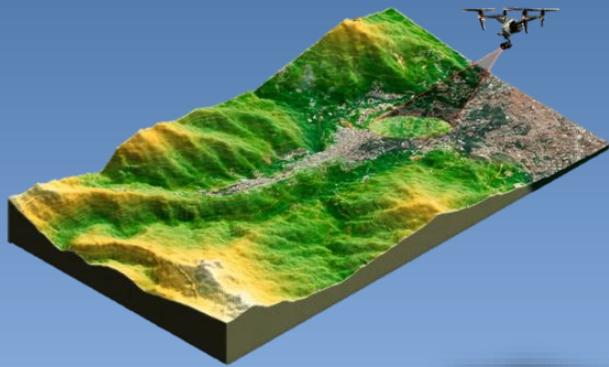


# Цифровые двойники обнажений горных пород: проблемы и перспективы использования для структурного анализа

*О. В. Лунина, А.С. Низовцев*

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск*



**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО — СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ**

VII Всероссийская конференция с международным участием  
**ITES -2025**, г. Владивосток, 22-26 сентября 2025 г.

# Что такое структурный анализ и зачем он нужен?

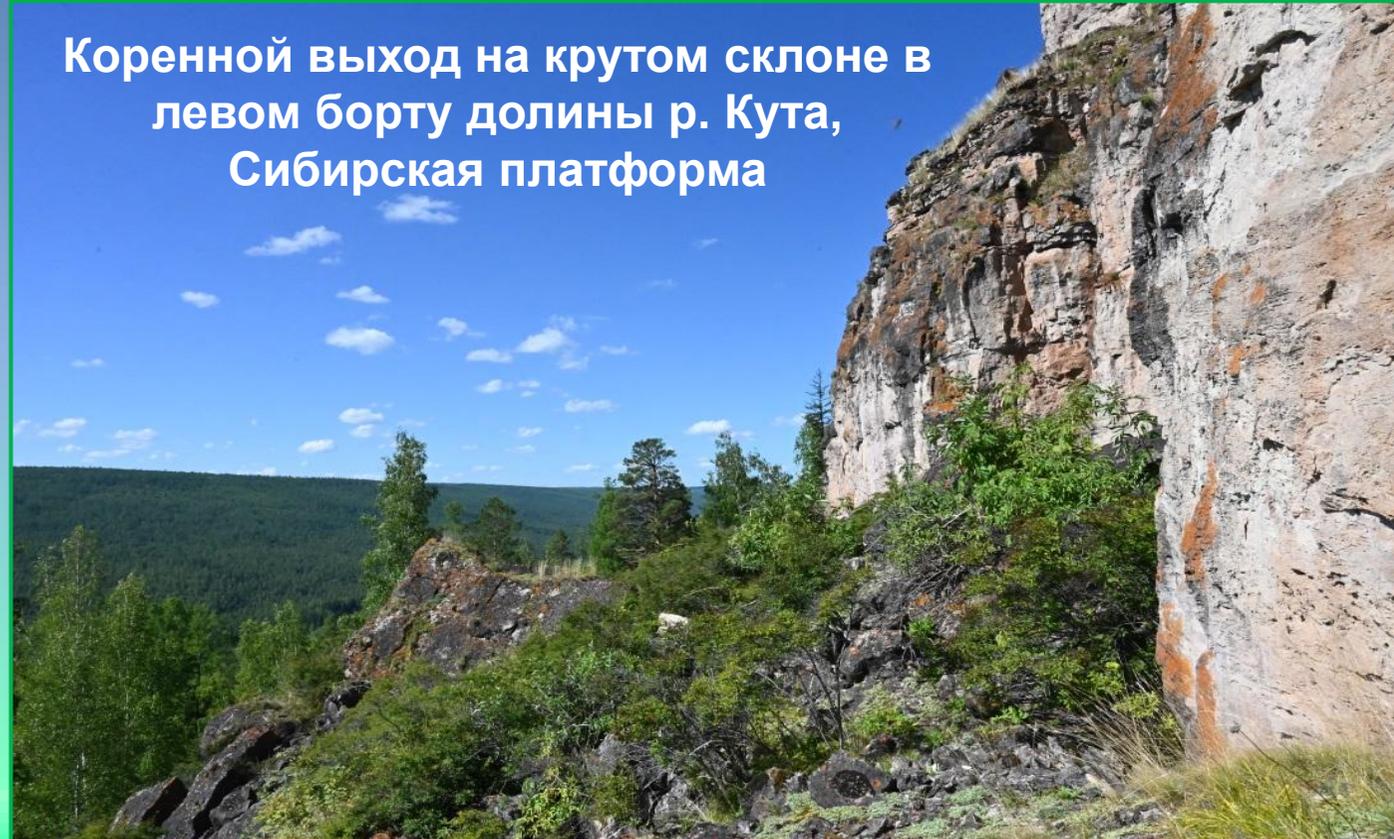
**Структурный анализ** - разделение целостного геологического объекта на составляющие части (признаки, свойства, отношения) с целью изучения степени нарушенности и деформаций горных пород, картирования разломов и их зон, кинематических процессов движения вещества и динамических условий формирования структур (т.е. расположения и характера приложенных сил, вызвавших деформацию; частный случай – тектонофизический анализ).

