

## Трехмерное моделирование тектонической раздробленности на территории северного сектора о. Парамушир (Курильские острова)

О.Р. Хубаева<sup>1,2</sup>, М.Д. Сидоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [Khubaeva@kscnet.ru](mailto:Khubaeva@kscnet.ru)

<sup>2</sup>Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>3</sup>Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Существует множество методов, направленных на поиски и изучение зон повышенной проницаемости в земной коре – вероятных путей глубинного теплопереноса к земной поверхности.

Проницаемость определяется трещиноватостью и пористостью горных пород. Одним из методологических подходов является построение трехмерных моделей тектонической раздробленности для отдельных блоков земной коры. Такие модели могут использоваться для интерпретации материалов геологических, геофизических и геохимических исследований, тектонических реконструкций. Модели наглядно демонстрируют положение зон деструкции в приповерхностном слое земной коры, а также позволяют прогнозировать и уточнять геологические структуры и связанные с ними месторождения полезных ископаемых.

### Исходные данные, основные допущения и методика построения модели

Для построения трехмерной модели тектонической раздробленности северной части о. Парамушир использовались карты трещинной тектоники, построенные в результате дешифрирования аэро- и космических снимков различной детальности, а также разномасштабные топографические карты.

Цифровая обработка аналоговых карт проведена с использованием технологии геоинформационных систем (ГИС). Пространственная привязка и векторизация результатов дешифрирования выполнялась программами ArcMap и ArcView. По векторизованным данным создана единая цифровая карта линеаментов северной части о. Парамушир.

Количественно оценить раздробленность геологической среды можно по величине удельной длины разломов УДЛ [2]. УДЛ представляется в виде трехмерной матрицы, из которой формируется объемное (voxel) изображение раздробленности исследованного блока.

Тектоническая раздробленность кубического блока определяется отношением объема всех трещин внутри блока к его объему. Объем трещин определяется как сумма произведений длины ( $l$ ), ширины раскрытия ( $b$ ) и глубины проникновения ( $h$ ) отдельных трещин. Для блока кубической формы с ребром  $a$ , в котором одной из граней является дневная поверхность, коэффициент тектонической раздробленности будет равен  $\Sigma l \cdot b \cdot h / a^3$ . По фотоизображению невозможно определить величины  $b$  и  $h$ , но для конкретной локализованной территории ширину трещин  $b$  можно считать постоянной. Также, учитывая эмпирически установленное правило, что трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [2] и, основываясь на принципах подобия, можно аппроксимировать это правило и для отдельных блоков земной коры. Тогда глубину проникновения трещин  $h$  можно принять равной ребру  $a$ . Таким образом, определяя степень раздробленности как значение удельной длины линеаментов, равной  $\Sigma l / a^2$  верхней грани блока, и увеличивая последовательно размер элементарной ячейки (куба), можно проследить раздробленность на глубину.

Считая реологические свойства среды в ячейке однородными, вычисленные таким образом значения УДЛ относятся к центру куба на глубине  $a/2$ . Подробно алгоритм описан в работах [3, 4, 5].

Построение модели проводилось в несколько этапов. Сначала на карту линеаментов накладывалась квадратная сетка, с размером ячейки  $1 \text{ км}^2$ , в пределах каждой клетки подсчитывалась суммарная длина линеаментов, нормировалась на площадь клетки, полученные значения относились к центрам кубов. Ребро каждого куба составляло 1 км. Так была составлена матрица УДЛ для глубины 0.5 км. За нулевую отметку принимался уровень моря. Потом вводилась поправка на рельеф (высоту центра верхней грани каждого элементарного куба), т.к. верхняя грань каждого куба находится на земной поверхности.

На следующем этапе расчетов размер ребра элементарного куба увеличивался на 200 метров, и вся процедура повторялась. Изучение трещиноватости последовательно проведено до глубины 3 км. Полученные данные по всем глубинным уровням соединены в одну 3D матрицу (X, Y, Z, УДЛ), которая использована для объемной визуализации. Удельная длина линеаментов выражена в  $\text{км}^{-1}$ . Такая размерность вытекает из расчетной формулы (см. выше).

Для объемного изображения применен стандартный модуль Oasis Montaj (Geosoft), но могут быть использованы другие программы, поддерживающие форматы объемных растров.

### Результаты

Результатом работы стала модель тектонической раздробленности блока коры для северной части о. Парамушир (рис. 1). Поверхность блока задранирована растровым изображением рельефа местности, вычисленного по данным радарных съемок (SRTM90\_v4).

Тектоническая трещиноватость может распространяться на большие глубины и обуславливать восходящие потоки нагретых вод глубокой циркуляции к поверхности земли. Проявленные на модели зоны деструкции пространственно совпадают с выходами на дневную поверхность холодных и термальных источников в районе вулкана Эбеко и р. Юрьева, а также вдоль восточного склона хр. Вернадского (рис. 2).

