

ПРОГНОЗНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РУДНЫХ ПОЛЕЙ АНАЛИЗОМ ДАННЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ (НА ПРИМЕРЕ РУДНЫХ РАЙОНОВ ПРИМОРЬЯ)

С. Л. Шевырев

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток*

Поступила в редакцию 14 августа 2012 г.

Аннотация. *Рассматривается методика прогнозного минерогенического исследования, выполняемая анализом данных спутниковой радарной интерферометрической съемки (SRTM). Прогноз рудоперспективности площадей для экспресс-оценки потенциальной рудоносности территорий выполняется с применением нейросетей прямого распространения.*

Ключевые слова: *географические информационные системы, тектоническая активизация, рудные месторождения, анализ изображений.*

Abstract. *The method of prospective mineragenic research of satellite radar topographic mission (SRTM) data is reviewed. Ability of image's elementary cells classification of the remote data with the sign of "potential ore-bearing" is considered. The prospective model, which is built with wide usage of artificial neural network, is done. This model can be used in prospective dividing into the districts.*

Key words: *geological information systems, tectonic activization, ore deposits, image analysis*

Введение

В практике регионального металлогенического прогноза для повышения эффективности использования дистанционных данных необходимо усовершенствование методики их обработки. Решение этой проблемы возможно, в том числе, редуцированием субъективного фактора. При дистанционном исследовании рудоносных гидротермальных систем, связанных с полями трещиноватости, накопление субъективных искажений происходит при первичной обработке изображения, его дешифрировании, дальнейшем анализе выделенных структурных элементов еще до обнаружения геологических обстановок, благоприятных для развития оруденения.

Для устранения влияние восприятия исследователя на результат оценки, функции первичной обработки дистанционных изображений, их распознавания, параметризации и классификации потенциально перспективных площадей можно возложить на компьютерную программу. В настоящее время в прогнозных геологических исследованиях применяются специализированные программные продукты линеаментного анализа, использование которых, однако, сопряжено с рядом особенностей. Эти программы недешевы, узко

специализированы, кроме того, пользователь, как правило, сильно ограничен в выборе и настройке алгоритмов распознавания. Такое обстоятельство может стать причиной затруднений в интерпретации карты линеаментов, получаемой в результате использования программы. Кроме того, не следует забывать, что природа линеаментов дистанционного изображения различна и может не иметь прямой связи с геологическими структурами и рудоносностью. В ряде случаев необходимость выделения линеаментов продиктована, скорее, традициями в методике геологического исследования. Такой традиционный подход требует описывать сложные узоры, которые образуют в дистанционном изображении разрывные нарушения, совокупностью прямых линий – линеаментов различного порядка. «Линеаментный редуционизм», иногда, вероятно, оправданный, накладывает ограничения на объективность исследования, его воспроизводимость, а равно и достоверность получаемых результатов.

Методика исследования

Настоящая работа использует принципиально отличающийся подход к дистанционному изучению геологических объектов. В основе исследования лежит представление о *продуктивной гидротермальной системе* – участке земной коры, обладающей такими свойствами трещин-

ной перколяционной структуры, которая позволяла рудоносным флюидам мигрировать, а при наличии благоприятных условий формировать промышленно значимые рудные скопления. Гидротермальная система, служащая инфраструктурой для передачи эндогенной энергии и вещества, является *диссипативной структурой* (в теории Пригожина И.Р. [1]), а, следовательно, обладает структурными параметрами организации, которые могут быть количественно учтены [2]. Многими исследователями подчеркивалось, что “сами по себе фрактальные узоры физической нагрузки не несут, но будучи распределенными, т.е. зафиксированными сложно организованным веществом, фракталы становятся индикаторами динамических условий зарождения” [2]. О возможности применения фрактальной размерности, как количественной описательной характеристики для распознавания графических образов также указывалось и зарубежными специалистами [3]. В нашей работе рассматривается узор радарного интерферометрического изображения, как образ природного объекта – рельефа Земли, сформированного в результате взаимного воздействия экзогенных и эндогенных сил. Объективное исследование дистанционных изображений может быть сведено к количественному описанию образов и соотнесения этого описания с искомым полезным признаком.

