

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЛЕОГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ ПРИМОРЬЯ)

С. Л. Шевырёв<sup>1</sup>, Г. А. Анциферова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Дальневосточный Федеральный Университет (ДФУ), Владивосток*

<sup>1</sup> *Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН)*

<sup>2</sup> *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 11 ноября 2016 г.

**Аннотация:** рассматриваются вопросы моделирования древних полей главных и скалывающих тектонических напряжений, а также связанных с ними деформаций, приводящих к формированию палеогидротермальных рудообразующих систем в приложении к дистанционному анализу минерагении подвижных поясов. На примере Нижнетаежного рудного района производится компьютерная реконструкция формирования инфраструктуры палеогидротермальной системы.

**Ключевые слова:** геоинформатика, компьютерное моделирование, гидротермальные системы, моделирование тектонических процессов.

### COMPUTER MODELING OF PALEOHYDROTHERMAL SYSTEMS INFRASTRUCTURE FORMATION WITH SPACE DATA (ON A SAMPLE OF PRIMORIE)

**Annotation:** modeling of ancient fields of both principal and shear tectonic stresses and related strains are considered as producers of hydrothermal systems for applications of remote sensing analysis of folded belt's minera-geny. Computer reconstruction of paleohydrothermal system's infrastructure formation has been performed on a sample of Nizhnetaezhny ore node.

**Key words:** Geoinformatics computes modeling, hydrothermal systems, modeling of tectonic processes.

#### Введение

При минерагеническом анализе материалов дистанционных съемок Земли для уточнения локализации потенциально перспективных участков важно выявление природы и генезиса дешифрируемых рудоконтролирующих структур. При этом следует отметить недостаточное освещение в отечественной литературе генетических реконструкций процессов формирования рудоконтролирующих структур, которые могут быть комплексированы с данными дистанционных исследований. Можно утверждать, что основные исследовательские усилия при дистанционном анализе связаны с проблемами распознавания изображения и выделения его элементов, а также подбором методики, наилучшим образом производящей выделение структурно-геологической составляющей снимка. Ранее нами рассматривались проблемы дешифрирования рудопроводящих структур выражавшихся как в виде «регулярных» (линейных, кольцевых, дуговых), так и «нерегулярных» (реγμα-тическая сеть) объектов [1, 2]. В наших предыдущих работах предлагалось использовать компьютерное моделирование для имитации движения жидкости

через трещинную структуру [2].

Для понимания условий формирования рудопроводящих структур и локализации перспективных площадей важно численно воссоздать условия их формирования. Исследовательским инструментом в этом случае может служить программа PDE toolbox, входящая в пакет Mathworks Matlab.

#### Геологические особенности района исследований

В строении рассматриваемой территории Приморья участвуют юрско-меловые тектоно-седиментационные комплексы Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП), несогласно перекрытые чехлом из мел-палеогеновых эффузивно-пирокластических накоплений Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса. Фундамент последнего сформировался в ходе субдукции и скольжения в мегазоне взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит [3]. В объеме САОП выделяют (с запада на восток) несколько разнотипных и разновозрастных террейнов [4, 5]: аккреционный Самаркинский (юра), турбидитовый Журавлевский (юра-ранний мел), аккреционный Таухинский (неоком) и островодужный

Кемский (баррем-альб). Подробное геологическое описание указанных террейнов содержится в публикациях В. В. Голозубова, И. В. Кемкина, А. И. Малиновского, В. В. Раткина, В. П. Симаненко, других сотрудников ДВГИ ДВО РАН и обобщающей монографии [3].

При анализе структурно-вещественных парагенезисов важно установить кинематику процессов формирования рудопроводящих структур.

С трансформным режимом межплитного взаимодействия связано формирование крупных левосторонних сдвигов северо-восточного простирания (Центральный Сихотэ-Алинский, Арсеньевский, Прибрежный и другие). При этом, для внедрения интрузий и инфильтрации флюидов могут представлять интерес ортогональные структуры второго и более высоких порядков, формирующие зоны

разуплотнения.