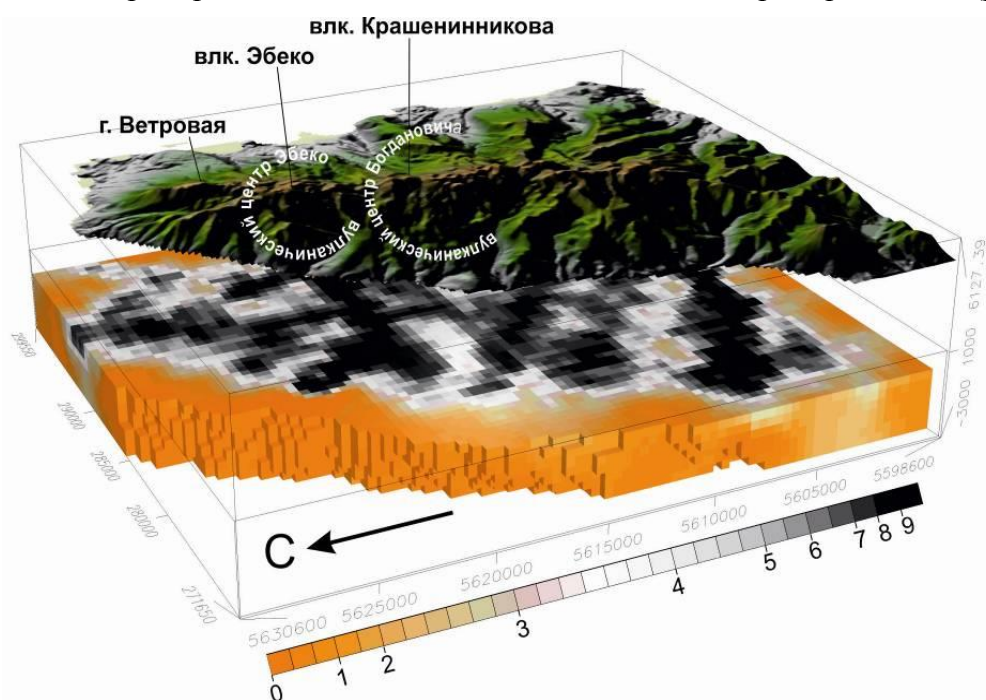
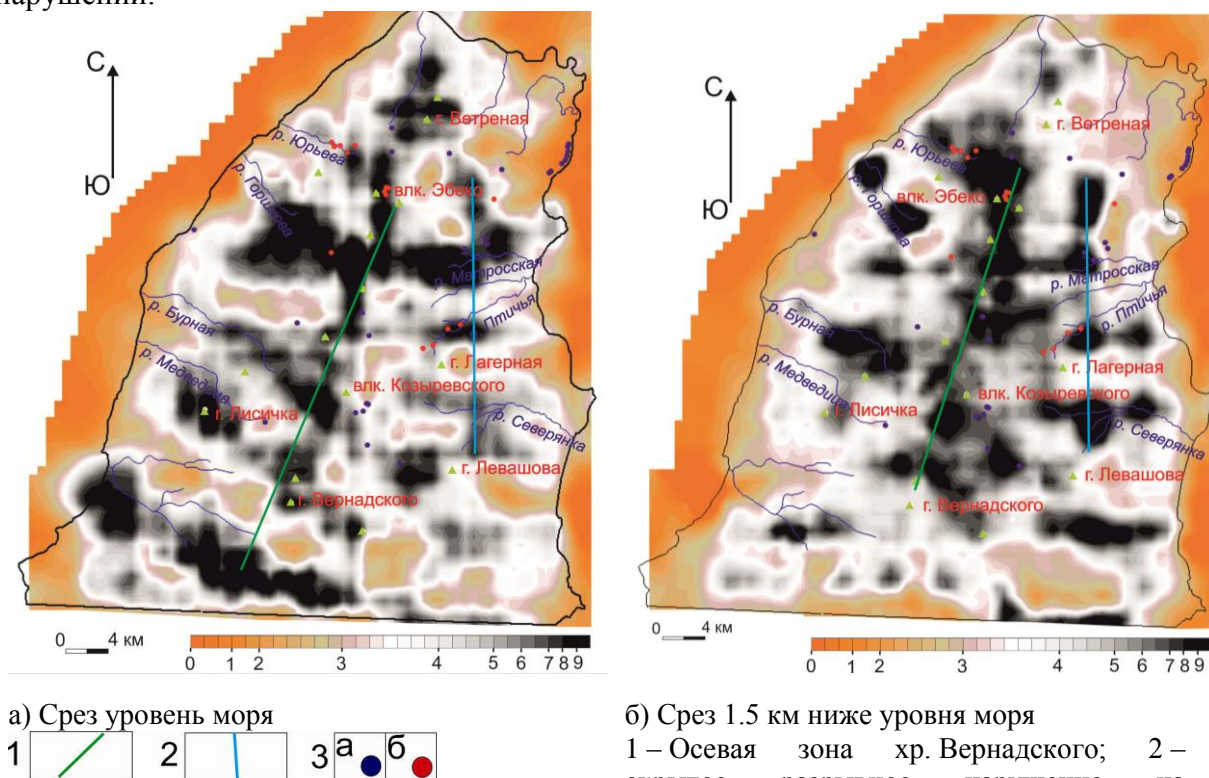