**Коренной выход** – один из первичных геологических объектов

**Полевые данные** – основа структурного анализа.

**Применение:** прогноз местоположения рудных зон, узлов и полей, а также месторождений углеводородов; обеспечение безопасности проведения горных работ, оценка инженерно-геологических условий при проектировании сооружений

Коренной выход на крутом склоне в левом борту долины р. Кута, Сибирская платформа



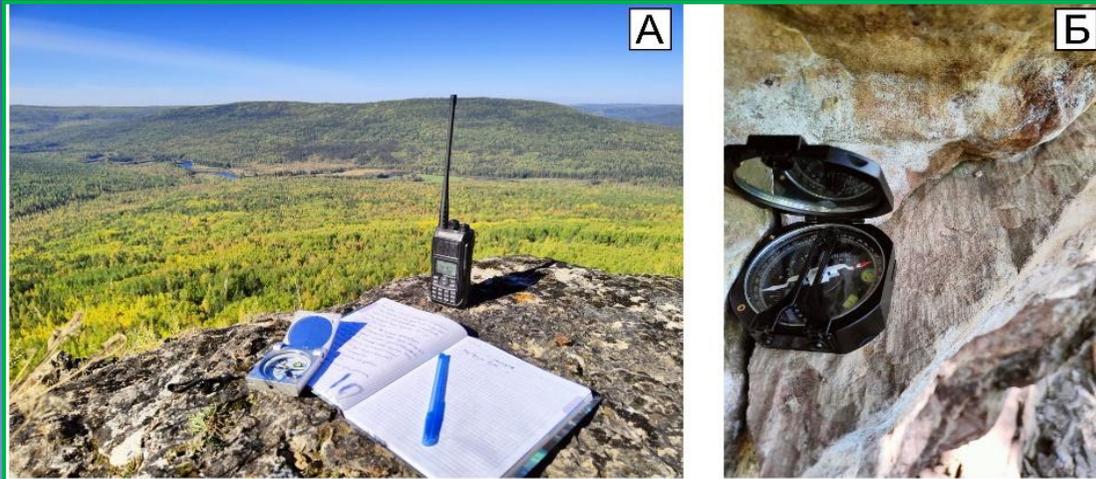
# Актуальность данного исследования

Большинство опубликованных работ, основанных на анализе плотных облаков точек, используют полуавтоматический способ извлечения элементов залегания трещин путем их оцифровки. Те из них, которые делают это автоматическим способом, как правило, получают результат в виде одного, реже двух максимумов трещиноватости на диаграммах. В реальности, трещиноватость любого горного массива определяется как минимум тремя основными системами трещин. Другими проблемами анализа цифровых обнажений являются временные затраты и ресурсы компьютера, необходимые для обсчета цифровой модели обнажения (ЦМО). Даже на достаточно мощных вычислительных машинах процесс построения и обработки ЦМО может занимать более суток. Таким образом, необходим поиск оптимального подхода к сбору данных дистанционным способом и последующему анализу разрывной сети обнажений путем автоматических вычислений.

## Цель данного исследования

Провести опытно-методические работы по анализу трещин и их систем, выделенных автоматическим способом в известных компьютерных программах, для нахождения удовлетворительных условий сбора и обработки данных, которые будут способствовать перспективам использования цифровых двойников обнажений для структурного анализа и их более содержательного внедрения в практику горно-геологических работ.

## Процесс измерения трещин геологическим компасом



## Аэрофотосъемка коренного выхода БПЛА DJI Phantom 4 RTK



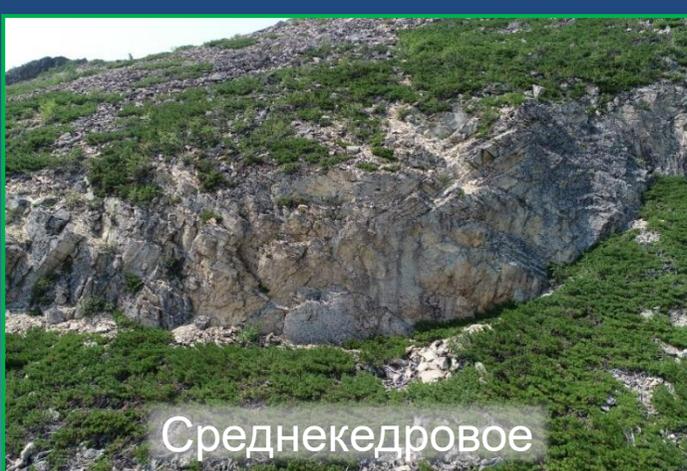
Одно обнажение: сотни фотографий, несколько ГБ;

Объем в день может достигать: 100-200 ГБ;

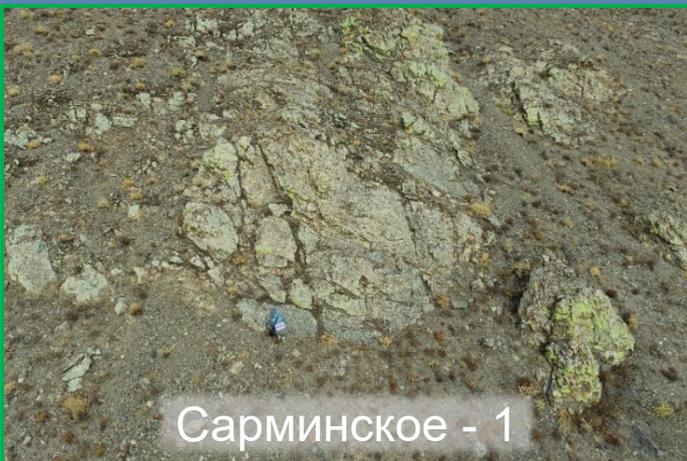
Метод обработки: фотограмметрия;