Даже беглое рассмотрение вероятных проницаемых зон – кластеров паттернов трещиноватости (структурных рисунков), полученных анализом радарного изображения (ЦМР SRTM) и известных разломов, позволяет установить два основных их направления – северо-восточное и северо-западное (рис. 1).

При этом отмечается существенная конформность размещения рудных объектов и кластеров дешифрированных проницаемых паттернов. Вызывает практический интерес и решение “обратной задачи” – нахождения площади сформированных проницаемых зон, ортогональных основным тектоническим нарушениям при заданных амплитудах перемещения по сдвигу и механических свойствах вмещающих пород.

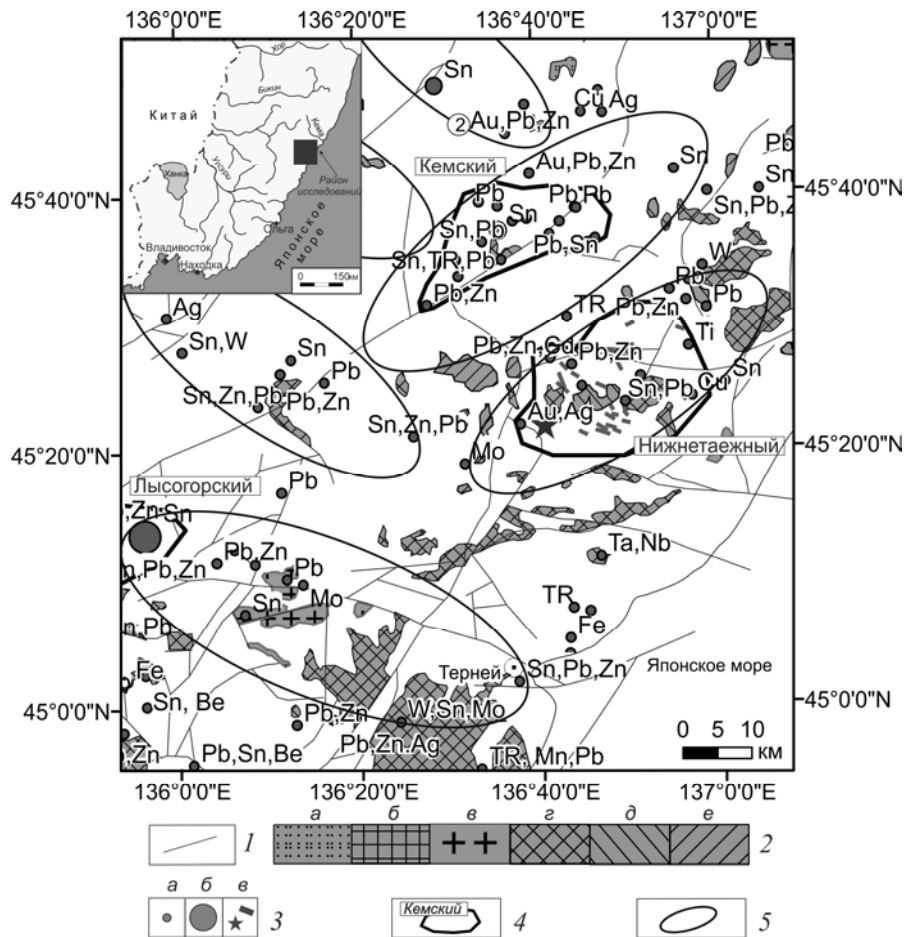


Рис. 1. Положение проницаемых зон по материалам автоматизированного дешифрирования КФС в тектонической структуре территории, по материалам [6, 1]: 1 – разрывные нарушения достоверные; 2 – интрузивные и субвулканические тела (а – гранодиориты и б – граниты бачелазского комплекса, в – гранодиориты и г – граниты приморского комплекса, д – граниты верхнемеловые (К<sub>2</sub>), е – палеогеновые граниты); 3 – рудные объекты (вид сырья показан латиницей): немасштабные (а – рудопроявления, б – месторождения), в – рудные жилы; 4 – рудные узлы; 5 – кластеры проницаемых паттернов.

