каждой построенной векторной изолинии, то есть присваивать атрибуты. В результате этого построенные изолинии окрашиваются в различные цвета в зависимости от значений высот (рис. 1).

После того, как векторизация полностью завершена, полученные векторные слои, содержащие изолинии с высотными отметками, были экспортированы в программу ArcView 3.2 GIS для дальнейшего трехмерного анализа. Полученные данные представлены в рассматриваемой ГИС-программе как объекты под названием «polyline Z», то есть полилинии, содержащие информацию о высотных отметках. Имея подобные объекты, достаточно просто построить в данной программе модель рельефа на основе нерегулярной триангуляционной сети (TIN).

Цифровая модель рельефа TIN

Модель TIN (Triangulation Irregular Network) – это модель, разработанная специально для описания рельефа. При создании модели TIN используется нерегулярная сеть треугольников, соответствующая триангуляции Делоне. При этом плоские участки моделируются небольшим числом крупных треугольников, а на участках крутых уступов, где необходимо детально показать все грани рельефа, поверхность отображается многочисленными мелкими треугольниками.

Для построения ЦМР TIN помимо стандартной оболочки программы ArcView необходимо воспользоваться дополнительными программными модулями Spatial Analyst и 3D Analyst, которые обычно идут в комплекте с данной программой. Эти модули предназначены для анализа поверхностей, работы с растровыми пространственными моделями в формате GRID, о которых будет сказано далее, и в том числе для создания поверхностей по нерегулярной триангуляционной сети.

Средствами 3D Analyst для построения модели TIN можно анализировать любое количество входных данных любого типа (точка, линия, полигон). Причем каждую добавленную в TIN таблицу можно использовать различными способами: как массив точек, как линии перегибов, как отсекающий, заполняющий, затирающий или замещающий полигоны. Модель проста в понимании и наглядна, при правильном использовании исходных данных очень точна. Легко конвертируется в GRID, что и будет сделано для дальнейшей обработки наших данных. Таким образом, в ГИС-программе ArcView 3.2 была создана TIN-модель рельефа УГМ (рис. 2).

Кроме того, модуль 3D Analyst позволяет создавать модели рельефа в трехмерном пространстве (рис. 3), вращать и поворачивать их нужным образом для отражения необходимых деталей. При необходимости, для дальнейшего анализа, с полученной трехмерной моделью можно совместить результаты

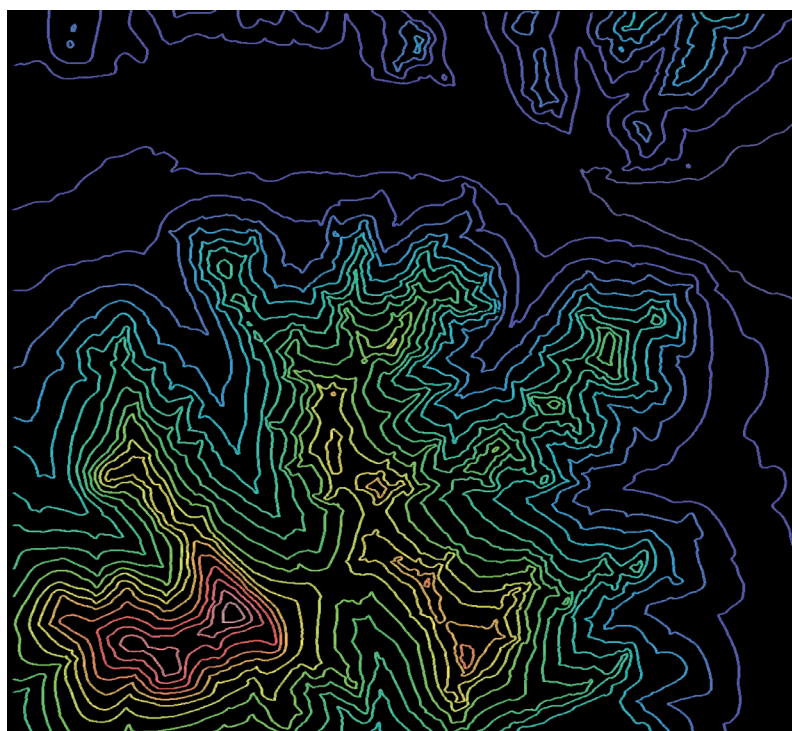


Рис. 1. Результат полуавтоматической векторизации (трассировки) утолщенных горизонталей исходной топографической основы в Easy Trace. Цвета изолиний различаются в зависимости от присвоенной высотной отметки

- Условные обозначения:
- Высотная отметка (м):
- 1050-1100
 - 1000-1050
 - 950-1000
 - 900-950
 - 850-900
 - 800-850
 - 750-800
 - 700-750
 - 650-700

