

Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации

В.В. Таскин, М.Д. Сидоров

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский 683002, Россия
E-mail: taskin-v@yandex.ru*

Стремительное развитие информационных технологий позволяет получать данные о внутреннем строении Земли независимо от геофизических методов исследования. В настоящей работе построена трехмерная модель тектонической раздробленности блока земной коры на основе дешифрирования аэро- и космических снимков различной детальности методом масштабного приближения от регионального уровня к локальному. Использованный методологический подход разработан в трудах Ю.В. Нечаева и заключается в выделении линеаментов, расчете их удельной длины и оценке с помощью полученного параметра степени раздробленности коры на заданной глубине. В качестве исходных данных применены результаты опытно-методических работ, а именно карты трещинной тектоники, схемы кольцевых и вулcano-тектонических структур. Содержательная часть модели реализована с помощью программного пакета ArcGIS, а 3-D визуализация выполняется выюером Oasis montaj. Проведена оценка адекватности модели в сравнении с известными геологическими структурами. Соответствие модели действительности подтверждается отражением в ней известных геологических структур. Созданная модель наглядно показывает положение зон деструкции в самой верхней части коры, дает возможность уточнять и прогнозировать геологические структуры и связанные с ними месторождения полезных ископаемых. Модель полезна при комплексной интерпретации материалов геофизических и геохимических исследований, для тектонических реконструкций.

Ключевые слова: дешифрирование, удельная длина линеаментов, линеаментный анализ, структура земной коры, область пониженной/повышенной раздробленности, аэро- космоснимок, площадь ячейки, ArcGIS, Oasis Montaj.

Введение

Одним из основных инструментов изучения внутреннего строения Земли являются геофизические методы исследования, требующие, однако, значительных финансовых затрат. В то же время, в связи с повышением доступности аэро- и космоснимков, непрерывным наращиванием мощности вычислительной техники, постоянным совершенствованием программного обеспечения, развитием новых технологических и методических подходов к обработке материалов дистанционного зондирования Земли, в настоящее время стало возможным получение данных о внутреннем строении Земли независимо от геофизики (Богатиков, Нечаев, Собисевич, 2002). Например, в работе (Нечаев, 2010) предложен способ использования результатов дешифрирования космических снимков, позволяющий оценить на глубину степень тектонической раздробленности земной коры.

Известно, что участки и зоны повышенной тектонической раздробленности служат путями миграции химических элементов из глубинных горизонтов к поверхности и, в большинстве случаев, ассоциируются с месторождениями полезных ископаемых (Гаврилов, 1978; Василевский, 1982).

Целью настоящей работы является построение трехмерной модели тектонической раздробленности блока земной коры для района г. Петропавловска-Камчатского на основе дешифрирования аэро- и космоснимков, а также оценка ее адекватности в сравнении с известными геологическими структурами.

Особенности методологического подхода

Механизм предлагаемого подхода к изучению недр Земли на основе информации космических съемок ее поверхности заключается в выделении на снимке линеаментной сети, расчете суммарной протяженности линеаментов на единицу площади, т.е. удельной длины линеаментов (УДЛ) и оценке степени тектонической раздробленности с помощью полученного параметра на заданной заранее глубине.

Одним из основных принципов, которым необходимо руководствоваться при решении вопросов тектоники методом построения моделей, является принцип подобия. Физические явления и объекты, обладающие подобием физических переменных (значение переменной в любой точке объекта равно величине той же переменной в сходной точке другого объекта, умноженной на коэффициент подобия) и геометрии – подобны. Проявление деформаций макроскопического уровня любого объема земной коры может быть рассмотрено как сумма деформаций многочисленных объемов, составляющих его (Гзовский, 1975). Исследованием образцов различных горных пород установлена справедливость эмпирического правила – трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца (Нечаев, 2010). Тогда, основываясь на принципах подобия, можно с определенной долей вероятности аппроксимировать это правило и для земной коры в целом.

Коэффициент тектонической раздробленности объекта определяется отношением суммарного объема трещин объекта (сумма произведений таких параметров как длина (l), ширина раскрытия (b) и глубина проникновения (h) трещин) к его объему. Так, если рассмотреть блок коры кубической формы, где ребро равно a , а одной из его граней является дневная поверхность, то коэффициент тектонической раздробленности этого блока определится как $\sum l \cdot b \cdot h / a^3$. Однако, на практике, определить величины b и h по космическому снимку невозможно. При этом ширина трещин (b) может быть принята как средняя для данной конкретной территории ($b = const$), а глубина их проникновения (h) с учетом установленного правила и принципа подобия принимается равной значению a .