Программа: Agisoft Metashape

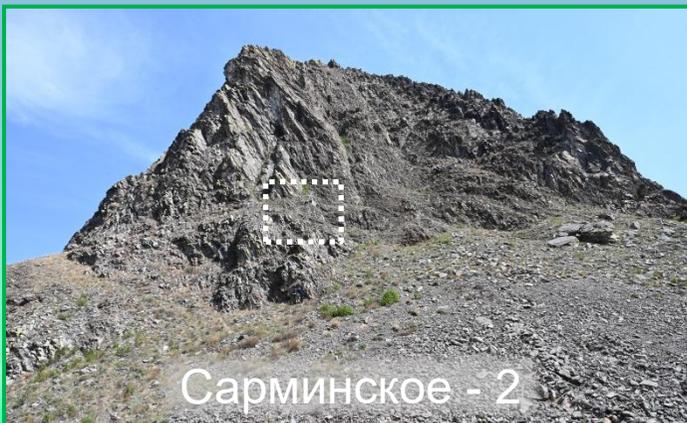
Рабочая станция: Intel Core i9-10940X/GIGABYTE X299 UD4 Pro/8\*16Gb DDR4/ 500Gb SSD M.2/2\*8Tb HDD/850W/)



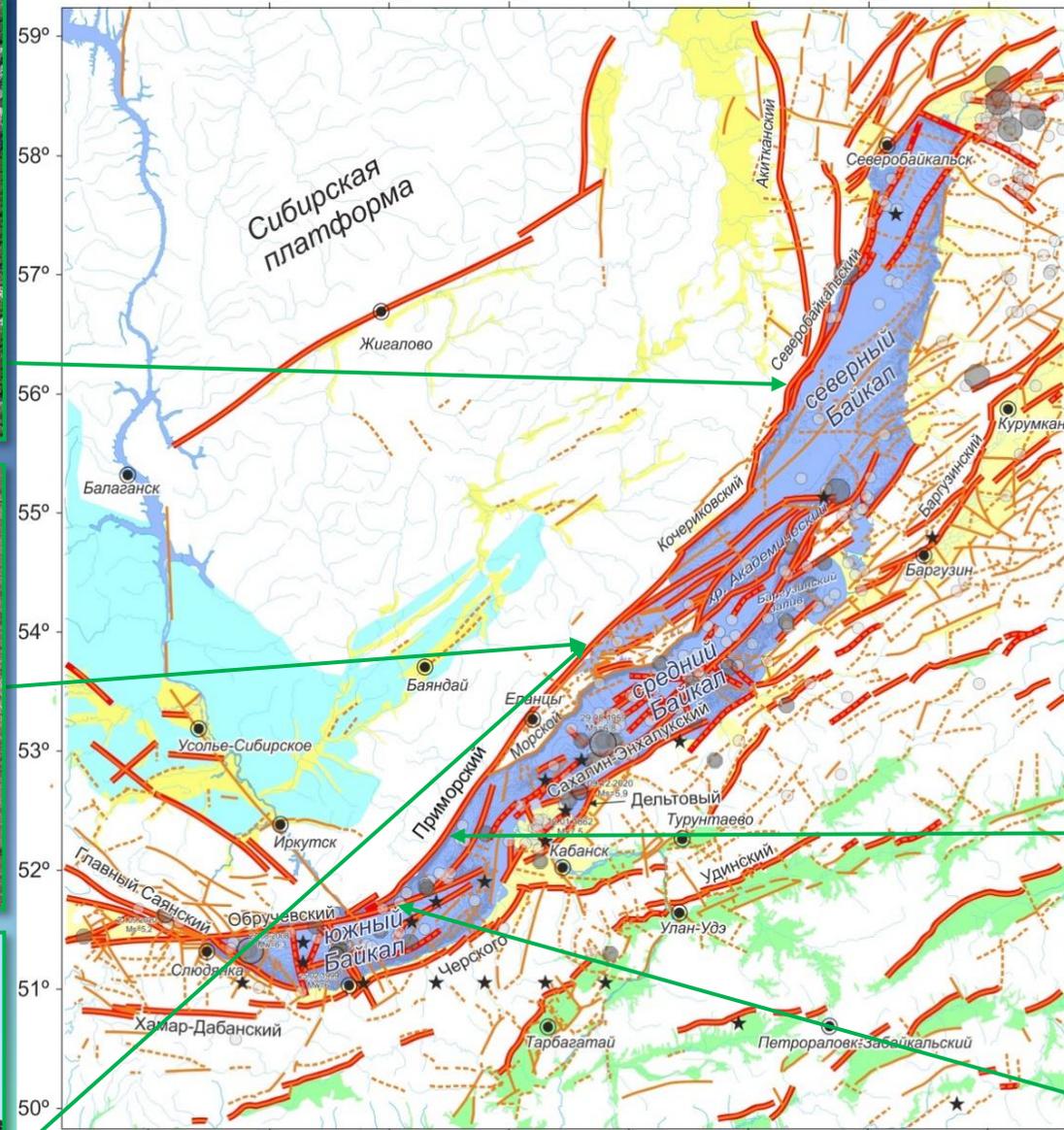