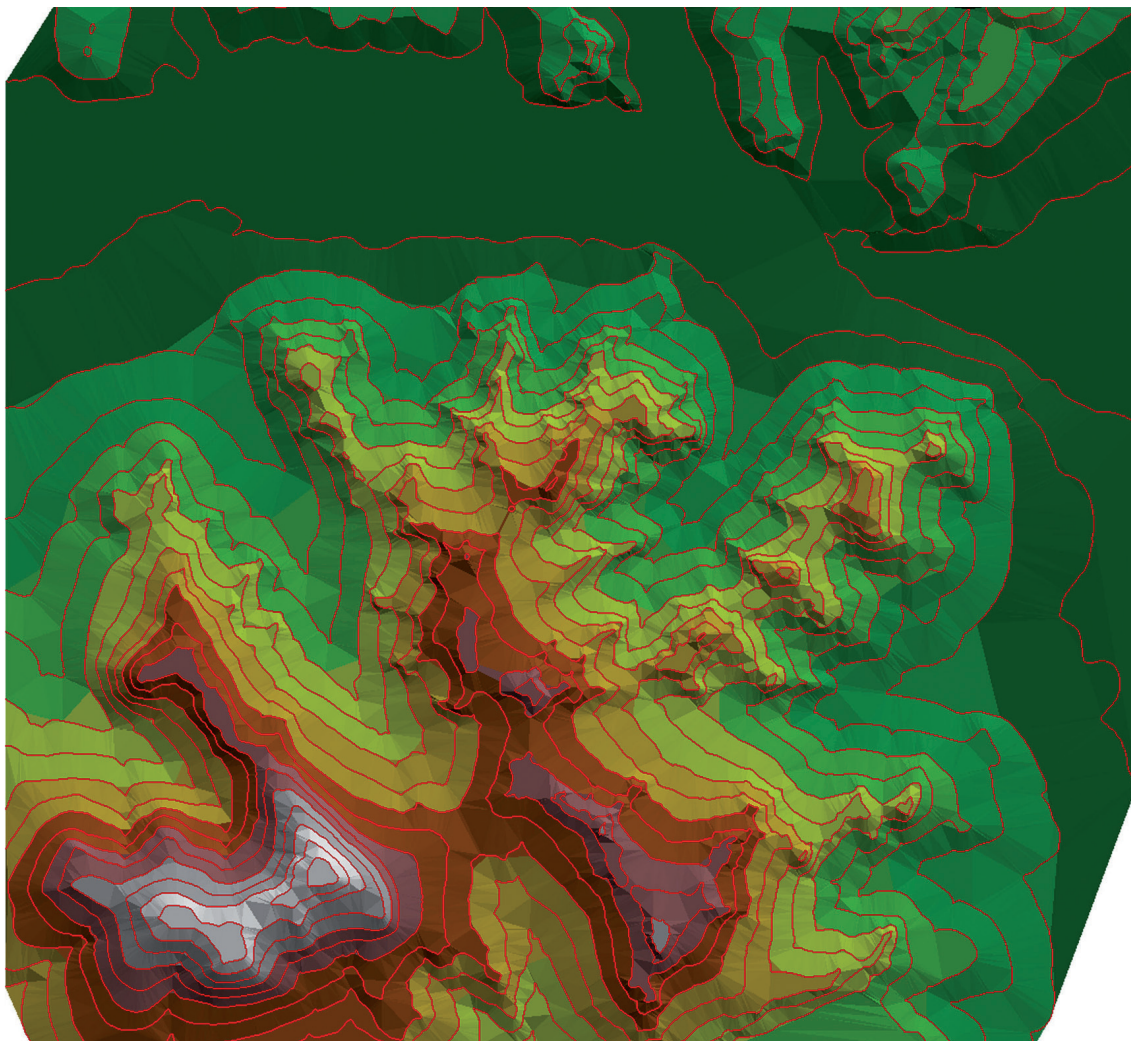


Рис. 2. Цифровая модель рельефа TIN района Уртуйского гранитного массива в горизонтальной плоскости. Горизонтали проведены через 25 метров

- Условные обозначения:
- Высотная отметка (м):
- 1050-1100
 - 1000-1050
 - 950-1000
 - 900-950
 - 850-900
 - 800-850
 - 750-800
 - 700-750
 - 650-700

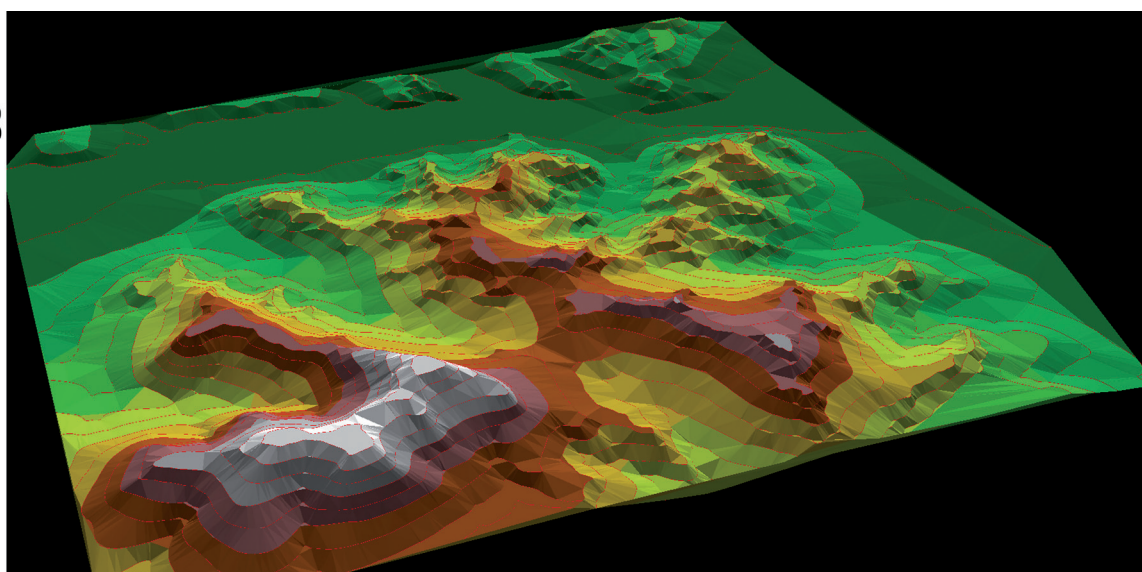


Рис. 3. Цифровая модель рельефа TIN района Уртуйского гранитного массива в трехмерном пространстве

космической съемки, изолинии, слои, содержащие гидросеть, и другую важную информацию.

