

УДК 550.814:551.243.8:004.021(571.66)

© В.В. Таскин, М.Д. Сидоров

В.В. Таскин, М.Д. Сидоров

АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ В СРЕДЕ ГИС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРО- И КОСМОСНИМКОВ, ОЦЕНКА ЕЕ ДОСТОВЕРНОСТИ

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Введение

Существует широкий ряд методов изучения строения земной коры направленных на поиски областей повышенной тектонической раздробленности, которые многие исследователи рассматривают в качестве поисковых признаков месторождений полезных ископаемых [4, 2]. В то же время в результате развития информационных и космических технологий появляются инновационные способы получения данных о внутреннем строении Земли. Один из возможных методологических подходов для оценки степени раздробленности земной коры с использованием космической видеоинформации показан в работе [1].

Для района г. Петропавловска-Камчатского была создана трехмерная модель тектонической раздробленности блока земной коры по предложенной методике. В качестве инструмента применены программные продукты ESRI – ArcGIS и ArcView. Целью настоящей работы является представление алгоритма создания модели и проведение оценки ее достоверности.

Особенности подхода и допущения

Установленное при анализе многочисленных образцов горных пород кубической формы эмпирическое правило о том, что замеренная трещиноватость одной грани образца является представительной величиной и адекватно отражает степень трещиноватости всего образца, может быть аппроксимировано при модельном рассмотрении блоков земной коры [1]. Это не противоречит одному из главных принципов, которыми необходимо руководствоваться при решении задач тектоники методами моделирования – принципу подобия, так как проявление деформаций макроскопического уровня любого объема земной коры может быть рассмотрено как сумма деформаций многочисленных объемов, составляющих его [5].

Этот подход лег в основу способа оценки степени тектонической раздробленности коры на глубину, используя результаты дешифрирования космических снимков, на которых выделяемые линейные элементы, отождествляющиеся с трещинами разломов, понимаются как отражение тектонической ситуации всей кристаллической части земной коры [6].

В общем случае коэффициент тектонической раздробленности для блока пород есть отношение суммы объемов трещин и пустот к общему. Когда блок обладает кубической формой с ребром a , коэффициент устанавливается законом $\sum b \cdot h \cdot l / a^3$, где b – ширина раскрытия, h – глубина проникновения, l – длина трещин. На фотоснимке местности определяемой является лишь величина l , но ширина может быть принята средней для конкретной территории, т.е. $b = \text{const}$, а их глубина, с учетом установленного правила, принимается равной a . Таким образом, мерой тектонической раздробленности блока коры кубической формы выступает общая длина трещин, выделенных на одной из его сторон, отнесенная к площади его грани – $\sum l / a^2$. Следовательно, длина установленных по космоснимку линейных элементов в рамках квадратной ячейки со стороной a , нормированная к ее площади, т.е. удельная длина линейных элементов (УДЛ), характеризует степень тектонической раздробленности блока литосферы кубической формы, одной из граней которого является земная поверхность, ограниченная ячейкой. Вычисленное значение УДЛ относится к центру текущего куба, что позволяет задавать глубину исследования путем изменения длины сторон используемых ячеек [6].

Алгоритм обработки данных

Исходными материалами для создания модели стали карты трещинной тектоники, а также схемы кольцевых и вулcano-тектонических структур, составленные по результатам дешифрирования

аэро- космоснимков различной детальности способом масштабного приближения от регионального уровня к локальному в рамках опытно-методических работ 1989-1995 гг. [3]. Территория работ располагается на северо-западном берегу Авачинского залива.