Среднекедровое



Сарминское - 1



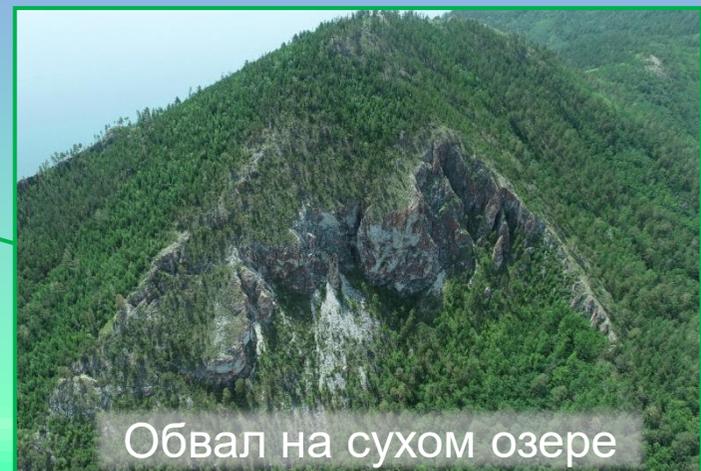
Сарминское - 2



# Тестовые объекты исследования на карте разломов Байкальского рифта

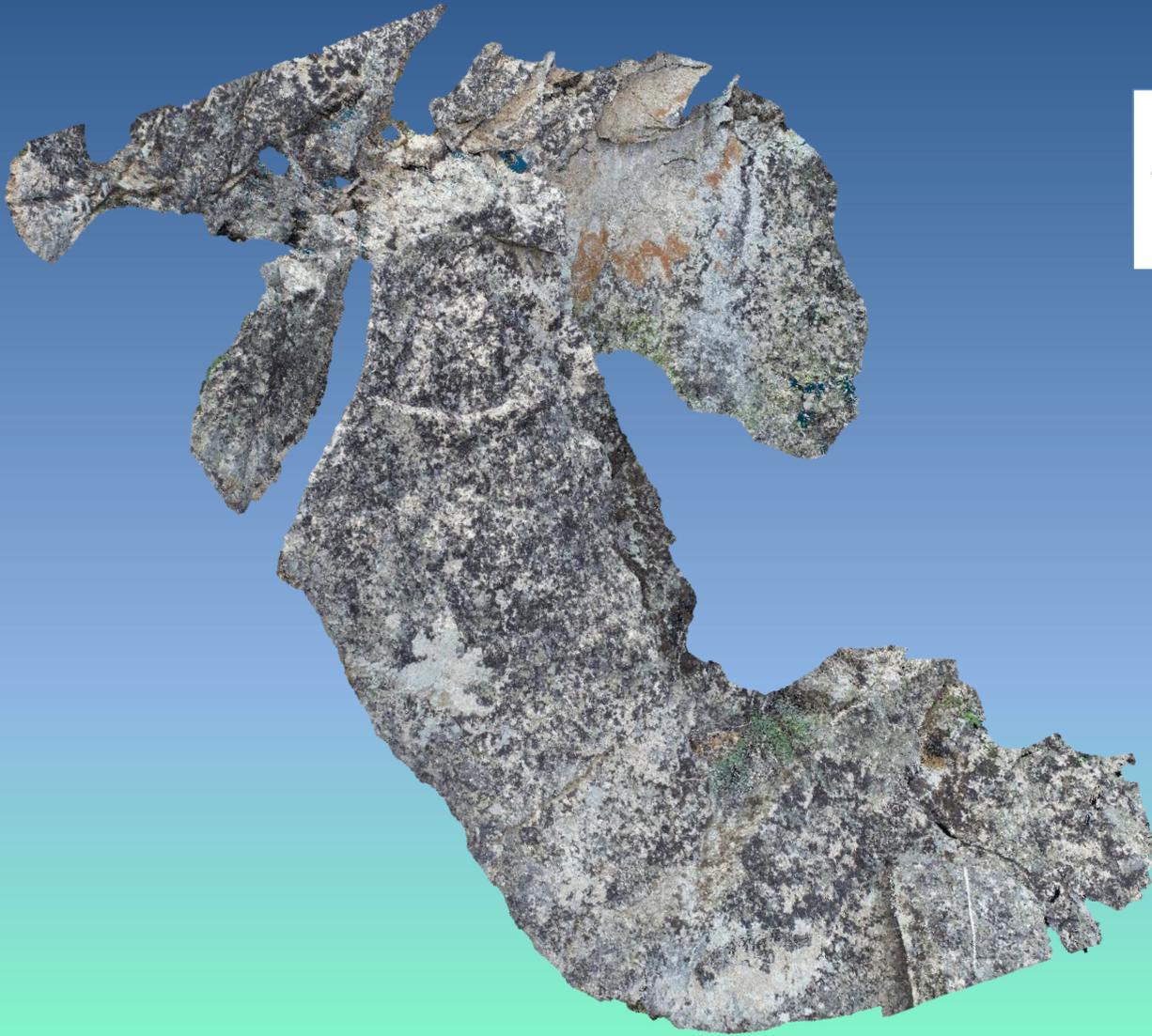


Красноярское