Как и в прежде проведенных нами исследованиях [4], целью является изучение парагенезисов структурных параметров (структурных паттернов) дистанционного изображения, сопровождающих гидротермальное оруденение. Отличие заключается в параметризации не линеаментов, а структурных кластеров дистанционного изображения.

Для апробирования предлагаемой методики, в качестве полигона, был выбран наиболее изученный в Приморье Дальнегорский рудный район (рис. 1).

Дальнегорский рудный район расположен вблизи побережья Японского моря на площади внутренней зоны Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса (ВСАВПП), формирование которого связывается с процессами субдукции Тихоокеанской плиты под восточную окраину Азиатского континента, происходившими в позднем мелу-палеоцене [5]. Район находится в центральной части Таухинской металлогенической зоны (ТМЗ) и характеризуется преимущественным сосредоточением месторождений свинца и цинка разного типа (скарнового, жильного,

прожилково-вкрапленного порфирового), а также присутствием месторождений бора, олова, серебра и золота.

В целом для ТМЗ характерно весьма сложное строение с участием разновозрастных геологических комплексов, принадлежащих двум структурным этажам, покровно-складчатому фундаменту и вулканогенному чехлу [4].

В качестве источника дистанционных данных использованы материалы радарной интерферометрической съемки земного шара (SRTM, Shuttle Radar Topographic Mission), распространяемой в виде сети с ячейкой 3 угловые секунды с пространственным разрешением 90 м [6]. В отличие от фотографических и телевизионных космических изображений Земли, данные SRTM содержат, почти исключительно, информацию о рельефе, относительных превышениях, характере гидросети, выраженных геологических структурах. Это делает SRTM хорошим материалом для региональных структурно-геологических, а значит, и прогнозных исследований. Для анализа изображений применялась аналитическая платформа Mathworks Matlab, являющаяся мощным инструментом анализа изображений, матричных, статистических расчетов и прогноза. Были использованы следующие пакеты Matlab: Image Processing Toolbox, Neural Network Toolbox. Расчет фрактальной размерности Минковского производился с помощью функций пакета Boxcount (автор Frederic Moisy). С помощью авторского специализированного расширения ГИС MapInfo, WinExporter, выполнялся экспорт квадратных окон осреднения (5км x 5км) в пределах площади интереса по мозаике данных SRTM (в формате geotiff) с созданием атрибутивной таблицы данных.

Для экспортированных фрагментов производилась обработка в Matlab. Изображение загружалось, далее с помощью подпрограммы *edge* (служит для выявления контрастных границ в MatLab), взятой с параметром *canny*, выделялись границы, затем подпрограммой *bwlabel* (программа объединения связанных участков изображения) выполнялась их кластеризация, т.е. определение 8-связных регионов изображения (рис. 2). Выделяемые таким образом кластеры соответствуют бровкам врезов речных долин и описывают геометрию гидросети.

Для совокупности кластеров подпрограммой в Image Processing Toolbox рассчитывались простые морфологические характеристики фрагмента изображения, а с помощью пакета *boxcount* – его