Таким образом, коэффициент тектонической раздробленности объема литосферы кубической формы с ребром a , при принятых допущениях, прямо пропорционален отношению общей длины линеаментов, в пределах верхней грани куба, соответствующей земной поверхности, к ее площади, т.е. УДЛ. Исходя из предположения о равномерном распределении трещин в верхних горизонтах коры, что справедливо для среды с относительно однородными реологическими свойствами, значение вычисленного параметра рекомендуется относить к центру куба (Нечаев, 2010). Наши расчеты ограничены глубиной 3 км ниже уровня моря. Этот слой геологического пространства представляет наибольший практический интерес.

Ход работы

В качестве исходных материалов использовались результаты опытно-методических работ, проведенных камчатскими геологами в 1989-1995 гг., а именно карты трещинной тектоники, схемы кольцевых и вулкано-тектонических структур, полученных в результате дешифрирования аэро- и космоснимков различной детальности способом масштабного приближения от регионального уровня к локальному специалистом по геологическому дешифрированию Соколковым В.А. единолично (Ворожейкина и др., 1995). Территория исследований располагается на северном берегу Авачинского залива, охватывает структуры современных вулканов (Авачинская и Вилючинско-Мутновская группы) и выступы мезозойского фундамента.

Векторизацией в программном пакете ArcGIS схемы дешифрирования аэро- и космоснимков, получена цифровая карта линеаментной сети (*рис. 1*).

Затем на расчетную площадь наложена квадратная сетка с размером ячейки 1 км^2 , подсчитана суммарная длина линеаментов в пределах каждой клетки и нормирована к ее площади. Полученные значения отнесены к центрам кубов с ребром 1 км, одной из граней которых является земная поверхность, ограниченная ячейкой (*рис. 2*). В результате была составлена матрица распределения УДЛ для глубины 0,5 км. За нулевую отметку принят уровень моря.

С целью повышения точности результатов расчетов, увеличения их достоверности и исключения неоднозначности, связанной с географическими особенностями исследуемой области, в работе не учитывались значения УДЛ тех ячеек, которые являлись крайними, или если в их пределах выделение структурных неоднородностей не представлялось возможным хотя бы частично (акватории и береговые линии, *рис. 3*).



Рис. 1. Карта линейментной сети дешифрирования аэро- и космоснимков (по В.А. Соколову), (Ворожейкина, Скоробогачко, Соколов, 1995)

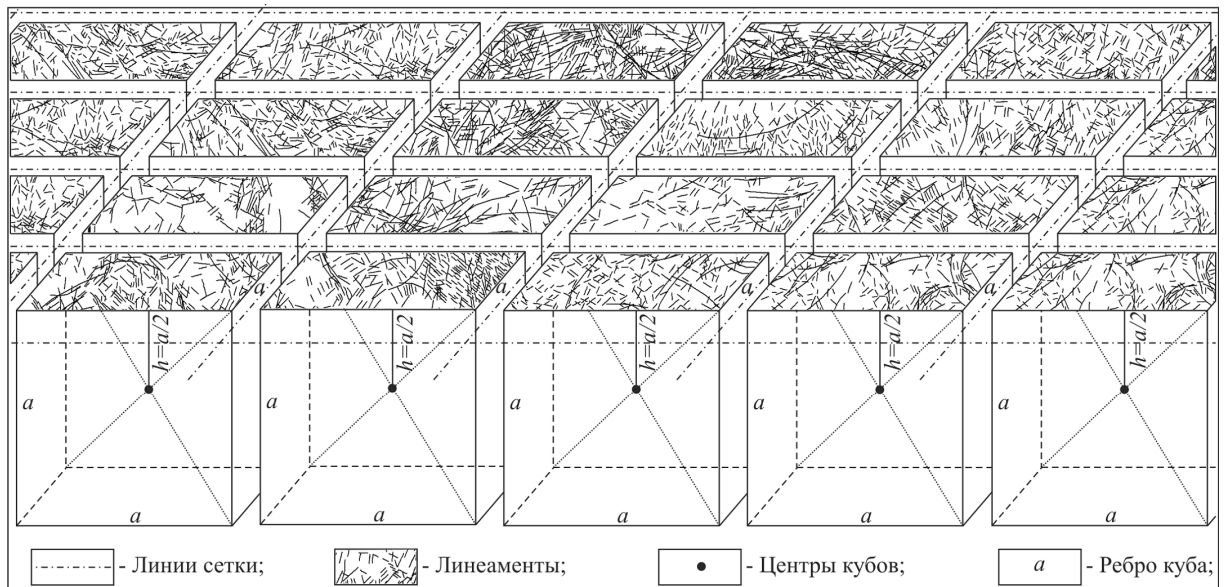


Рис. 2. Схематическое изображение линий сетки и кубов с ребром a . Центры кубов – точки пространства, к которым относятся значения УДЛ