Обвал на сухом озере

# Плотное облако Красноярского обнажения

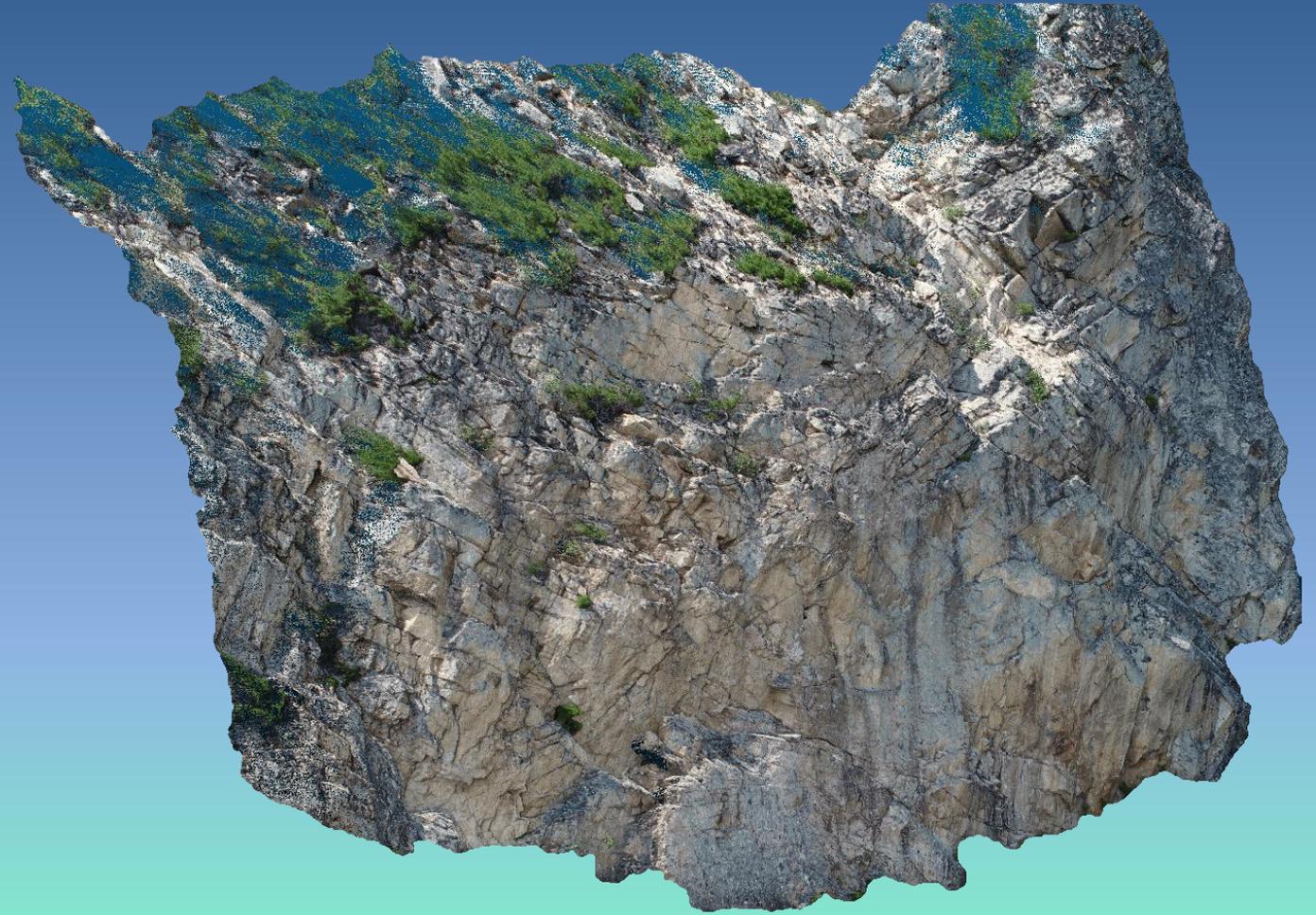


**Плотное облако точек** – это набор вершин в трехмерной системе координат для представления внешней поверхности объекта.