Цифровая модель рельефа GRID

Модель рельефа GRID предусматривает разбиение пространства на неделимые элементы. При этом образуется матрица высот или регулярная сеть высотных отметок. Регулярная сеть высот представляет собой решетку с равными прямоугольниками или квадратами, где вершины этих фигур являются узлами сетки. Регулярная сеть высот получила наименование «GRID», так как при расчете подобной модели используется метод «Gridding», а файлы такой ЦМР имеют формат «GRD» [11].

Для анализа и построения GRID-модели рельефа было решено воспользоваться геоинформационной системой Golden Software Surfer 8. Программный комплекс Arcview также позволяет анализировать поверхности, построенные с помощью регулярной сетки данных. Однако Surfer создана именно для анализа GRID-моделей и предоставляет пользователю гораздо больше инструментов и средств пространственного анализа данных [7]. Эта программа, к сожалению, не работает с исходными данными, представленными линиями, содержащими отметки высот. Поэтому, возникла необходимость перевести наши данные,

используемые для построения TIN-модели, в точки со значениями координат и отметками высот. Эта операция может быть выполнена с помощью известного бесплатного модуля для ArcView – Edit Tools. В результате его работы все полилинии (горизонталы) конвертируются в множество точек, сохраняя при этом значения высот и координаты. Теперь, имея такие данные, заданные в произвольных точках области (в узлах нерегулярной сетки) можно переходить к получению значений в узлах регулярной сетки в Surfer. Эта операция выполняется с использованием алгоритмов интерполяции двумерных функций.

Важно, что, помимо трехмерных моделей, программный комплекс Surfer позволяет строить некоторые виды сеточных карт, которые будут крайне полезными для дальнейшего линейно-аналитического анализа. Сеточными картами называются такие карты, для построения которых требуется создание сеточного файла: контурные, образные, векторные, каркасные карты, карты с теневым рельефом и карты-поверхности. Для начала, по нашим данным (точкам с отметками высот) была построена контурная карта или карта в изолиниях. В результате этой операции получили практически исходную топографическую карту района с горизонталями (рис. 4), но уже векторную. Контурные залиты

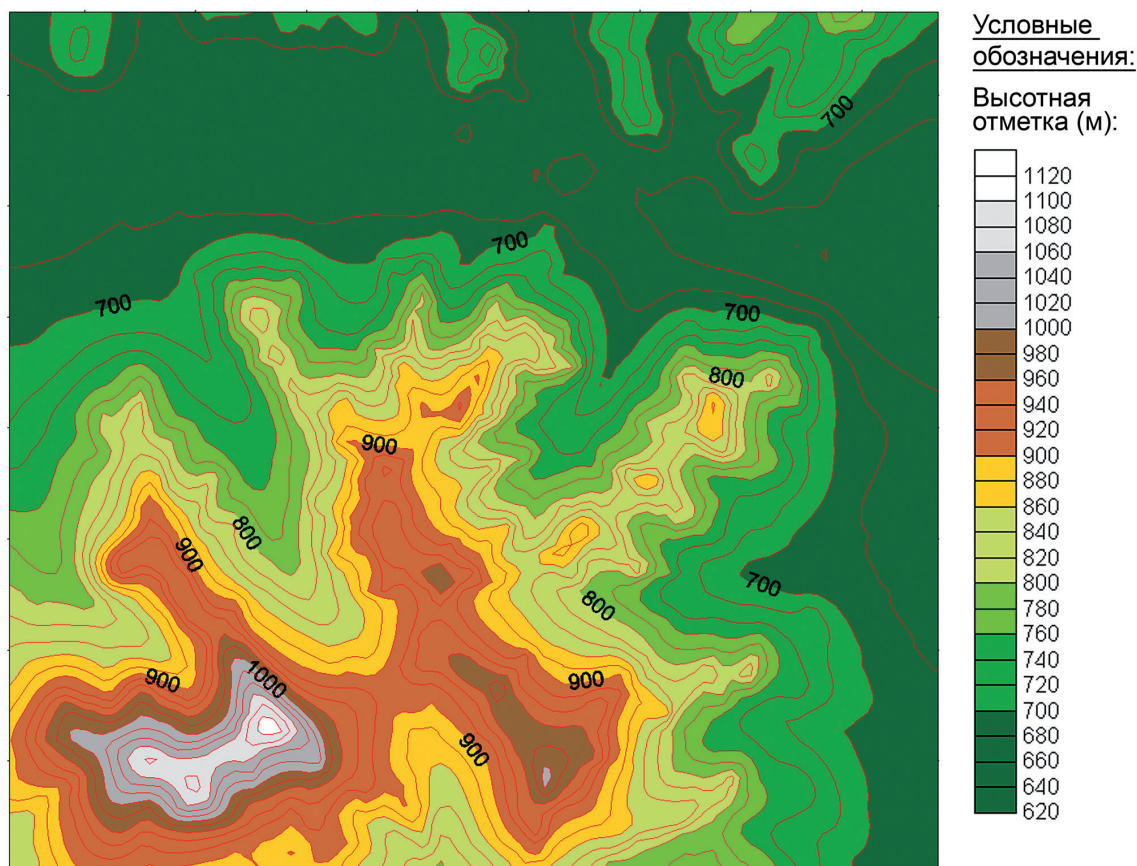


Рис. 4. Контурная карта (карта изолиний) района УГМ, построенная на основе GRID-данных

в соответствии со значениями высотных отметок. Данная карта весьма схожа с ранее построенной цифровой моделью рельефа TIN, расположенной в горизонтальной плоскости, но она пока несет в себе только плоскостную информацию.