### Условия моделирования

Поле механических напряжений в твердом теле характеризуется пространственным распределением физических параметров: механического напряжения  $\sigma$  по осям  $x$  и  $y$  и главным направлениям;

напряжения сдвига  $\tau$ , распределения объемной нагружающей силы  $k$ . Для целей моделирования обычно описывают их распределение в бесконечно малом элементарном теле [7] (рис. 2а).

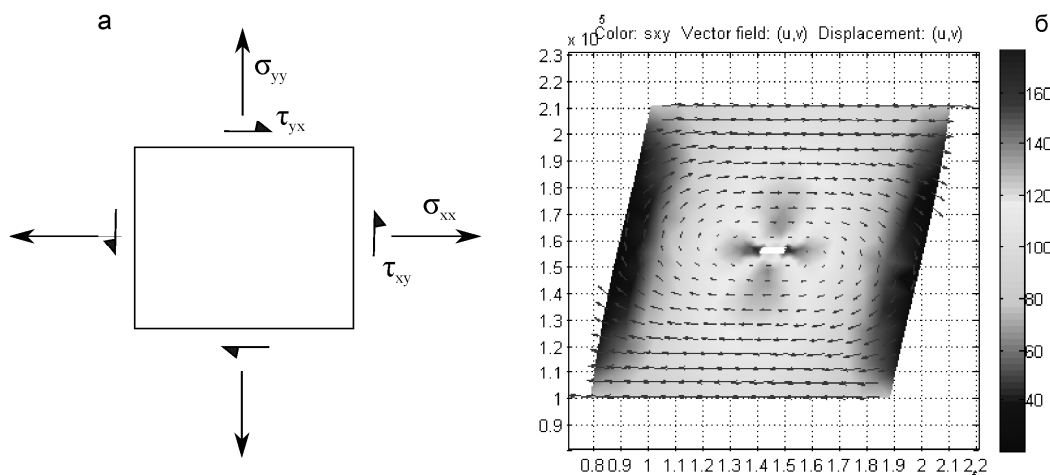


Рис. 2. Модель исследований. Обозначения: а – силы, действующие в двумерном бесконечно малом элементарном теле; б – модель распределения  $\tau$  при правом сдвиге в PDEtoolbox.

Закономерности, которые позволяют сопоставить напряжение и деформацию, связаны с балансом сил в твердом теле. Значение деформаций для стресса на плоскости описывается:

$$-\nabla(c \otimes \nabla u) = k, \quad (1)$$

Где  $u$  – дислокация по оси  $x$ ,  $k$  – вектор объемных сил,  $c$  – четырехтензор, который может быть записан как четыре матрицы размерностью  $2 \times 2$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$ :

$$c_{11} = \begin{pmatrix} 2G + \mu & 0 \\ 0 & G \end{pmatrix}, \quad c_{12} = \begin{pmatrix} 0 & \mu \\ G & 0 \end{pmatrix}, \quad c_{21} = \begin{pmatrix} 0 & G \\ \mu & 0 \end{pmatrix},$$

$$c_{22} = \begin{pmatrix} G & 0 \\ 0 & 2G + \mu \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь буквой  $G$  обозначается модуль Юнга  $G = E / (2(1 + \nu))$ ,  $\nu$  – коэффициент Пуассона, коэффициент  $\mu = 2G\nu / (1 - \nu)$  [8].