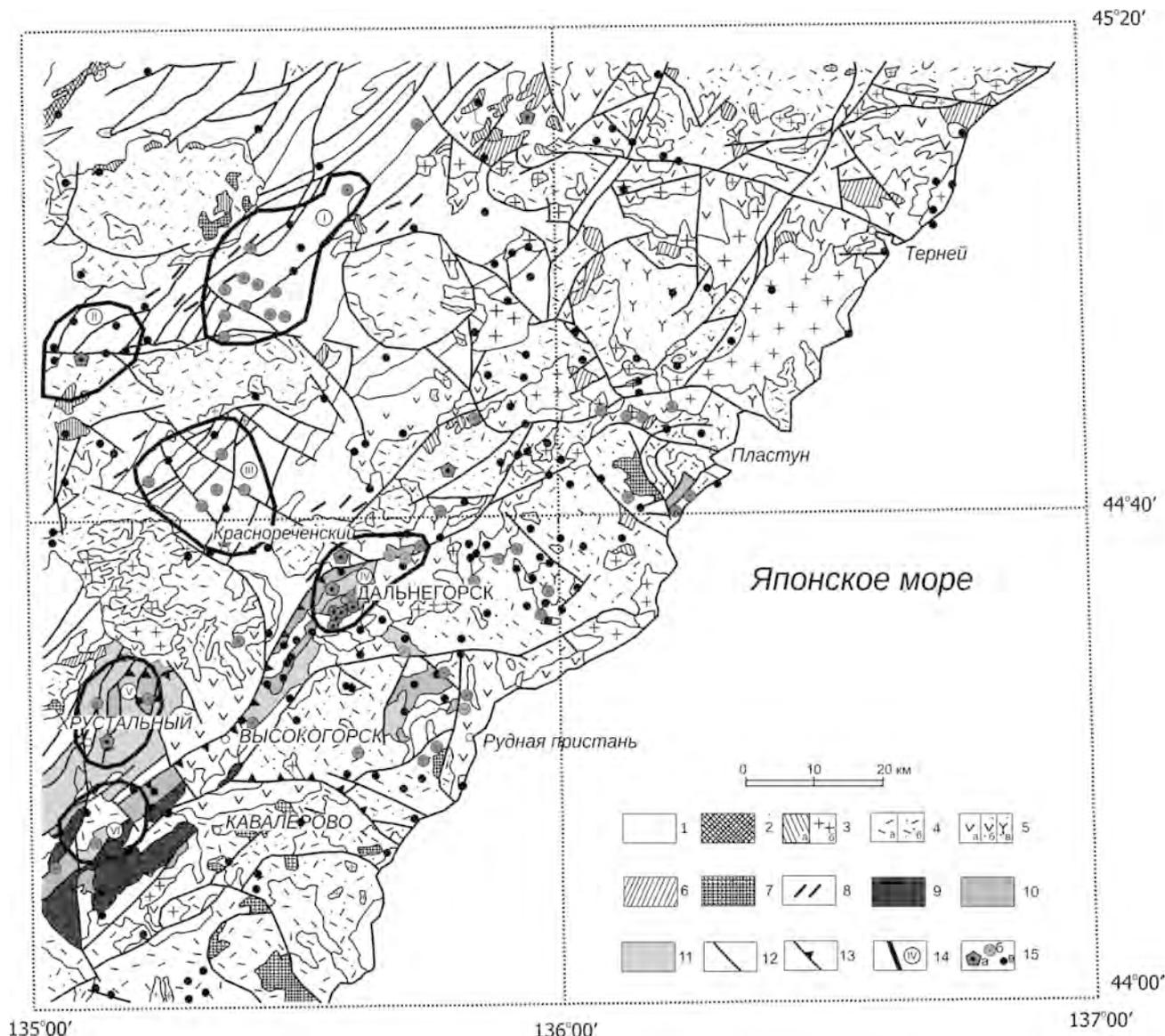


Рис. 1. Схема геологического строения Дальнегорского района и прилегающих территорий. Обозначения: 1 – терригенные породы фундамента ВСАВП; 2, 3 – интрузивные породы верхнего мела; 4 – верхнемеловые риолиты (а) и туфы риолитов (б); 5 – субвулканические и вулканические породы нижнего и верхнего мела (а – андезиты, б – их туфы, в – вулканиты разного состава); 6 – субвулканические андезиты и андезибазальты верхнего мела; 7 – палеогеновые андезиты, дациты, андезибазальты; 8 – дайки риолитов (палеоген); 9–11 – аккреционные терригенно-карбонатные и кремнистые комплексы: 9 – пермские, 10 – триасовые, 11 – юрские; 12 – разрывные нарушения; 13 – надвиги; 14 – рудные узлы 15 – рудные: а – месторождение среднее, б – месторождение малое, в – рудопроявление