Для детального анализа пространственных трехмерных данных о рельефе необходимо на основе полученной контурной карты построить ряд дополнительных карт и трехмерных изображений поверхности. Важную информацию для линеаментного анализа может дать карта с теневым рельефом. Это растровая карта, основанная на сеточном файле. Такая карта использует цвета для обозначения локальной ориентации поверхности относительно заданного направления источника света. Surfer определяет ориентацию каждой ячейки сетки и вычисляет ее отражательную способность. Те части поверхности, которые повернуты в сторону от источника света, будут отражать меньше света в сторону наблюдателя и будут выглядеть более темными. Источник света может рассматриваться как солнечный свет над топографической поверхностью.

Результат построения карты с теневым рельефом представлен на рис. 5. При этом для выявления всех линеаментов важно, чтобы рельеф изучаемой территории был рассмотрен при разных положениях источника света. Тогда все линейные элементы рельефа становятся отчетливо различимы.

Кроме того, для линеаментного анализа значимую информацию несет еще одна плоскостная сеточная карта – карта векторов. Данная карта изображает направление и скорость уменьшения значений высот. С помощью стрелок на векторной карте показывается направление вниз. Причем длина стрелок соответствует величине (крутизне) наклона. На данной карте также можно выявить линейные элементы, выделяемые при линеаментном анализе. Они будут располагаться в местах схождения стрелок с различных направлений. Желательно задать достаточную плотность или большое количество объектов для получения наиболее ясной картины (рис. 6).

Также цифровая модель рельефа на основе GRID-данных не может обойтись без построения трехмерной поверхности рельефа. В отличие от модели TIN, построенной за счет треугольников, в данном случае это будет объемное теневое представление сеточного файла. Высота поверхности определяется значением высотной отметки соответствующего узла сетки (рис. 7). Данную модель также можно поворачивать нужным образом для отражения необходимых деталей. Как и в случае с картой теневого рельефа, для данной трехмерной модели можно настроить положение источника света.

Линеаментный анализ

После построения необходимых вспомогательных карт, схем и трехмерных ЦМР можно переходить непосредственно к линеаментному анализу. Для решения данной задачи все полученные карты анализировались с помощью инструментов созданного авторами программного модуля, интегрированного в ГИС. Изначально данный модуль разрабатывался как инструмент для реализации и частичной автоматизации задач специальной методики микроструктурного анализа [10]. Разработка осуществлялась с помощью объектно-ориентированного языка программирования Avenue, который представлен в качестве внутренней среды разработки программы ArcView 3.2.

Представляемый модуль в совокупности с базовыми функциями и инструментами ГИС позволяет осуществлять «привязку» растров, их стыковку в одной системе относительных координат, маркировку микроструктур, маркировку объектов по типам, по возрасту и генезису. Кроме того, в программный код заложены алгоритмы автоматического расчета геометрических параметров микроструктур, а также имеется возможность выявления различных систем и генераций микротрещин и микроструктур. Реализовано представление результатов в виде простых диаграмм (графики, гистограммы), а также разработана возможность построения роз-диаграмм, крайне необходимых при изучении трещинных структур в геологии, петрологии, геофизике, гидрогеологии и т.д. После доработки данный модуль стало возможно использовать для пространственного анализа не только микроструктур, но и крупных линейных зон, соответствующих разломам и протяженным линейным сегментам геологических структур.

В результате линеаменты, которые были визуально выявлены на совокупности всех карт, маркировались (рис. 8) и в качестве полилиний заносились в отдельную векторную тему, а координаты концов каждого линейного сегмента, значения азимутов и длин автоматически вычислялись и записывались в атрибутивную таблицу. Кроме того, ориентировка и положение выявленных линеаментов сверялась с положением известных на данной территории структур и разломов. Дальнейшее их изучение осуществлялось за счет построения роз-диаграмм и гистограмм зависимости длин линеаментов от их азимута простирания (рис. 9).

В результате построения роз-диаграмм стало возможно визуально оценить характер распределения простираний выбранных линейных элементов рельефа. При построении роз-диаграмм учитывалось не только количество линеаментов, имеющих ту или иную ориентировку, но и их общая протяженность,