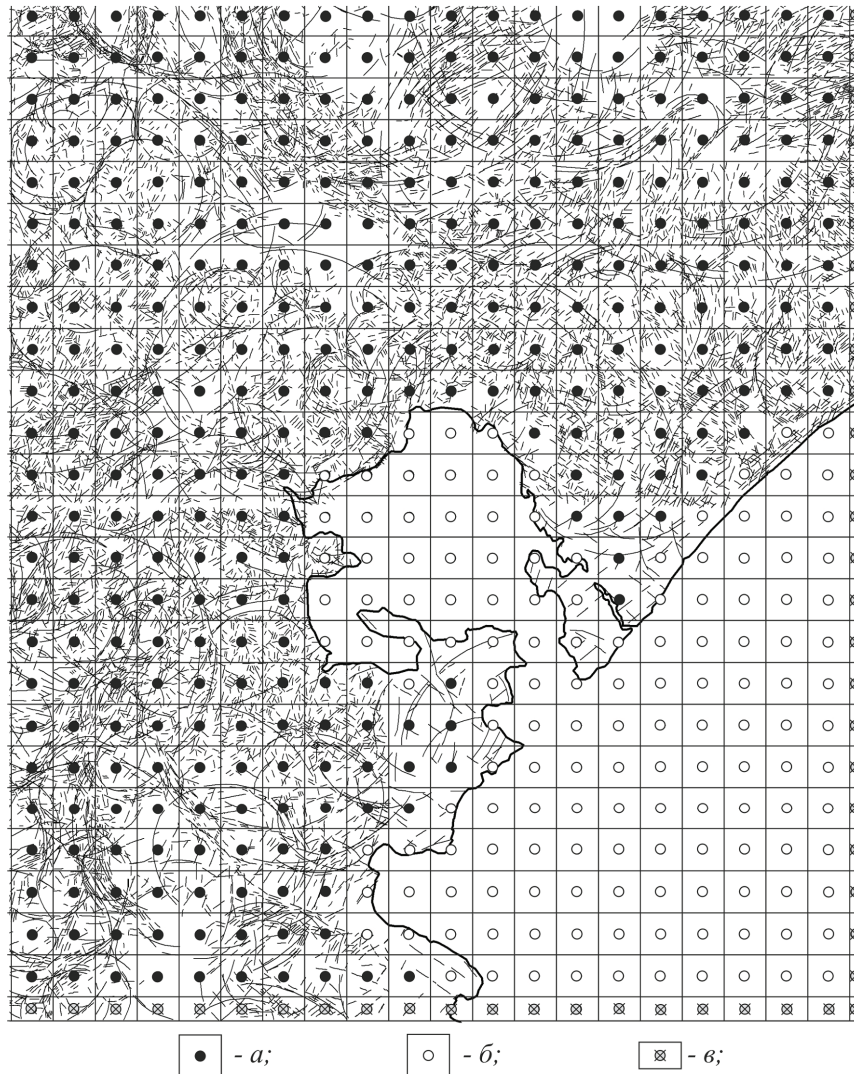


Рис. 3. Юго-восточный фрагмент карты линеаментной сети в процессе обработки. a – ячейки принятые для расчетов; b , v – не принятые (b – приходящиеся на водные объекты полностью или частично, v – приходящиеся на границу исследуемой территории)