фрактальная размерность (D_m). В дальнейших расчетах применялись характеристики: плотность заполнения кластерами (P_l), изотропность ориентировок длинных осей эллипсов, описанных около кластеров (I_s) и фрактальная размерность Минковского, вычисленная для узора, образованного кластерами (D_m). Фрактальная размерность Минковского [по 3], найденная для узора кластеров элементарного участка изображения, отража-

ет предел отношения минимального числа $N(\epsilon)$ элементов размера ϵ , стремящегося к 0:

$$D_m = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \epsilon} \quad (1)$$

Для определения перспективности территории в отношении обнаружения рудных месторождений использовалась следующая методика. На эталонной территории рудные объекты гидротер-

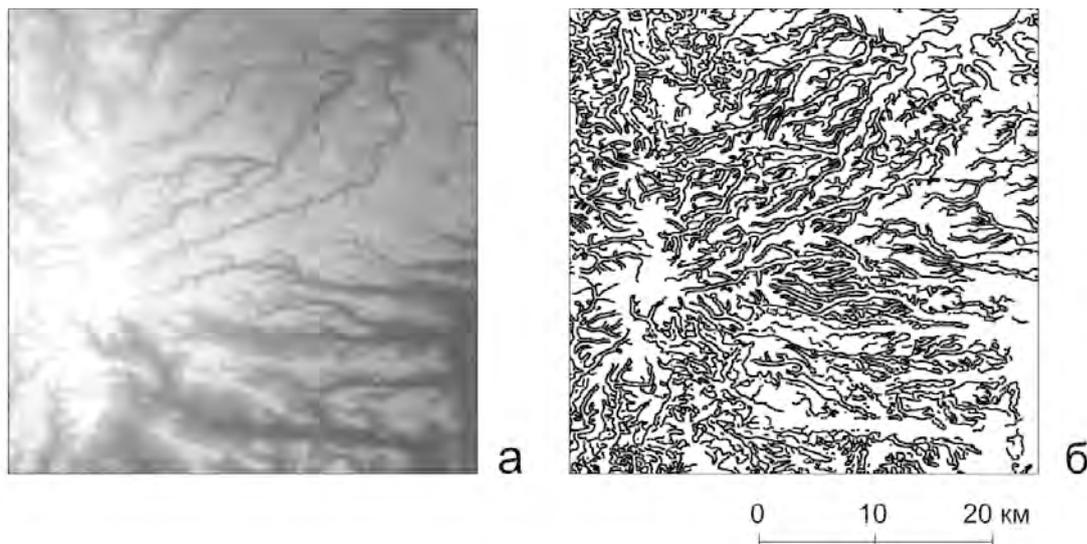


Рис. 2. Результат кластеризации данных радарной интерферометрии (SRTM) в Image Processing Toolbox: а – исходное изображение, б – преобразованное изображение

мального генезиса выносились на карту, им присваивались значения условной «относительной рудоносности», пропорциональной количеству запасов полезного ископаемого на этих объектах. Затем центру каждого из окон осреднения, по которым подсчитывались структурные параметры изображения, присваивалось распределенное по площади значение «относительной рудоносности». С помощью пакета NeuralNetworksToolbox создавалась нейросеть, которая обучалась распознавать перспективные в рудоносном отношении площади с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (Rprop), сопоставляя с значениями структурных параметров. Для контроля качества обучения применялось построение регрессии по случайной тестовой выборке (5 % от генеральной совокупности), не участвующей в обучении. Если коэффициент корреляции был $R < 0,3$ (слабая связь), сеть конфигурировалась и обучалась заново, после чего тест повторялся. Сеть, показавшая $R > 0,3$, применялась для прогноза на территории с близкой структурно-тектонической ситуацией. На создаваемой при этом карте прогнозной рудоносности «потенциально рудоперспективными» считались участки, со значениями прогнозируемой нейросетью «относительной рудоносностью», превосходящей среднее значение.