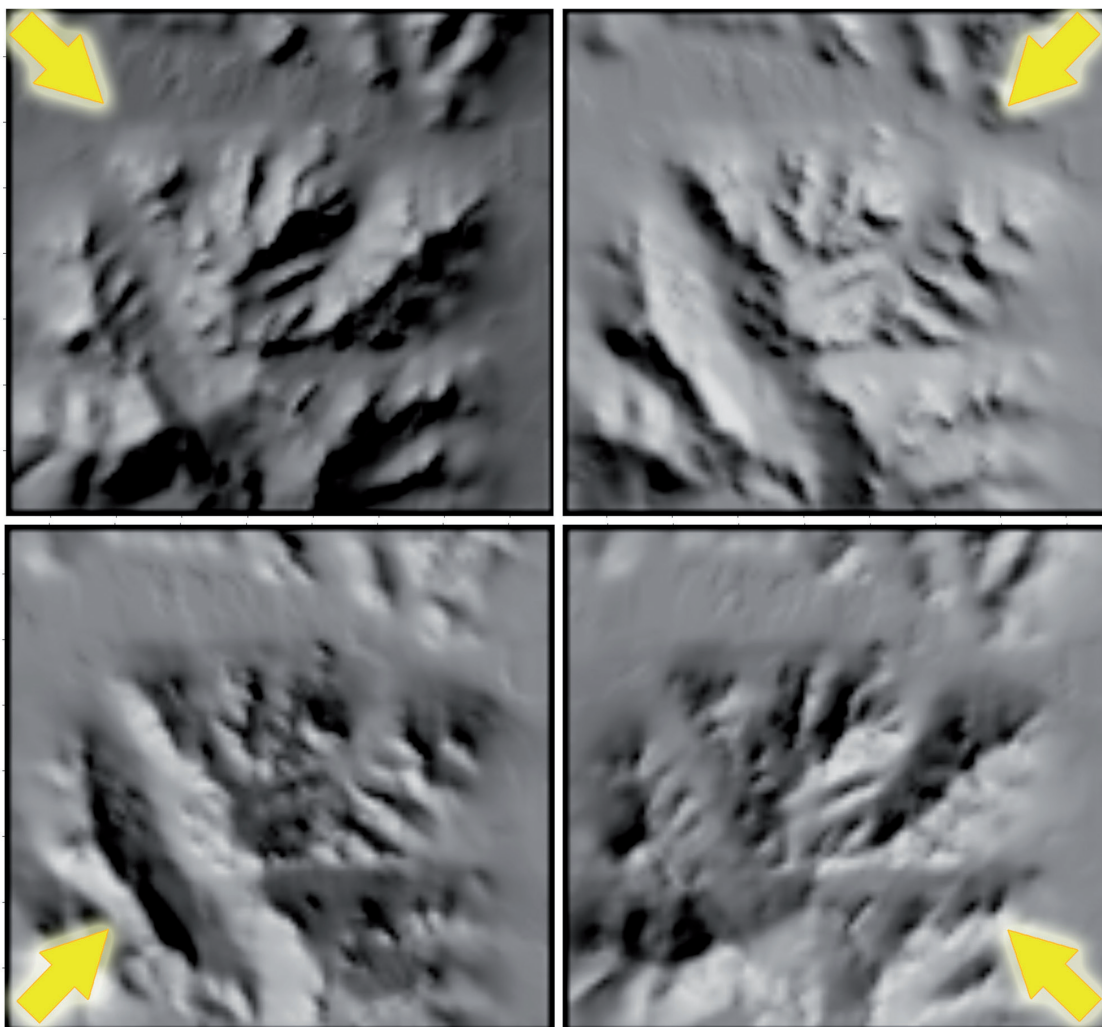


Рис. 5. Построенные карты района УГМ с теневым рельефом для разного положения источника света. Стрелками показано расположение источника и направление падения света

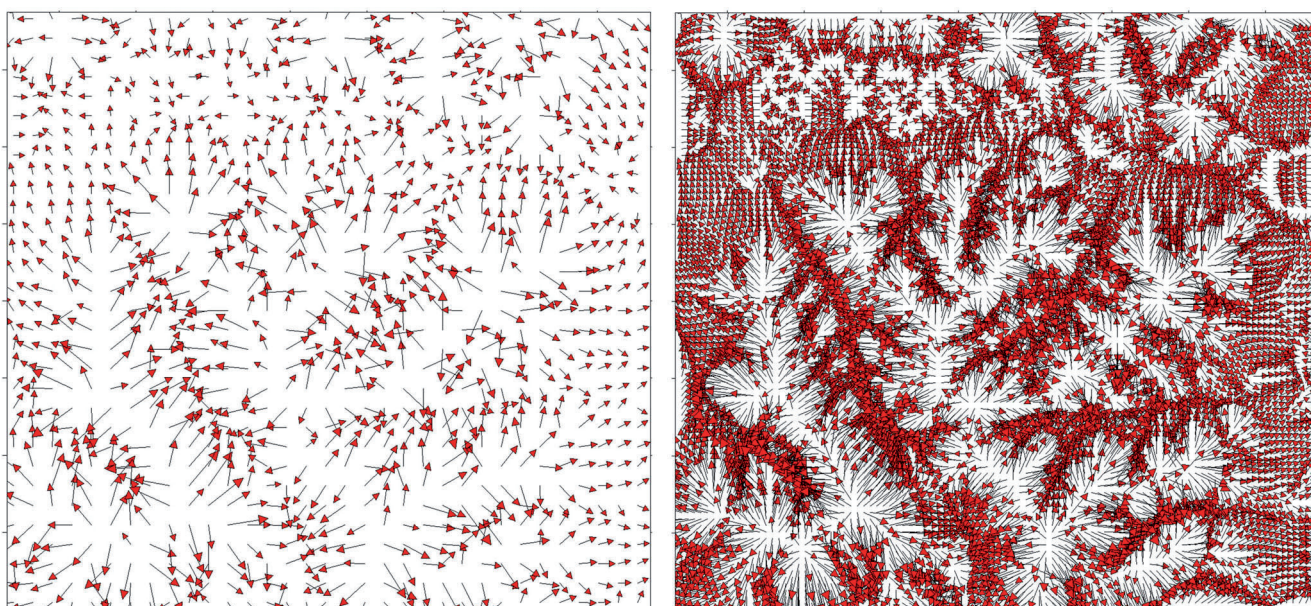


Рис. 6. Карты векторов для территории УГМ с разной плотностью объектов (количества векторов). При малой плотности (слева) выявляются только крупные линейаменты, при увеличении плотности (справа) проявляются даже незначительные линейные элементы рельефа