В модуле Matlab PDEtoolbox расчетную область представляют в виде совокупности неперекрывающихся двумерных геометрических фигур простой формы, размер которых существенно меньше размеров расчетной области. Такие фигуры обычно называют конечными элементами, составляющими *конечноэлементную сетку*. Вершины конечных элементов представляют собой узлы *конечноэлементной сетки*. В режиме “Boundary mode” (“режим границ”) для границ сетки можно задавать условия фон Неймана или Дирихле. Первые позволяют указывать значение напряжений в каком-либо направлении, вторые позволяют учитывать смещение по осям. Свойства исследуемой среды, которая рассматривается как однородная и изотропная, устанавливаются в режиме “PDE Specification” (“Условия дифференциального уравнения в частных производных”) с помощью значений параметров  $G$ ,  $\nu$  и плотности  $\rho$ . Плотность  $\rho$  игнорируется при расчете эллиптических уравнений (предлагаемых по умолчанию) [9].

Модель распределения  $\tau$ , выраженная в МПа, для правого сдвига амплитудой 2 км по разрыву, построенная в PDEtoolbox, показана на рисунке (рис. 2б).

Использовались следующие значения: модуль Юнга  $G = 0,18 \cdot 10^5$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ . Стрелки демонстрируют направление перемещения вещества при сдвиге. Ясно отмечаются поля сдвиговых напряжений, как параллельные, так и перпендикулярные разрывному нарушению.

### Результаты

Модель деформации геологической среды, вызванной правыми сдвигами, применялась для Нижнетаежного рудного узла (НТРУ), находящегося в Тернейском районе Приморья. Рудные тела, разведанные на этом объекте, сосредоточены в пределах рудных участков (месторождений) (рис. 3).

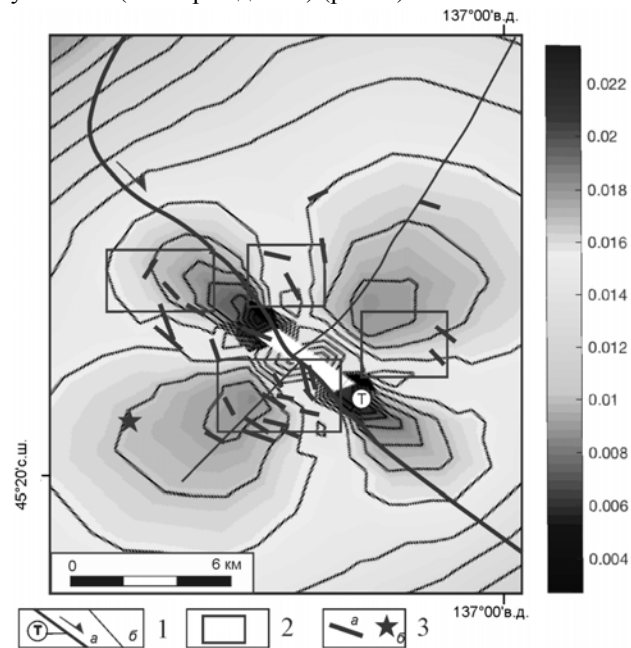


Рис. 3. Модели распределения деформации сдвига для НТРУ (с использованием [10]). Обозначения: 1 – разрывные нарушения (а – Таежный разлом, б – сопряженные с ним разломы); 2 – рудные участки; 3 – рудные зоны (а – достоверные, б – предполагаемое). Цветовая индикация – распределение сдвиговых деформаций.

Таежный разлом, в зоне влияния которого находится НТРУ, имеет северо-западное простирание и является правосторонним сдвигом, что установлено по направлению перемещения вещественных комплексов на крыльях.

Применение полученной в PDE модели распределения сдвиговых напряжений НТРУ показало совпадение осей полей максимальных напряжений (и, соответственно, деформаций) с разломами. К центрам зон деформаций также тяготеют известные рудные объекты узла. Важная роль ортогональных деформаций в формировании инфраструктуры рудных гидротермальных месторождений САОП уже отмечалась исследователями [11]. Рассмотрение проблем формирования трещин, сопровождающих возникновение сдвигов, и их моделирование может служить методической основой для постановки исследований с применением материалов дистанционного зондирования Земли.