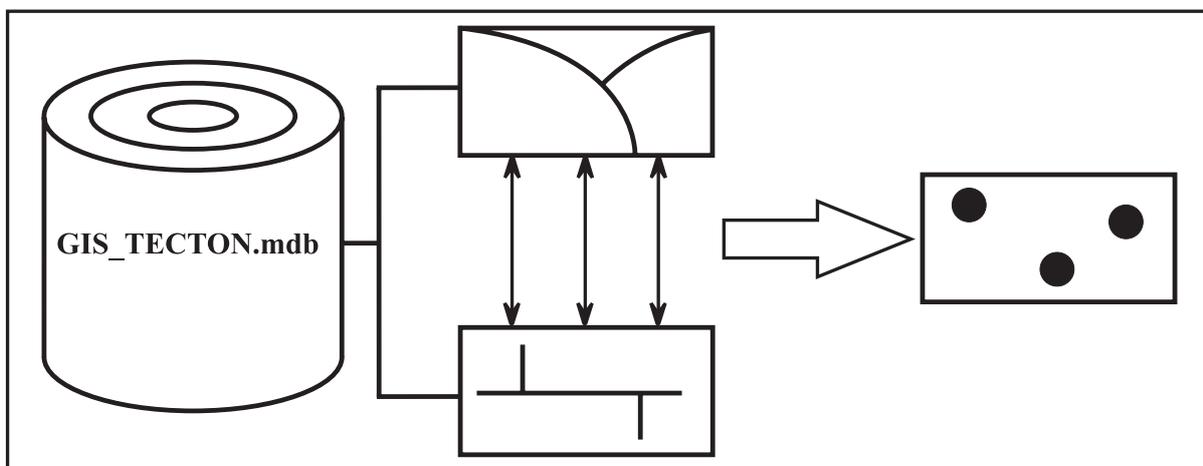
Оцифровкой и пространственной привязкой в ArcGIS результатов дешифрирования аэро- космоснимков была получена общая карта линейamentной сети в виде линейной темы **Cracks**, которая характеризует положение линий в пространстве. Каждый из 24 782 объектов темы соответствует выделенному при дешифрировании линейamentу. Исследуемая территория представлена полигональной темой **Poly**. Эти темы помещены в базу данных **GIS_TECTON.mdb** и являются исходными для генерации результирующей темы **Referred_points** путем их обработки в ArcView и совмещения полученных результатов (рис. 1). С целью обозначения границы между областями исследуемой территории, где выделение разрывных нарушений по снимкам не представлялось возможным (акватории), и обработанной использовалась вспомогательная тема **K_bound**, показанная на рисунке 3 (далее по тексту не упоминается).

Алгоритм совместной обработки исходных тем схематично показан на рис. 2 и заключается в следующих действиях:

1. Слияние объектов темы **Cracks** в один и сохранение с именем **Merged_line**.
2. Создание линейной темы **Network_{a(i)}** в границах полигона **Poly** в виде регулярной

сетки. Инструмент – «Draw line grid» (модуль CS_3.0), $a_{(i)}$ – сторона квадратной ячейки, которая в настоящей работе увеличивалась от 1 до 6 км с шагом равным 0,2 км.

3. Разбивка темой **Network_{a(i)}** полигона на множество квадратных полигонов со сторонами $a_{(i)}$ (действие 3а) и сохранение полученного файла как **Poly_{a(i)}** (действие 3б). Инструмент разбивки «Splitting by a lines».
4. Пересечение тем **Merged_line** (входная тема) и **Poly_{a(i)}** (тема наложения) «Мастером пространственных операций». При этом в атрибутивную таблицу темы **Poly_{a(i)}** добавляется поле, содержащее сведения о длине входящих в его границы линий темы **Merged_line**.
5. Преобразование инструментом «Polygon to points» темы **Poly_{a(i)}** в точечную тему **Points_{a(i)}** с размещением точек в центрах полигонов. В атрибутивную таблицу полученной темы следует добавить поле **Z** и заполнить значением $a_{(i)}/2$. Действия 2-5 повторяются по мере изменения значения a . В настоящей работе, в соответствии с заданными глубиной исследования и шагом изменения a , процедура состояла из 26 циклов, в результате чего был создан пакет точечных тем **Points_{a(i)}**.
6. Объединение полученных тем **Points_{a(i)}** в результирующую **Referred_points**.
7. Добавление темы в базу данных **GIS_TECTON.mdb**.



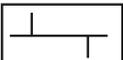
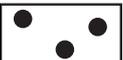
 -Poly;  -Cracks;  -Referred_points.