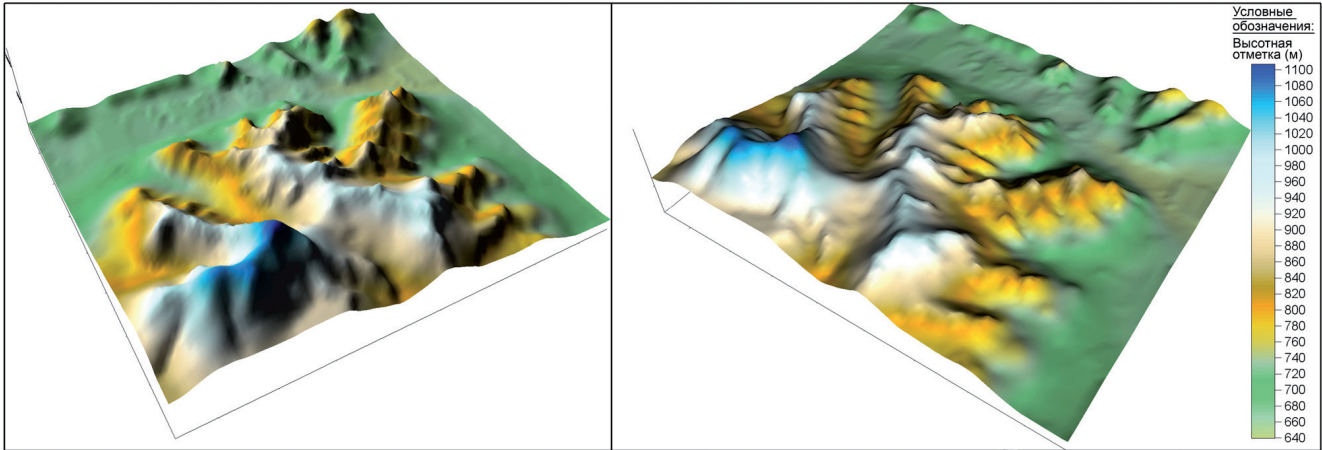


Рис. 7. Трехмерная цифровая модель рельефа GRID района УГМ

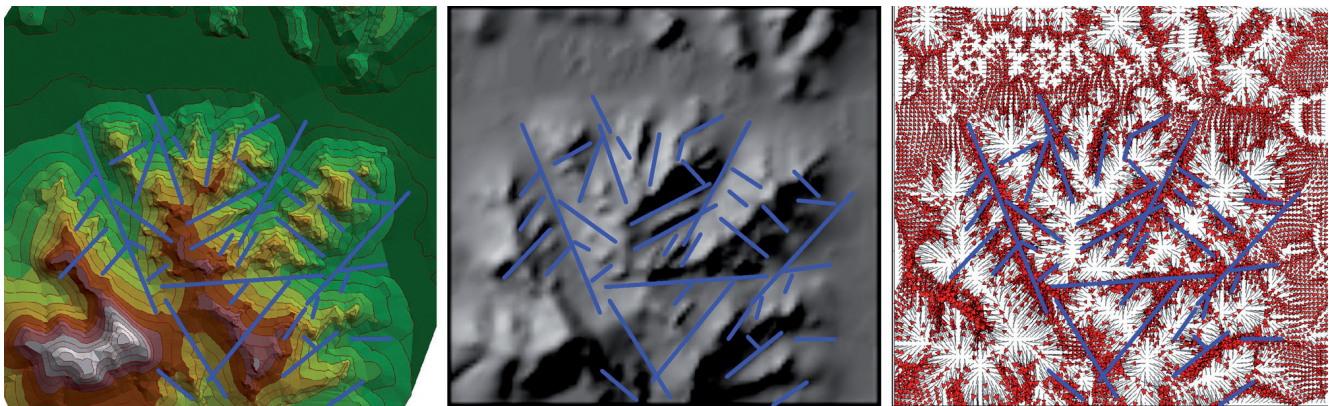


Рис. 8. Совокупность линеаментов (синие линии), выявленных по различным типам вспомогательных карт и цифровым моделям рельефа