Количество точек: 13,417 млн. точек

# Плотное облако Среднекедрового обнажения

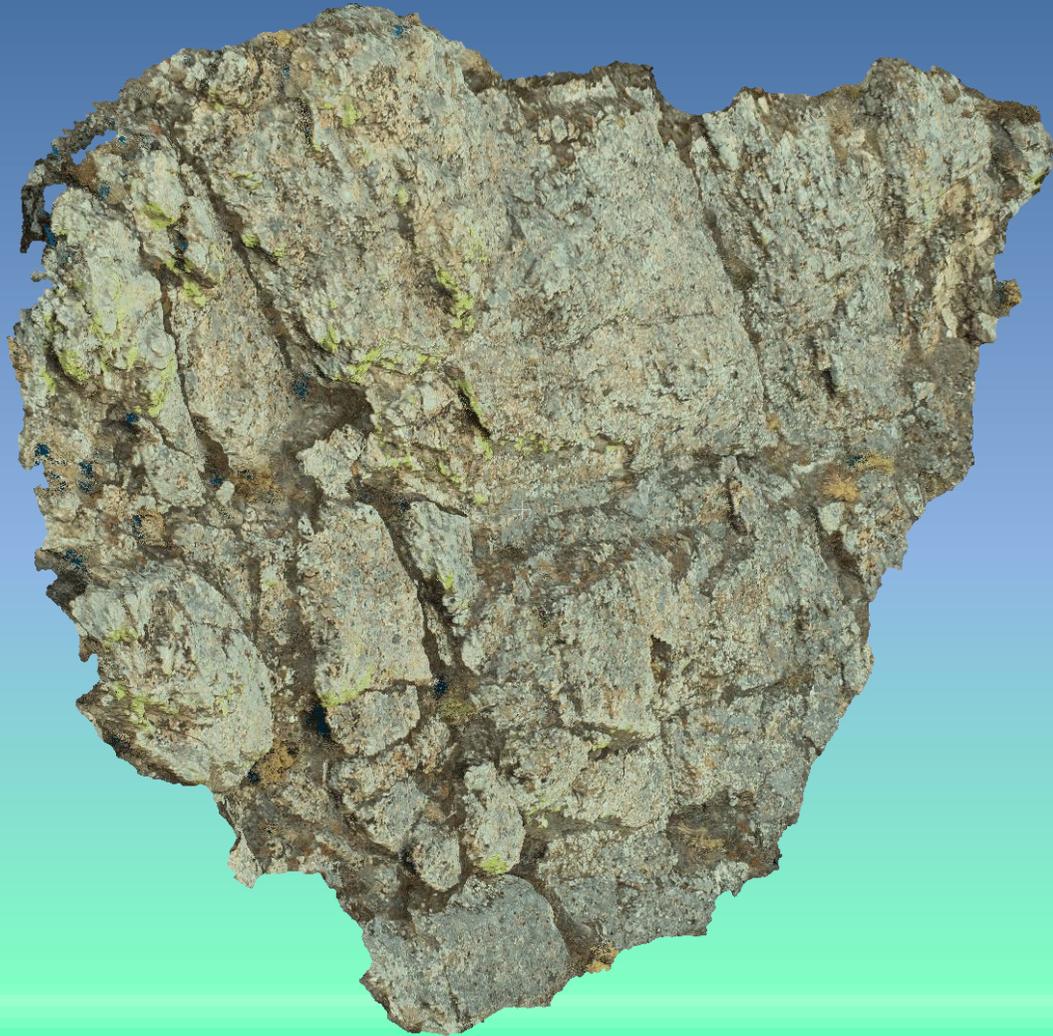


Количество точек:  
6,573 млн. точек



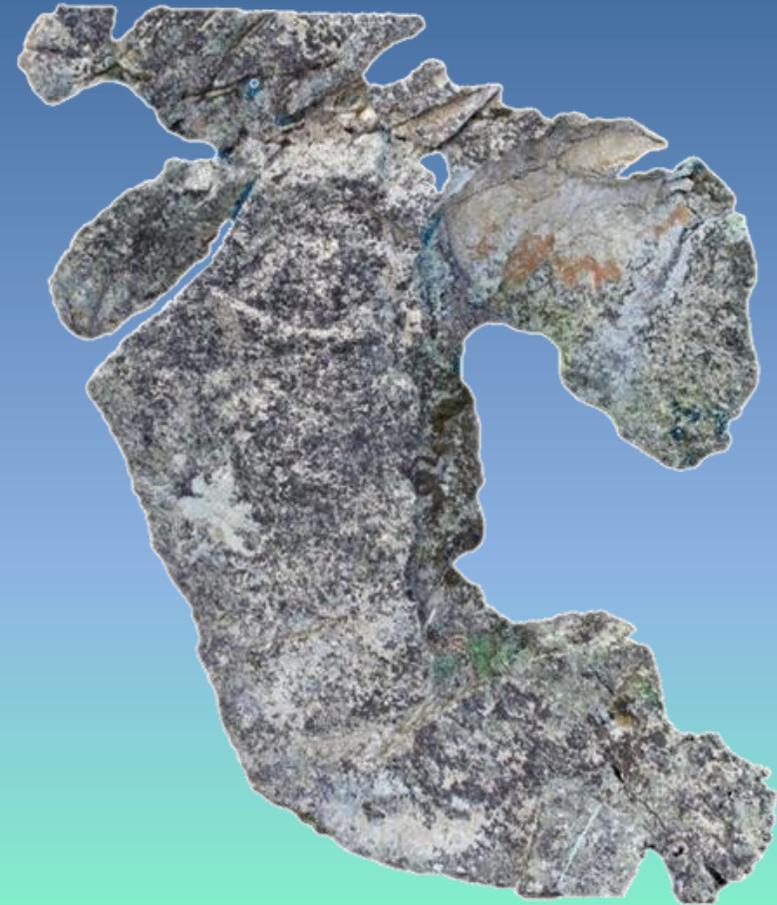
# Плотное облако обнажения Сарминское - 1