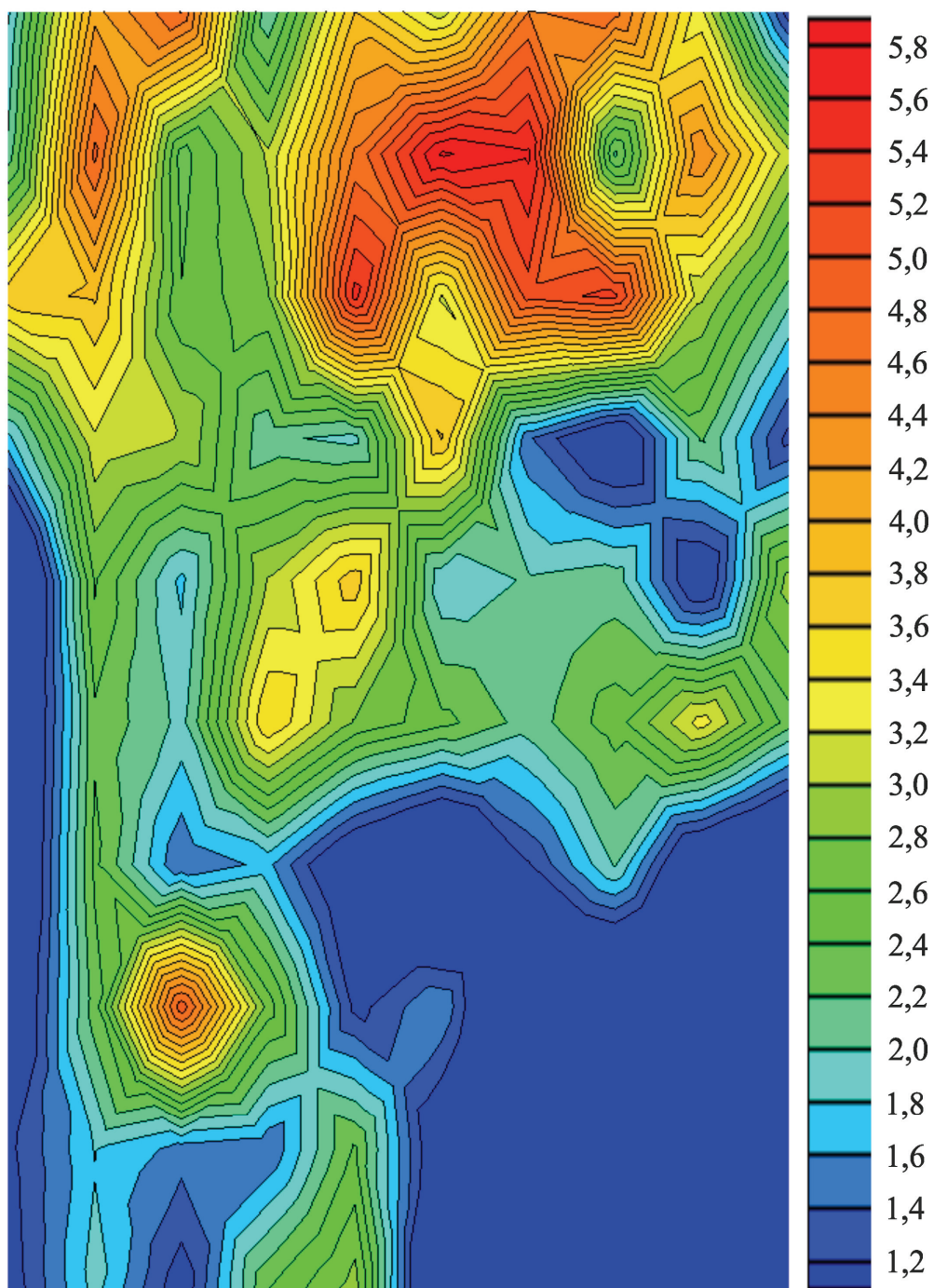


Рис. 4. Пример карты распределения УДЛ (км^{-1}) для глубины 1,1 км

Описанным способом исходная линеamentная сеть (рис. 1) многократно обработана с целью получения набора карт распределений УДЛ на глубину от 0,5 до 3 км с шагом 0,1 км, для чего сторона ячейки a с каждым разом увеличивалась на 0,2 км (табл. 1). Пример карты распределения УДЛ для глубины 1,1 км представлен на рис. 4.

Таблица 1. Исходные расчетные характеристики

№, n/n	a, км	Площадь ячейки, км ²	Глубина h, км	Количество ячеек (точек)	
				общее	принятое для дальнейшей обработки
1	1	1	0,5	7617	5935
2	1,2	1,44	0,6	5452	4246
3	1,4	1,96	0,7	4000	3102
4	1,6	2,56	0,8	3080	2374
5	1,8	3,24	0,9	2356	1881
6	2	4	1	1904	1494
7	2,2	4,84	1,1	1664	1323
8	2,4	5,76	1,2	1440	1087
9	2,6	6,76	1,3	1144	921
10	2,8	7,84	1,4	1040	786
11	3	9	1,5	912	685
12	3,2	10,24	1,6	792	598
13	3,4	11,56	1,7	680	537
14	3,6	12,96	1,8	640	484
15	3,8	14,44	1,9	540	424
16	4	16	2	504	397
17	4,2	17,64	2,1	504	353
18	4,4	19,36	2,2	416	300
19	4,6	21,16	2,3	416	300
20	4,8	23,04	2,4	384	264
21	5	25	2,5	336	237
22	5,2	27,04	2,6	308	232
23	5,4	29,16	2,7	308	217
24	5,6	31,36	2,8	280	203
25	5,8	33,64	2,9	240	166
26	6	36	3	240	165