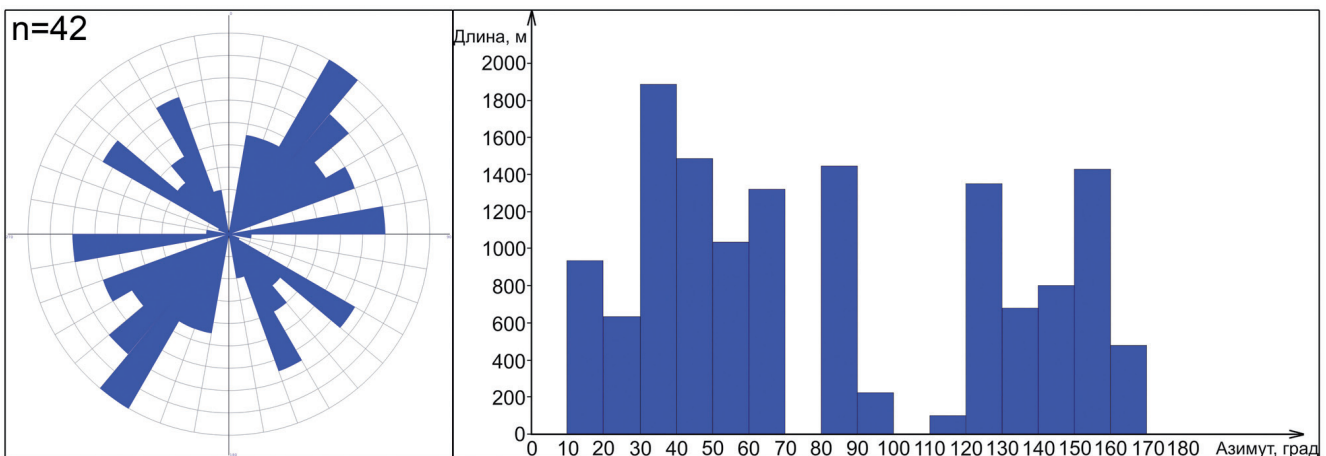


Рис. 9. Роза-диаграмма простирания выявленных линеаментов и гистограмма зависимости длины линеаментов от их азимутов простирания (n – количество использованных для построения объектов)

то есть длины лучей роз-диаграмм по различным направлениям пропорциональны количеству или сумме длин линеаментов данных интервалов простираний. Это позволило оценить проявленность, выраженность и значимость на площади всех линеаментов.

После анализа розы-диаграммы и гистограммы соотношения значений азимутов и длин

линеаментов можно сделать вывод, что выявленные линеаменты имеют простирание в четырех основных направлениях. Наибольшую протяженность имеют линеаменты СВ–ЮЗ простирания, при этом они также отчетливо выражены в рельефе. Несколько меньшую протяженность имеют линеаменты ССЗ–ЮЮВ простирания, но при этом они максимально

выражены в рельефе, в отличие от остальных систем линеаментов. Гораздо слабее выражены, но не менее значимы, две оставшиеся системы: СЗ–ЮВ и субширотного простирания.

Если сравнить ориентировку и положение выявленных линеаментов с уже известными на данной территории геологическими структурными зонами и крупными глубинными разломами (рис. 10), то очевидно, что наиболее протяженная система линеаментов СВ–ЮЗ простирания соответствует глубинному разлому СВ–ЮЗ простирания, расположенному в юго-восточной части массива. Кроме того, эта самая протяженная система линеаментов, вероятно, соотносится с зоной первичных пластических деформаций, представленной бластомилонитами и бластокатаклазитами.

Система линеаментов ССЗ–ЮЮВ простирания, вероятно, взаимосвязана с зоной глубинного разлома, расположенного на западе гранитного массива. Система линеаментов субширотного простирания отражает направление зоны глубинного субширотного разлома, прослеженного геофизическими методами на севере массива вдоль пади Уртуй. В пределах самого массива в зоне скопления линейных элементов рельефа данной ориентировки отсутствуют какие-либо установленные геоструктуры. Из этого можно сделать предположение, что вытянутая линейная область концентрации линеаментов субширотной ориентировки маркирует наличие еще одного глубинного разлома. Система линеаментов СЗ–ЮВ простирания не связана с крупными геологическими структурами. Линеаменты данной ориентировки многочисленны, но все они непротяженные. Вероятно, они представляют собой структуры оперения более крупных разломов, либо являются элементами ландшафта и имеют нетектоническое происхождение (например, сугубо эрозионное, не имеющее какой-либо связи с геологическими структурами). Данные предположения должны быть проверены полевыми наблюдениями. Также следует отметить, что слабое отражение в ориентировке и положении линеаментов на территории массива нашла зона субмеридионального разлома, расположенная на его восточном фланге. Этот факт также должен быть проверен полевыми геоструктурными исследованиями в сочетании с геофизическими и буровыми изысканиями ввиду того, что эта разломная зона является в настоящее время наиболее гидравлически активной.

Выводы

На основе детального построения двух типов цифровых моделей рельефа (TIN и GRID) становится возможным быстрое получение информации о морфометрических показателях (высота, угол наклона,

экспозиция склона) в любой точке модели. Появляется возможность анализировать эти показатели и оперативно создавать соответствующие вспомогательные карты.

Линеаментный анализ, проведенный по созданным цифровым моделям рельефа и сопутствующим картам, позволил с высокой степенью достоверности выявить в рельефе территории Уртуйского гранитного массива (юго-восточное Забайкалье) линейные протяженные элементы – линеаменты, которые отражают положение большинства зон глубинных разломов и их оперяющие структуры.

Дальнейшие исследования территории Уртуйского гранитного массива необходимо ориентировать на оценку достоверности картирования разрывных нарушений и выявленных линеаментов, отображенных на всех картах, схемах и цифровых моделях рельефа, полученных в результате ранее проведенных работ. Необходимо изучить и провести интерпретацию геофизических, петрографо-минералогических и специальных (ландшафтных, литолого-фациальных, гидрогеологических, структурно-петрофизических инженерно-геологических и геоэкологических) карт, разрезов и моделей. Полученные посредством дистанционных методов данные нуждаются в подтверждении полевыми наблюдениями.