Количество точек: 6,077 млн. точек

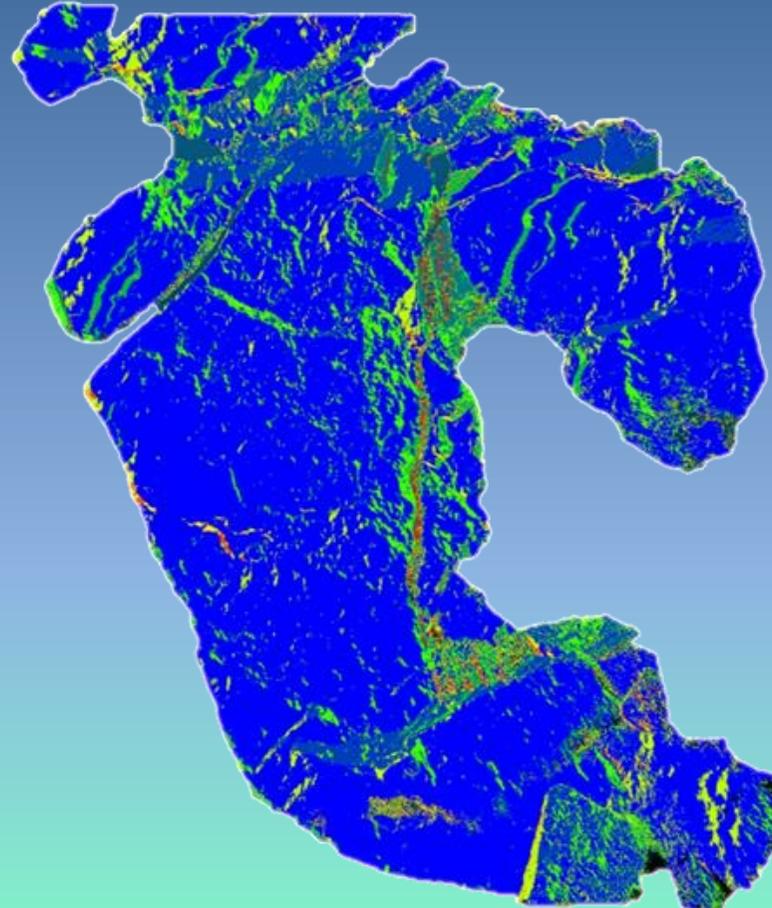


# Извлечение систем трещин Красноярского обнажения

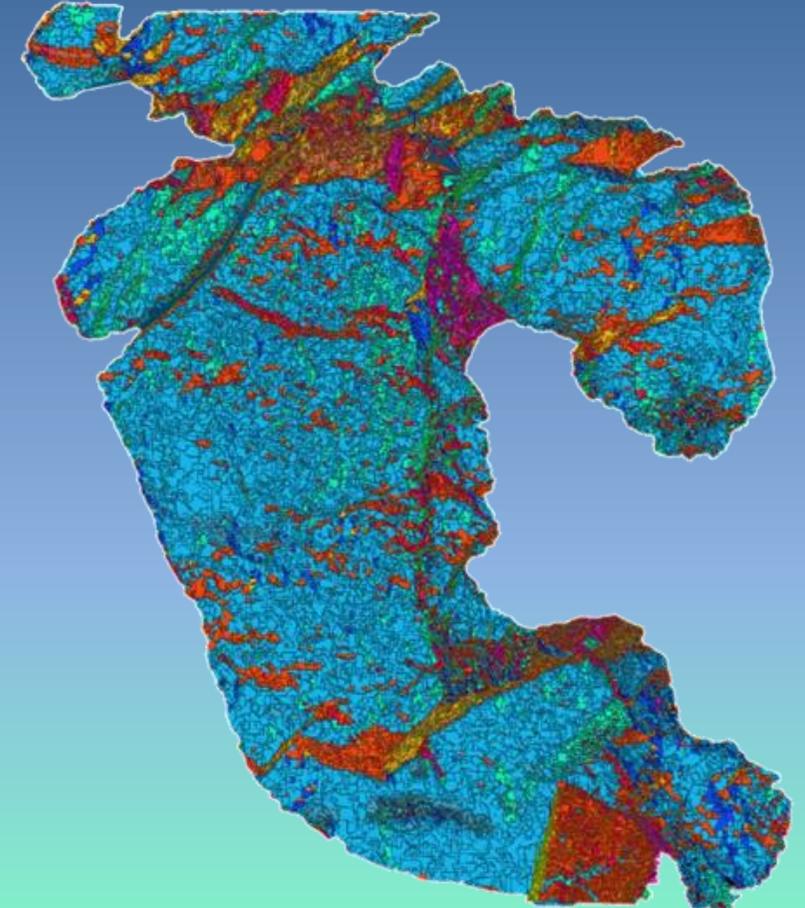
Плотное облако, созданное в Agisoft Metashape



Плотное облако, классифицированное в DSE



Плоскости, выделенные в CloudCompare

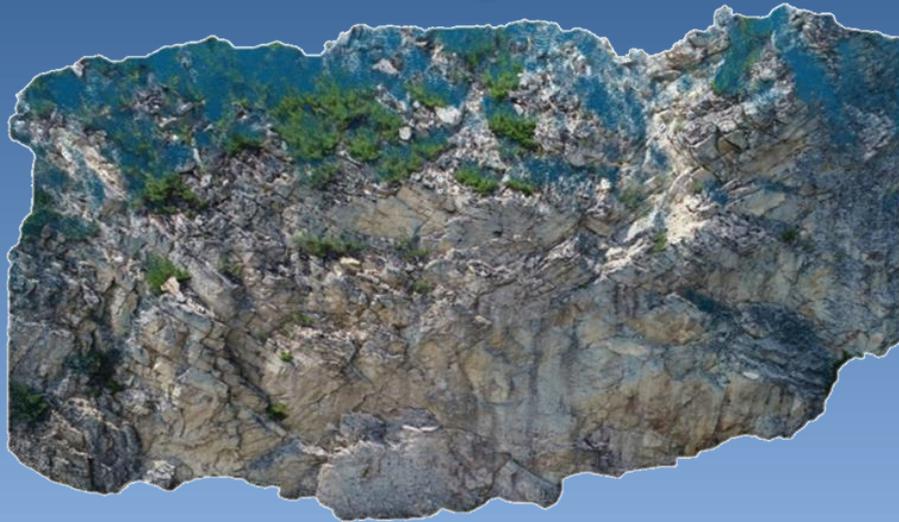


Цветами выделены разные системы трещин

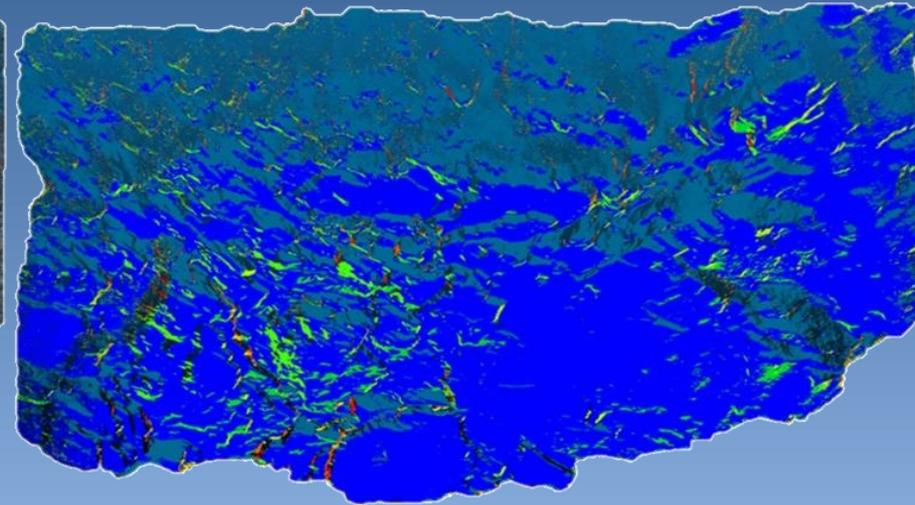
Для извлечения азимутов и углов падения трещин тестировались две наиболее известных компьютерных программы – DSE (Discontinuity Set Extractor) и плагин «FACET» для программы CloudCompare [5] с открытым исходным кодом.