Результаты исследования

Подготовленная нейросеть была применена для большей территории, которая включила кроме части Таухинской металлогенической зоны

(региона, задействованного для обучения) также части Журавлевской и Кемской металлогенических зон. В результате, по данной территории были составлена схема прогнозной относительной рудоносности, которая показала совпадение или пространственную близость относительных максимумов прогнозной рудоносности с основными рудными узлами и большей частью известных рудных объектов (рис. 3). Это позволило сформулировать выводы о применимости данных SRTM и аналитического аппарата MatLab в дистанционном прогножном исследовании.

Выводы

Обучение нейронной сети на эталонном рудоносном районе, охарактеризованном структурными параметрами по данным SRTM, и последующее приложение модели к сопредельной территории, показало применимость такого способа исследования для выделения площадей с потенциально высокой гидротермальной рудной минерализацией (см. рис. 3). После апробации методика может быть рассмотрена, как способ прогнозной минералогической экспресс-оценки территорий. Необходимо, однако, решение вопроса выбора эталонной территории, по которой обучением нейронной сети выполняется ассоциирование узоров земной поверхности в радарном отображении и инфраструктуры флюидопроводящей системы. Очевидно, что ведущую роль в выборе эталонной территории должны играть общность условий историко-геологического развития и минералогической

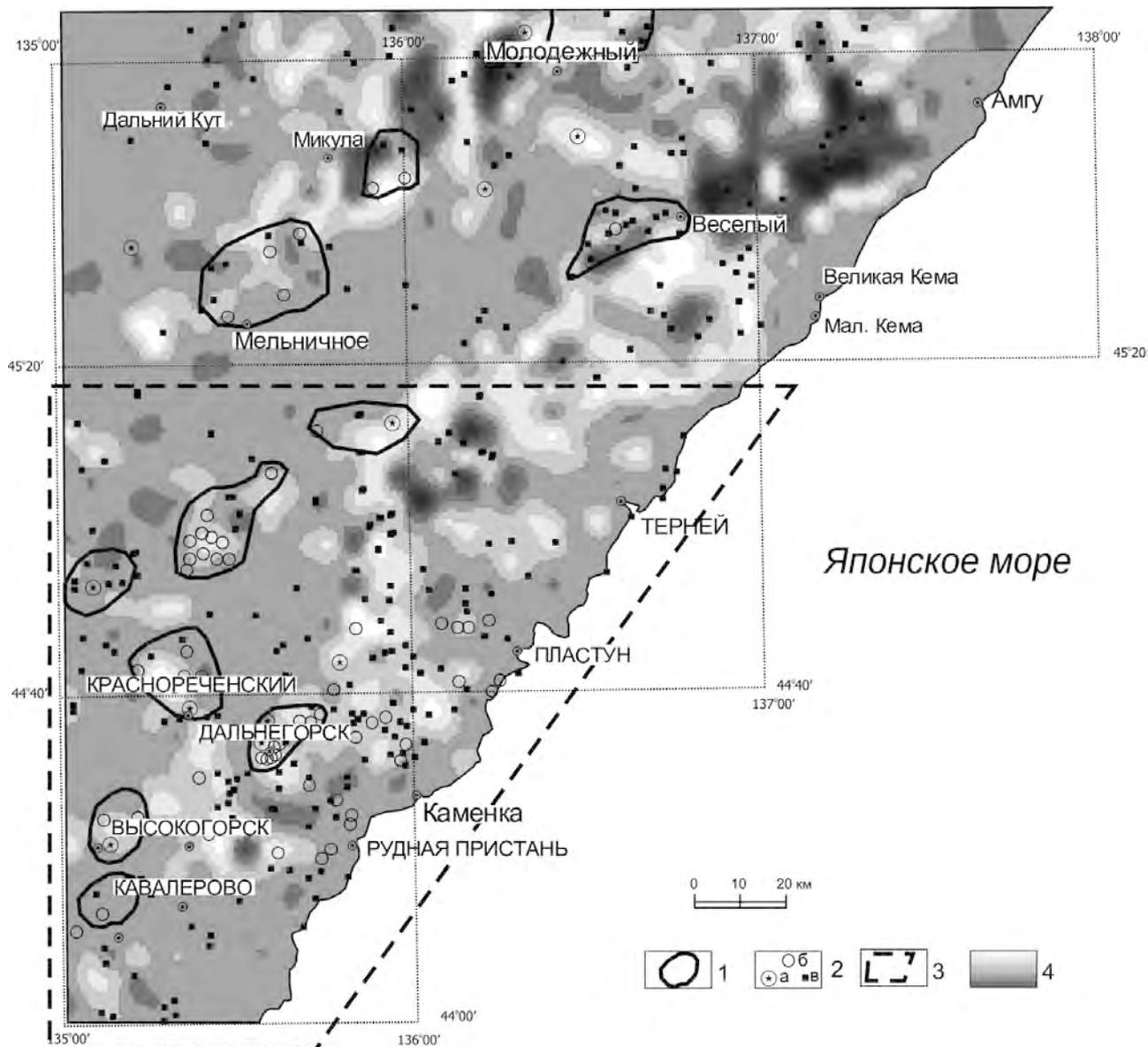


Рис. 3. Распределение «потенциально перспективных» рудоносных площадей в пределах района исследований: 1 – контуры известных рудных узлов; 2 – локальные рудные объекты (а – месторождение среднее, б – месторождение малое, в – проявление); 3 – территория, в пределах которой выполнялось обучение нейросети; 4 – «относительная рудоперспективность», более светлая окраска означает большую прогнозируемую перспективность