### Выводы

Инфраструктура гидротермальных систем Нижнетаежного рудного узла могла быть сформирована в ходе развития трещиноватости, опирающейся разрывные нарушения. Таежная зона разломов, к зоне влияния которой приурочены месторождения НТРУ, по своей кинематике является правосторонним сдвигом. При активизации сдвиговых дислокаций возможно формирования ортогональных зон сжатия и растяжения, проницаемых для гидротермальных растворов и магм. Входящий в пакет Matlab модуль PDEtoolbox (модуль решения дифференциальных уравнений в частных производных) позволяет выполнять расчеты для решения задач распределении напряжений/деформаций на плоскости. Уточнение роли компонентов напряжений в формировании инфраструктуры гидротермальной системы позволяет усилить роль численных методов в региональном прогнозе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шевырев, С. Л. О новых возможностях крупномасштабной прогнозной оценки паттернов дистанционного

изображения на примере Нижнетаежного рудного узла, Приморье / С. Л. Шевырев // Руды и металлы, 2015. – № 2. – С. 56–66.

2. Шевырёв, С. Л. Трещиноватость как выраженность инфраструктуры гидротермальных палеосистем на космических снимках (на примере Сихотэ-Алинского орогенного пояса) / С. Л. Шевырев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 2. – С. 86–91.

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

4. Ханчук, А. И. Геология и полезные ископаемые Приморского края / А. И. Ханчук, В. В. Раткин, М. Д. Рязанцева, В. В. Голозунов, Н. Г. Гонохова. – Владивосток: Дальнаука. – 1995. – 66 с.

5. Юшманов, Ю. П. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня / Ю. П. Юшманов, А. М. Петрицкий // Владивосток: Дальнаука. – 2004. – 111 с.

6. Государственная геологическая карта. М-б 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), (54) – Кавалерово. Объяснительная записка / Под ред. Т. В. Брежнева. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 1994.

7. Pollard, D. D., Fundamentals of structural geology / D. D. Pollard, R. C. Fletcher // Cambridge university press. – 2010. – 516 p.

8. Partial Differential Equation Toolbox. Structural Mechanics Equations // Mathworks. [Электронный ресурс] URL: <http://www.mathworks.com/help/pde/structural-mechanics-equations.html> (Дата обращения: 22.07.2016).

9. Шмелев, В. Е. Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных // Образовательный математический сайт «Exponenta.ru». [Электронный ресурс] URL: <http://matlab.exponenta.ru/pde/book1/> (Дата обращения: 22.07.2016)

10. Ивин, В. В. Геологическое строение и типы эндогенной минерализации Нижнетаежного рудного узла (Приморье) / В. В. Ивин, А. Н. Родионов, В. Г. Хомич, Л. Ф. Симаненко, Н. Г. Борискина // Тихоокеанская геология, 2006. – Т. 25. – № 3. – С. 81–87.

11. Уткин, В. П. Строение, геохронология и структурно-динамические условия вертикального развития Восточно-Сихотэ-Алинского магмо-металлогенического пояса / В. П. Уткин // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 404. – № 5. – С. 659–663.

Дальневосточный Федеральный Университет (ДФУ)  
Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО  
РАН), Владивосток

Шевырев Сергей Леонидович, к.г.-м.н., доцент ДВФУ, научный сотрудник ДВГИ ДВО РАН  
E-mail: shevirev@mail.ru

Воронежский государственный университет  
Анциферова Галина Аркадьевна, доктор географических наук, профессор кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма  
E-mail: g\_antsiferova@mail.ru

Far Eastern Federal University (FEFU)  
Far East Geological Institute (FEGI), Vladivostok

Shevirev S. L., PhD, associate professor of FEFU, researcher of FEGI  
E-mail: shevirev@mail.ru

Voronezh State University  
Anciferova G. A., Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Natural Resources Management, faculty of Geography, Geoecology and Tourism  
E-mail: g\_antsiferova@mail.ru