Рис. 1. Схематическое изображение исходных тем, их совместной обработки в ArcView (черные стрелки) и генерации результирующей темы-модели (белая стрелка)

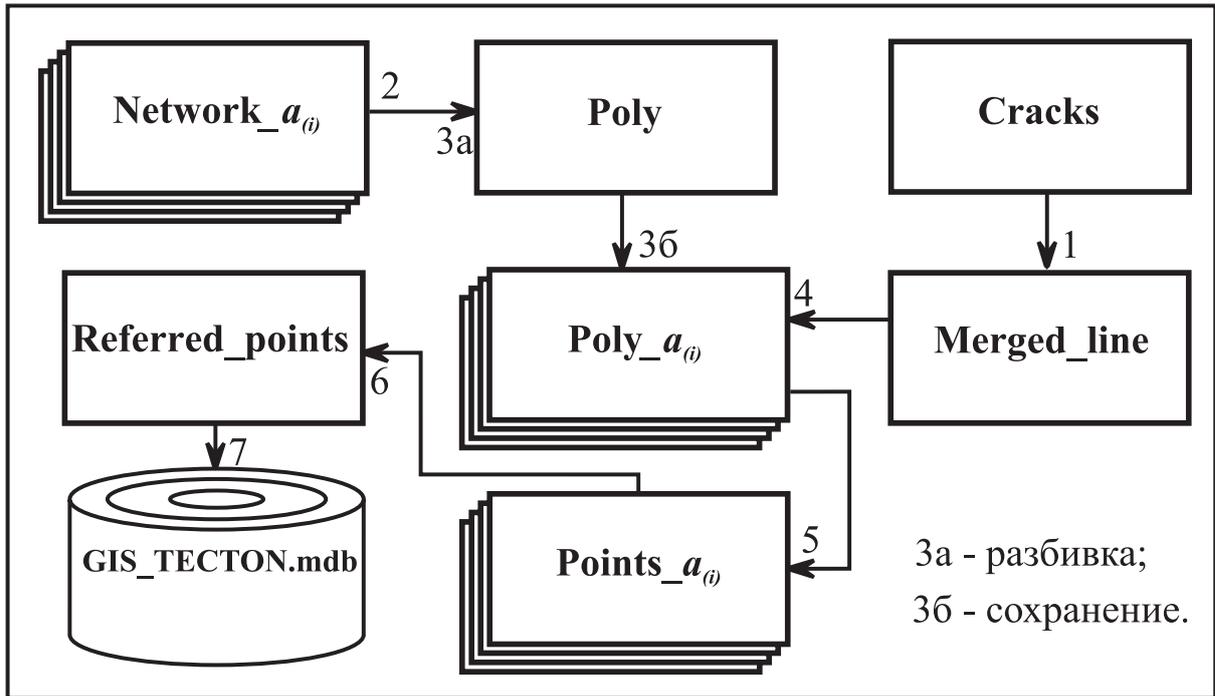


Рис. 2. Алгоритм обработки исходных тем. Цифры – номера действий

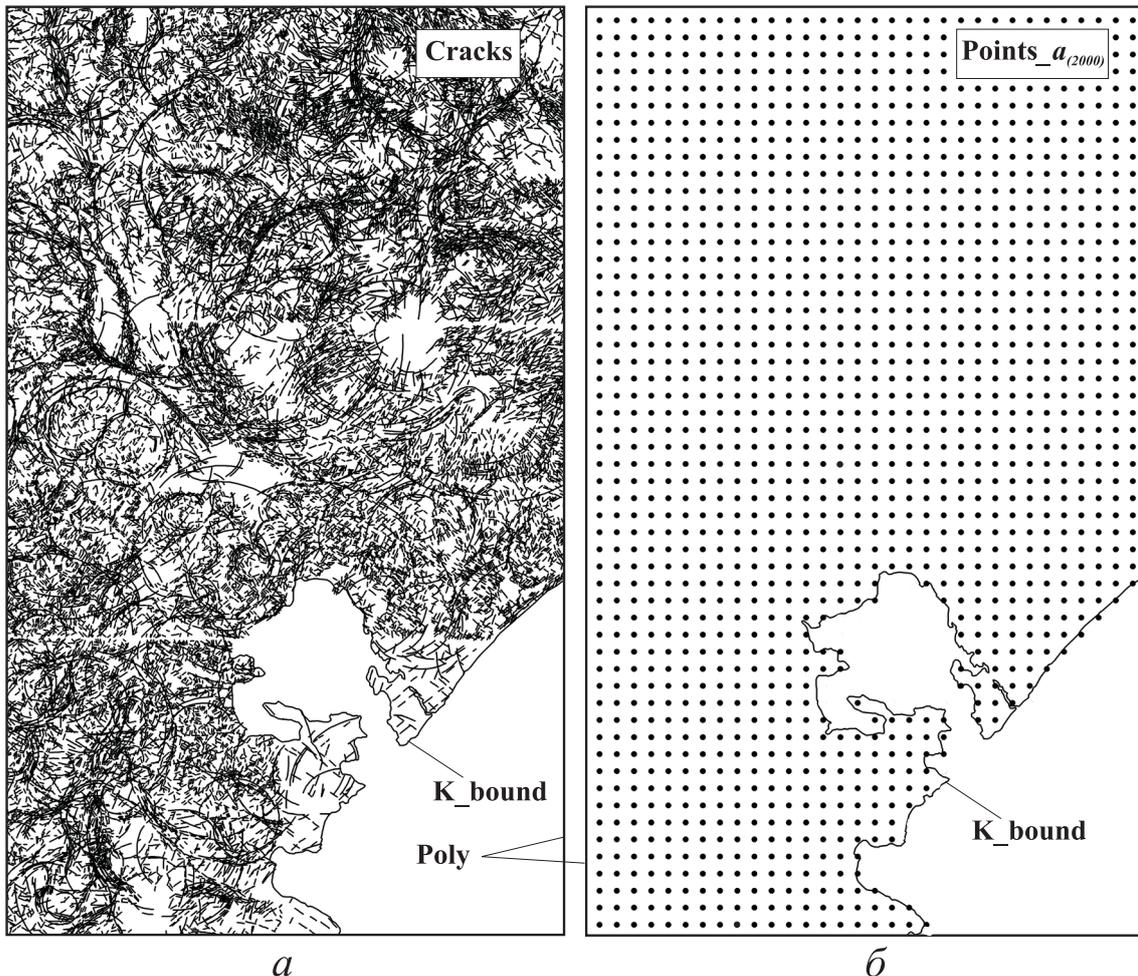


Рис. 3. Графическое изображение тем Cracks, Poly и Points_{a(2000)}
 а – разбивка тем Network_{a(i)} полигона на множество квадратных полигонов со сторонами a_(i)
 б – сохранение полученного файла как Poly_{a(i)}

Графическое изображение исходных тем **Cracks, Poly** и, в качестве примера, тема **Points_{a(2000)}** до объединения, соответствующая глубине исследования 1 км, представлены на рис. 3.

Трехмерная модель тектонической раздробленности

Модель тектонической раздробленности блока земной коры, разработанная в среде ГИС, по сути, представляет собой тематический векторный слой **Referred_points**, однозначно характеризующий положение точки в пространстве и значение УДЛ в ней. Этот слой содержит поля идентификации точек (OBJECTID), их координат (X, Y, Z), значений общей длины линеаментов, приходящихся на текущую ячейку-точку (TOTAL_LENGTH) и вычисленных запросом значений УДЛ в ней – содержимое поля TOTAL_LENGTH отнесено к квадрату $2Z$, т.е. к площади текущей ячейки. Общее количество записей в атрибутивной таблице слоя – 28711.

Трехмерная матрица распределения содержит 26 уровней по вертикали, верхняя и нижняя грани исследуемого блока расположены на глубине 0,5 и 3 км ниже уровня моря соответственно. Этот слой земной коры наиболее интересен в практическом отношении. Границы модели совпадают с контуром территории, на которой проводились работы [3].

Трехмерная визуализация в настоящей работе реализуется с помощью программных продуктов Oasis Montaj 6.2 и Tecplot 360 (рис. 4), но может быть осуществлена и другими вьюерами, поддерживающими форматы объемных растров (VOXEL). Цифровая модель рельефа, показанная на рисунке 4а, с целью повышения наглядности поднята на высоту 3 км. Для отображения внутреннего строения модели часть блоков загашена. Также для увеличения информативности ось Z увеличена в три и пять раз при визуализации Oasis Montaj и Tecplot соответственно. Модель представлена в значениях УДЛ и выражена в км^{-1} .