специализации, что, возможно, сделает данную методику прогнозным приложением террейново-го минерагенического анализа.

Автор выражает свою искреннюю благодарность д-ру физ.-мат. наук А.Н. Четырбоцкому за неоценимую помощь и консультации при подготовке данного материала.

Проект выполнен при финансовой поддержке Президиума РАН и ДВО РАН (проекты № 12-I-P27-02, № 12-3-A08-159)

ЛИТЕРАТУРА

1. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М. : Мир, 1973. – 280 с.
2. Горяинов П. М. Геологические узоры и структура пространства архейских железорудных формаций. Синергетические принципы геологического анализа. Статья 2 / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2012. – № 1. – С. 9.
3. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. – М. : Постмаркет, 2000. – С. 353.

4. *Шевырев С. Л.* Анализ рудоносности гидротермальной системы исследованием структурных паттернов полей трещиноватости (Дальнегорский рудный район, Приморье) / С. Л. Шевырев, В. Г. Хомич // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2012. – № 1. – С. 173–181.

5. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Т. 1/2 / под ред. А. И. Ханчука. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 982 с.

*Дальневосточный федеральный университет,
Дальневосточный геологический институт ДВО
РАН*

С. Л. Шевырев, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник

Тел. 8-924-524-51-72

shevyrev@fegi.ru

6. *Farr T.* The Shuttle Radar Topography Mission / T. Farr [et al.] // *Reviews of Geophysics*, Vol. 45, RG2004 – 2007. – URL: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf (дата обращения: 21.09.2012).

Far East Federal University,

Far East Geological Institute

S. L. Shevyrev, Candidate of science (PhD), scientist

Tel. 8-924-524-51-72

shevyrev@fegi.ru