Полученные результаты

Результатом работы стала модель тектонической раздробленности блока коры, изображенная на *рис. 5* совместно с рельефом местности. Модель охватывает площадь 7400 км². Нижняя и верхняя границы расположены на глубине 3 и 0,5 км ниже уровня моря, соответственно, боковые грани совпадают с границами карты линеаментной сети. Для наглядности вертикальная ось Z увеличена в 3 раза, рельеф поднят на 3 км, а часть модели загашена для отображения внутренней тектонической ситуации (*рис. 5*). Содержательная часть созданной модели реализована в оболочке ArcGIS (ESRI) и представляет собой векторный слой, однозначно характеризующий положение каждой точки в пространстве и значение УДЛ в ней. Общее количество точек, используемых в модели, 28 711. Для визуализации создана трехмерная матрица объемного изображения (Voxel). Просмотр реализуется с помощью 3-D вьюера Oasis montaj, но может осуществляться и другими программ-

ными продуктами, поддерживающими форматы объемных растров. Пример входного файла данных для визуализации представлен в *табл. 2*.

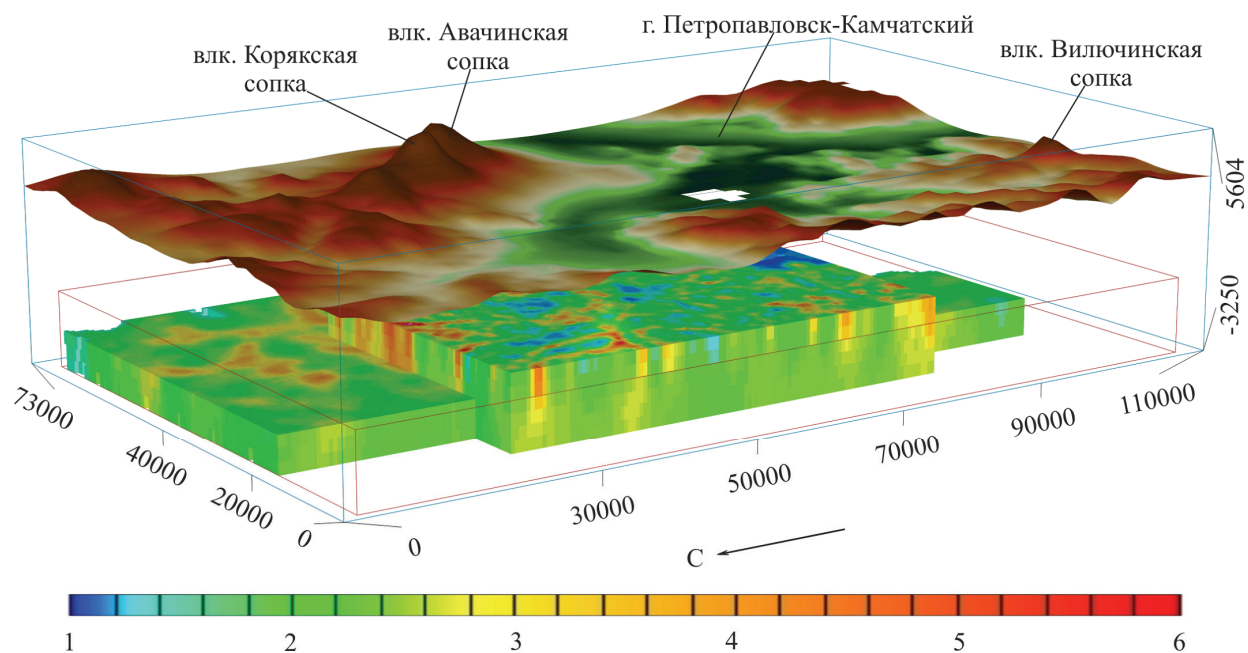


Рис. 5. Трехмерная модель тектонической раздробленности

Адекватность построенной модели подтверждается отражением в ней известных геологических структур (*рис. 4, 5*). Так, в северной части участка выделился блок мезозойского фундамента, отличающийся высокой степенью тектонической раздробленности. В центре – район пониженной раздробленности, соответствующий грабену в долине р. Авачи. Кольцевыми зонами повышенной раздробленности отразились в модели вулканотектонические структуры в юго-западной части исследованной площади. Аномально низкими значениями раздробленности охарактеризовались привершинные зоны действующих вулканов Корякский и Авачинский в восточной части исследуемого участка.