Достоверность модели тектонической раздробленности

Двумерная оценка. Для оценки адекватности модели был проведен пространственный анализ полученных данных для каждого глубинного среза и сравнение результатов с известными геологическими материалами. Анализ проводился с помощью модуля ArcGIS Geostatistical Analyst, инструментарий которого располагает богатым набором различных способов пространственной обработки данных. Однако использование широкого ряда предлагаемых вариантов интерполяции данных показало, что получаемые карты распределений отличаются лишь

степенью локализации и детализации зон деструкции, но принципиальной разницы в результатах применения различных интерполяционных подходов не установлено. В качестве примеров результаты интерполяции данных темы **Points_{a(2000)}** методом ординарного кригинга (а) и локальных полиномов (б) показаны на рис. 5. Совмещение полученного разными способами интерполяции распределения УДЛ с разломами, снятыми с Государственной геологической карты масштаба 1:200 000, показывает, что модельные зоны деструкции (цвет) и установленные геологической съемкой (черные линии) совпадают (рис. 5). Исключение составляет участок вдоль берега Авачинского залива, что объясняется использованием только мелкомасштабных снимков для этой территории при дешифрировании.

Трехмерная оценка. По средним значениям УДЛ, вычисленным для каждого из 26 уровней полученной матрицы (точки на рис. 6а), построен график изменения степени тектонической раздробленности по мере увеличения глубины (штрихпунктирная линия, рис. 6а).

Полученный график имеет вид кусочно-монотонной функции с линейной зависимостью в отрезках. Если принять усредненное значение УДЛ слоя пород, располагающихся на глубине 0,5 км за 100%, то на глубине 3 км, степень раздробленности материала падает на 8% (рис. 6б). Полученный график может быть условно разделен на две части. Выше 1,5-2 км, где отмечается более высокий градиент раздробленности, и ниже этих отметок (рис. 6б).

Известно, что верхняя часть коры исследованной территории имеет двучленное строение [8]. Верхний слой представлен вулканическими и осадочными отложениями кайнозоя, залегающими на мезозойском фундаменте (нижний слой). Эти генерализованные слои имеют различные реологические свойства, что, видимо, нашло отражение на графике в виде двух отрезков с разными градиентами. Точка излома графика (около 1,5 км) близка к средней глубине залегания фундамента для большей части исследованной территории [8].

Следовательно, соответствие построенной модели реалиям подтверждается отражением в ней известных геологических структур. Так, в северной и юго-западной частях района исследования выделился блок мезозойского фундамента, отличающийся высокой степенью тектонической раздробленности. В центре – район пониженной раздробленности, соответствующий грабену в долине р. Авача (рис. 4, 5). Граница между слоями вулканических и осадочных отложений кайнозоя, а также мезозойского фундамента на глубине около 1,5 км также находит место в модели в виде графика,