Ранее для отобранных образцов Уртуйского гранитного массива был осуществлен пространственный анализ ориентировок микроструктурных маркеров – планарных систем флюидных включений [4], а также основных разломно-трещинных зон. С учетом этих материалов и благодаря результатам линеаментного анализа впервые установлена взаимосвязь между геометрическими параметрами (удельная плотность и удельная протяженность) разрывных систем различных масштабных уровней (километры, метры, сантиметры и миллиметры) [5]. Использование полученных геоструктурных данных позволит в дальнейшем осуществлять концептуальное и числовое моделирование процессов фильтрации флюидов и транспорта радионуклидов, происходящих в сети разномасштабных взаимосвязанных геологических структур на фоне деформаций и метасоматического преобразования кристаллических пород. Кроме того, на основе полученных данных в сочетании с результатами измерения положения структур других масштабных уровней может быть решена задача анализа тектонических полей напряжений различных рангов [9]. В практике структурно-геологических и тектонофизических исследований подобная задача является одной из основных.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН «Развитие интегрированной информационной системы для пространственно-

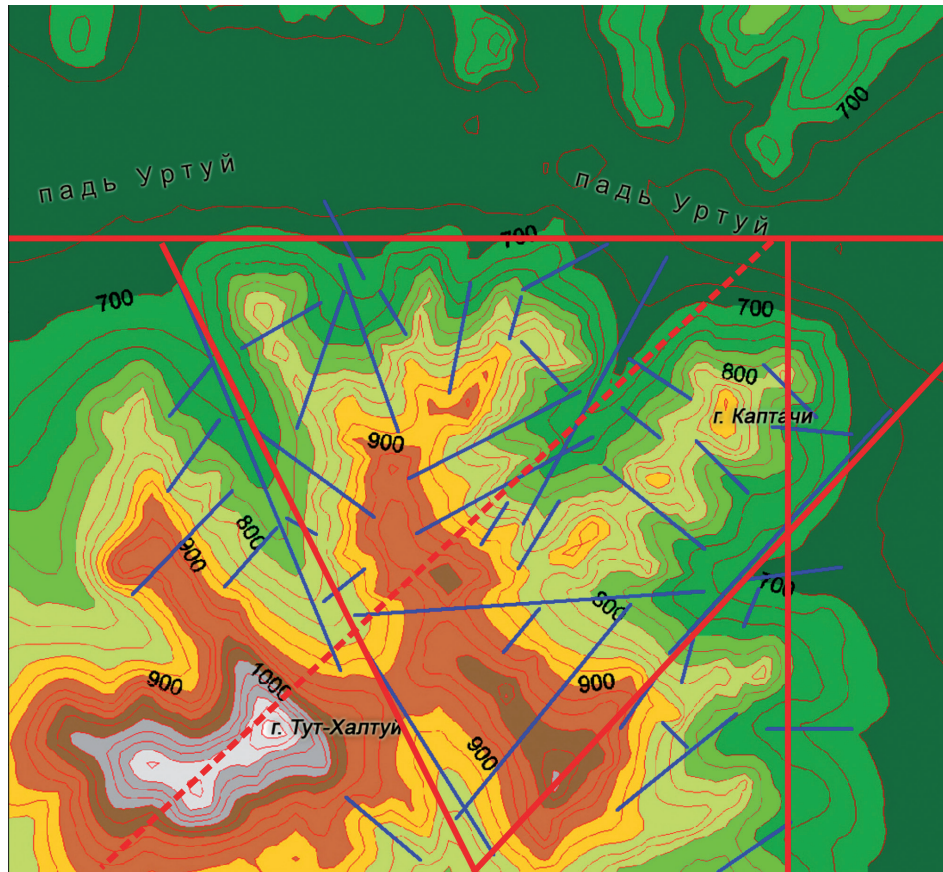


Рис. 10. Ориентировка и положение выявленных линейментов (сплошные синие линии), известных разломных зон (сплошные красные линии) и зоны пластических деформаций (прерывистая красная линия) на территории УГМ

временного моделирования рудных объектов и рудообразующих процессов на основе ГИС технологий».

Ключевые слова: цифровые модели рельефа, линейментный анализ, ГИС-технологии, Уртуйский гранитный массив.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоинформатика : учебн. для студ. вузов / под ред. В.С. Тикунова. – М. : Академия, 2005. – 480 с.
2. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейментной тектоники. – М. : Недра, 1986. – 144 с.
3. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. – М. : Научный мир, 2003. – 64 с.
4. Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 2. – С. 99-126.
5. Петров В.А., Леспинас М., Полуэктов В.В., Устинов С.А., Минаев В.А. Ремасштабирование флюидопроводящих разрывных структур // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : мат-лы XVI Междунар. конф. – М. : ИГЕМ РАН, 2015. – С. 216-220.
6. Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. – 1991. – № 4. – С. 44-46.
7. Силкин К.Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer 8 : учебно-методич. пособие для вузов. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2008. – 66 с.
8. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля Забайкалья / Л.П. Ищукова, И.С. Модников, И.В. Сычев и др. – Иркутск : Типография Глазковская, 2007. – 260 с.
9. Устинов С.А. Эволюция поля напряжений-деформаций Уртуйского гранитного массива (ЮВ Забайкалье): реконструкции на основе микро- и макроструктурных методов // Новое в познании процессов рудообразования : мат-лы Второй науч. молодежн. школы. – М. : ИГЕМ РАН, 2012. – С. 187-190.
10. Устинов С.А., Петров В.А. Применение ГИС-технологий для микроструктурного анализа в геологии // Геоинформатика. – 2015. – № 2. – С. 33-46.
11. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа : учебное пособие. – Томск : Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.