Таблица 2. Структура входного файла данных для визуализации

<i>X, м</i>	<i>Y, м</i>	<i>Z, м</i>	<i>Значение УДЛ, км⁻¹</i>
10500	95800	-500	0,49
25200	25600	-600	1,48
69300	87600	-700	1,19
8500	43900	-800	2,68
27200	32700	-900	3,05
14600	27500	-1000	4,34
12800	19600	-1200	0,13
37400	18000	-1300	3,72

Модель наглядно показывает положение зон деструкции в самой верхней части коры, дает возможность уточнять и прогнозировать геологические структуры и связанные с ними месторождения полезных ископаемых. Модель может быть полезна при интерпретации материалов геофизических и геохимических исследований, для тектонических реконструкций.

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.

3-D model of tectonic break of Earth crust created using satellite optical data

V.V. Taskin, M.D. Sidorov

*Scientific Research Geotechnological Centre of Far-Eastern Branch RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky 683002, Russia
E-mail: taskin-v@yandex.ru*

Exponential development of informational technologies allows providing data on interior structures of the Earth independently of geophysical methods of exploration. In the present work, a three-dimensional model of tectonic break of a block of crust based on decipherment of aerial and satellite images of different degrees of detail was developed. The decipherment was conducted by the method of scale approach from regional level to local. The methodological approach applied by us was developed in works of Yu.V. Nechayev and based on allocation of lineaments, calculating their specific length and evaluation by obtained parameter of the tectonic break degree at a given depth. For initial data we used the results of experimental and methodological works, namely maps of tectonic cracks and schemes of ring and volcano-tectonic structures. The content part of the model was implemented using ArcGIS software package, and three-dimensional visualization was made by Oasis montaj viewer. The model validity in comparison with well-known geological structures is assessed. The correspondence of the model to reality is confirmed by reflection in it of well-known geological structures. The developed model demonstrates the position of destruction zones in the most top part of the Earth's crust, and gives the possibility to specify and predict geological structures and associated mineral deposits. The model is useful in integrated interpretation of materials of geophysical and geochemical researches and for tectonic reconstructions.

Keywords: decipherment, specific length of lineaments, lineament analysis, Earth crust structure, low/high fractured area, aerial image, satellite image, cell square, ArcGIS, Oasis Montaj.

References

1. Bogatikov O.A., Nechaev U.V., Sobisevich A.L. Ispol'zovanie kosmicheskikh tehnologiyi dlia monitoringa geologicheskikh struktur vulkana Elbrus (Use of satellite technologies for observation of geological structures of Elbrus volcano), *DAN*, 2002, Vol. 387, No 3, pp. 1–6.
2. Vasilevsky M.M. *Struktury razrusheniya i prognoz rudonosnosti* (Structures of destruction and ore-bearing prediction), Moscow: Nauka, 1982, 151 p.
3. Vorojeikina L.A., Skorobogatsko L.S., Sokolov V.A. *Otchet ob opytno-metodicheskikh rabotah po primeneniui geolostrukturnykh, geofizicheskikh i distantsionnykh kriteriev poiska termal'nykh vod na zakrytykh ploshchadykh* (Experimental and methodological works on exploitation of geological structural, geophysical, and distance criteria of thermal waters exploration in closed areas conditions – report), Petropavlovsk-Kamchatskiy, 1995.
4. Gavrilov V.P. *Fenomenal'nye struktury Zemli* (Phenomenal structures of Earth), Moscow: Nauka, 1978, 142 p.
5. Gzovskyi M.V. *Osnovy tektonofiziki* (Basics of tectonophysics), Moscow: Nauka, 1975, 535 p.
6. Nechaev U.V. *Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost'*. *Distantsionnoe izuchenie vnutrennego stroeniya litosfery* (Lineaments and tectonic break. Distance study of interior arrangement of lithosphere), Moscow: IPE RAS, 2010, 215 p.