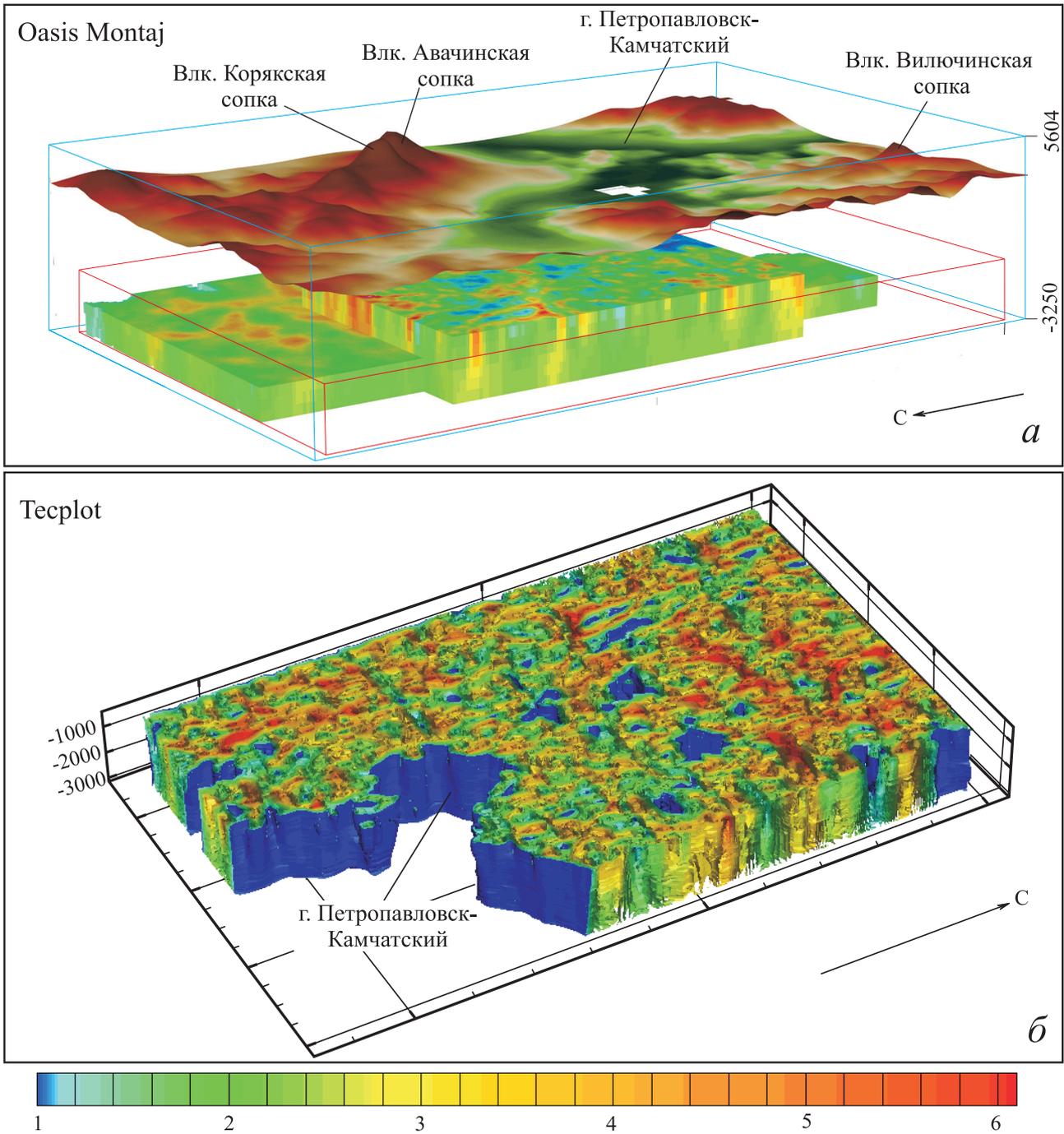


Рис. 4. Трехмерная модель тектонической раздробленности блока пород, построенная по данным дешифрирования аэро- и космоснимков. Визуализация осуществлена программными продуктами Oasis Montaj 6.2 (а) и Tecplot 360 (б)