Рис. 1. Трехмерная модель тектонической раздробленности блока земной коры в северной части о. Парамушир. Распределение УДЛ (выражено в  $\text{км}^{-1}$ , показано цветом). Рельеф поднят на 5 км.

Участки повышенной раздробленности служат индикаторами проницаемых зон и крупных разломов. Так, в модели тектонической раздробленности для северной части о. Парамушир (рис. 2) наиболее интенсивная деструкция приурочена к осевой части хр. Вернадского и на его окончаниях. К этим местам приурочена вся позднеплейстоцен-голоценовая вулканическая деятельность. Именно здесь сконцентрированы все высокотемпературные источники и активная фумарольная деятельность, а также в этом районе расположен разлом ССВ простираения [1, 6].

В северной и центральной частях хр. Вернадского частично вскрыты питающие системы (дайки и неки базальтового, андезибазальтового и андезитового состава) древних вулканов Ветровой, Влодавца и Богдановича. Почти все неки и дайки северной части о. Парамушир сопряжены с зонами распространения гидротермально изменённых пород, образовавшихся в результате протекавших здесь ранее активных гидротермальных процессов, и совпадают с участками высокой тектонической деструкции, отраженных в модели.

Цепочка из узлов аномальной раздробленности просматривается на восточном склоне хр. Вернадского (рис. 2). Вероятно, что таким образом трассируется скрытое разрывное нарушение, которое на поверхности бронируется многочисленными лавовыми потоками и потому плохо читается в рельефе. В пользу этого предположения говорит большое количество сосредоточенных вдоль выделенного разрывного нарушения разгрузок на дневную поверхность холодных и термальных источников, скопление воронок взрыва, дайки и неки андезитового состава (хр. Каменистый). На западном склоне хр. Вернадского отчетливо прослеживаются участки повышенной трещиноватости, трассирующие серию выделенных ранее [6] крупных разрывных нарушений.



а) Срез уровень моря  
1 2 3

б) Срез 1.5 км ниже уровня моря  
1 – Осевая зона хр. Вернадского; 2 – скрытое разрывное нарушение на восточном склоне хр. Вернадского; 3 – источники: а – холодные, б – термальные.

Рис. 2. Горизонтальные срезы модели тектонической раздробленности блока земной коры для северной части о. Парамушир. Глубины 0 и 1.5 км. Распределение УДП (выражено в  $\text{км}^{-1}$ , показано цветом).

### **Заключение**

Для прогнозирования и уточнения геологических структур построена трехмерная модель тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир, которая наглядно демонстрирует положение зон деструкции в верхней части коры. Выявленные участки деструкции пространственно совпадают с обнаженными на поверхности телами субвулканических интрузий, зонами распространения гидротермально измененных пород, выходами холодных и термальных источников, а также трассируют крупные разрывные нарушения. Построенная модель предполагает существование на восточном склоне хр. Вернадского скрытого разрывного нарушения.

Работа выполнена в рамках проекта № 14.W03.31.0033 Минобрнауки России «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ».

### **Список литературы**

1. Атлас Курильских островов / Под ред. В.М. Котлякова (председатель), П.Я. Бакланова, Н.Н. Комедчикова (гл. ред.), Е.А. Федоровой (отв. ред.-картограф). Российская академия наук. Институт географии РАН. Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. М.-Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009.
2. *Нечаев Ю.В.* Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
3. *Сидоров М.Д., Таскин В.В.* Воксельная модель раздробленности коры в районах геотермальных месторождений (Камчатка) Горный информационно-аналитический бюллетень (специальный выпуск 32). 2017. С. 336-341.
4. *Таскин В.В., Сидоров М.Д.* Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде ГИС по результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика. № 1. 2015. С. 21-27.
5. *Таскин В.В., Сидоров М.Д.* Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243-252.
6. *Хубаева О.Р., Брянцева Г.В., Сим Л.А.* Новейшие деформации северной части острова Парамушир // Фундаментальные проблемы геотектоники Материалы XL тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007. С. 109-111.