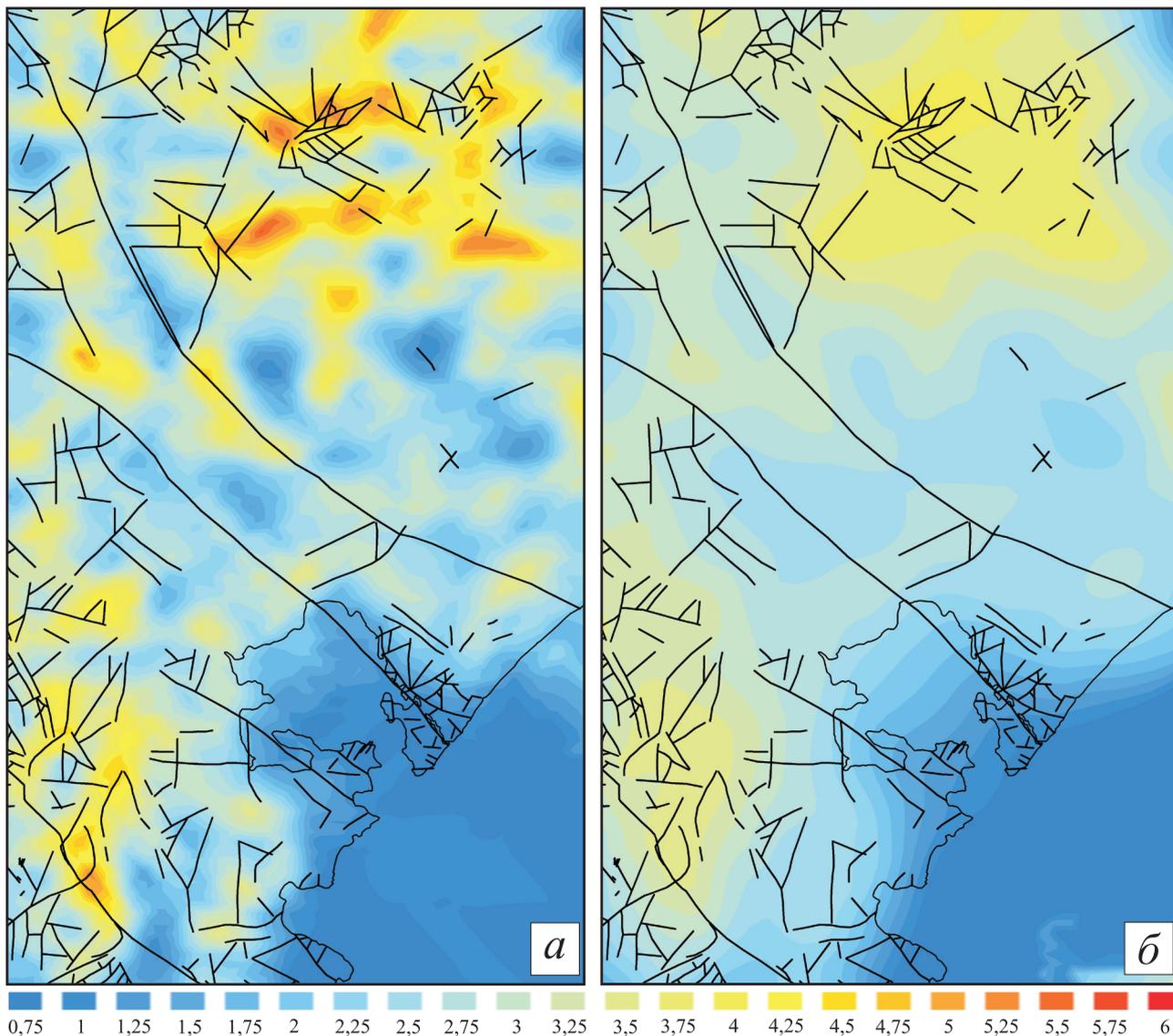


Рис. 5. Распределение УДЛ (выражено в км^{-1} , показано цветом), соответствующее глубине исследования 0,5 км, а также разломы (черные линии), выделенные по государственной геологической карте масштаба 1:200 000 [7]

показывающего смену градиента на этой отметке в виде перегиба (рис. 6б).

Выводы

Представлен алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности по результатам дешифрирования аэро-космоснимков в среде ГИС. Сравнительный анализ данных построенной модели и геологических материалов показывает высокую степень ее достоверности, что подтверждается отражением в ней известных геологических структур.

Выделенные в модели области повышенной раздробленности в северной и юго-западной частях исследуемой территории, соответствуют блокам мезозойского фундамента и вулканотектоническим

структурам, а пониженное значение УДЛ в центральной части отражает грабен р. Авача. Граница между слоями кайнозойских отложений, а также мезозойского фундамента на глубине порядка 1,5 км также находит место в разработанной модели.

Применение изложенного алгоритма и создание моделей тектонической раздробленности верхнего слоя земной коры является доступным и оперативным способом предварительного исследования малоизученных территорий для получения представления о положении зон деструкции, позволяющим уточнять и прогнозировать геологические структуры, а также связанные с ними месторождения полезных ископаемых.

Ключевые слова: трехмерная модель тектонической раздробленности, дешифрирование

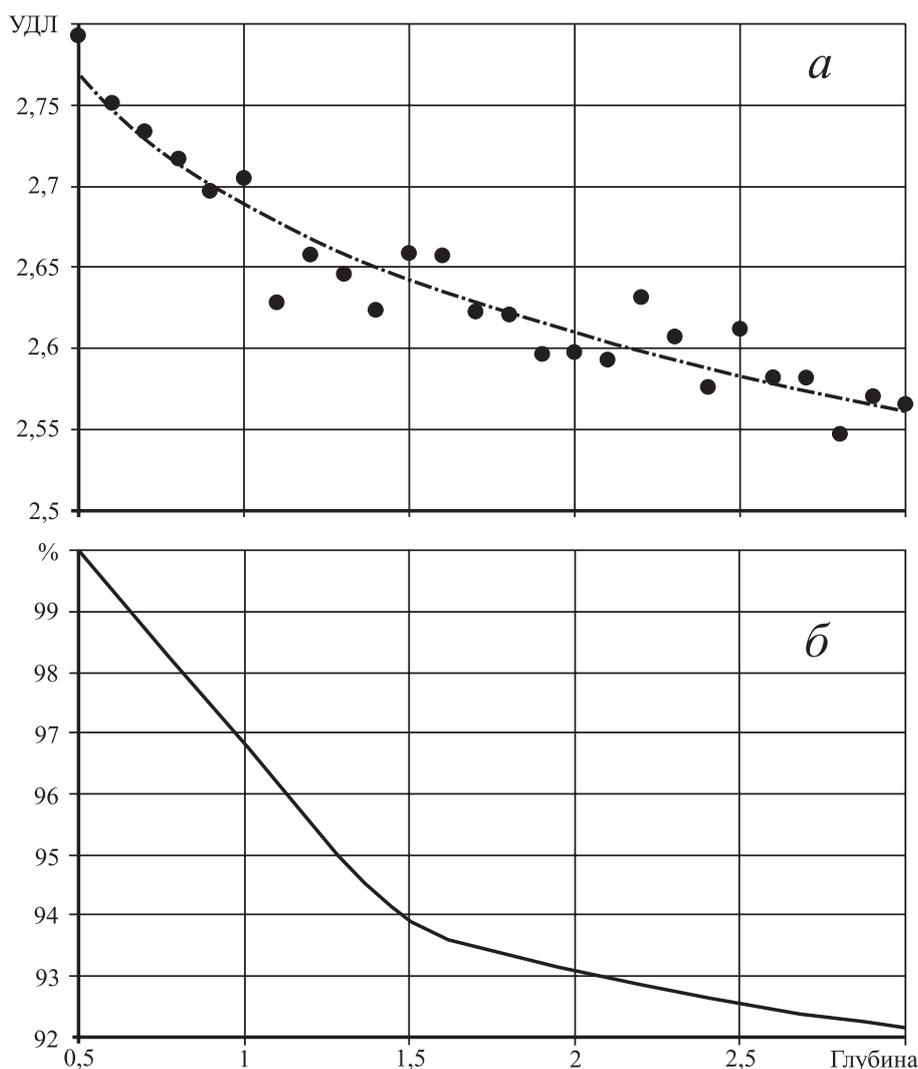


Рис. 6. Изменение степени тектонической раздробленности блока земной коры с увеличением глубины по данным дешифрирования аэро- и космоснимков
 а – выражено непосредственно в значениях УДЛ (км^{-1}), б – в процентном соотношении

аэро- космоснимков, алгоритм обработки данных, тематический векторный слой, ArcGIS, ArcView.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатиков О.А., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л. Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // ДАН. – 2002. – Т. 387. – № 3. – С. 1-6.
2. Василевский М.М. Структуры разрушения и прогноз рудоносности. – М.: Наука, 1982. – 151 с.
3. Ворожейкина Л.А., Скоробогачко Л.С., Соколов В.А. Отчет об опытно-методических работах по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях. Петропавловск-Камчатский. 1995 г. 6, 7 прил.
4. Гаврилов В.П. Феноменальные структуры Земли. – М.: Наука, 1978. – 142 с.
5. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 535 с.
6. Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 215 с.
7. Шеймович В.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Южно-Камчатская серия, листы N-57-XXI, XXVII / под ред. Б.А. Марковского. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1996. – 302 с.
8. Шеймович В.С., Сидоров М.Д. Строение фундамента вулканического пояса Юго-восточная Камчатка // Вулканология и сейсмология. – 2000. – № 5. – С. 68-75.