# Извлечение систем трещин Среднекедрового обнажения

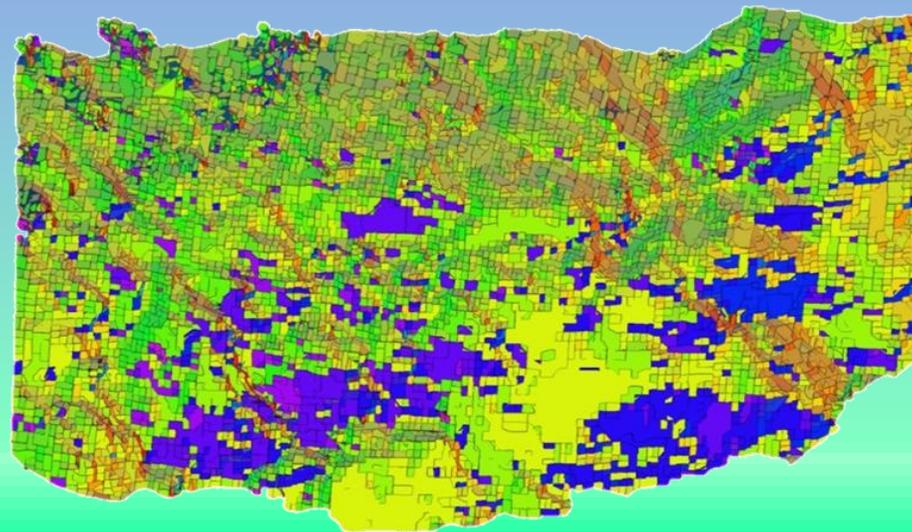
Плотное облако, созданное в Agisoft Metashape



Плотное облако, классифицированное в DSE

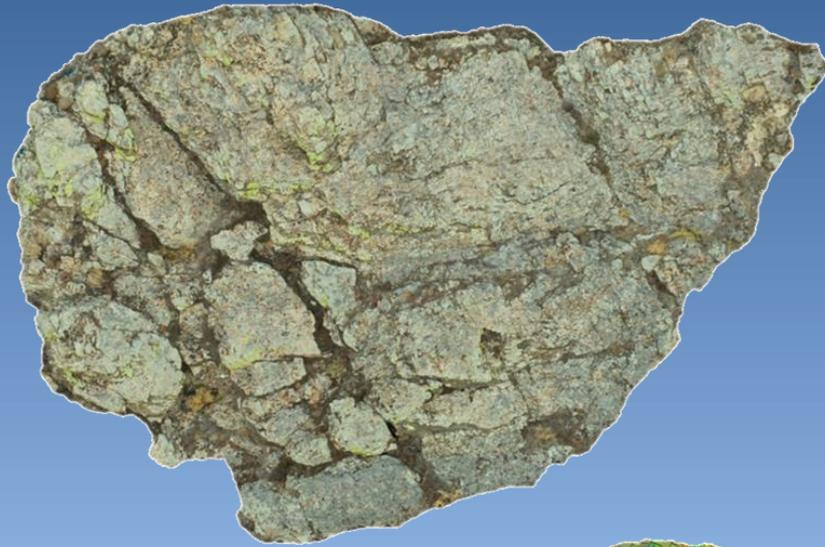


Плоскости, выделенные в CloudCompare

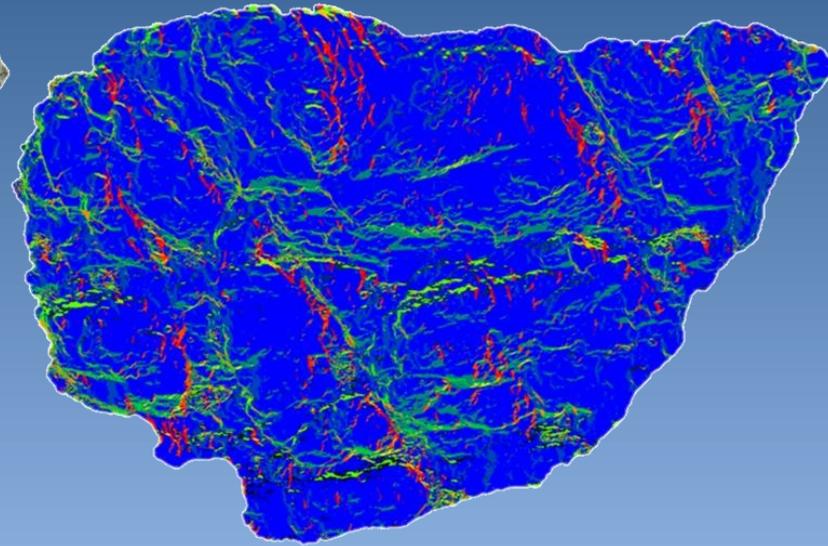


# Извлечение систем трещин обнажения Сарминское - 1

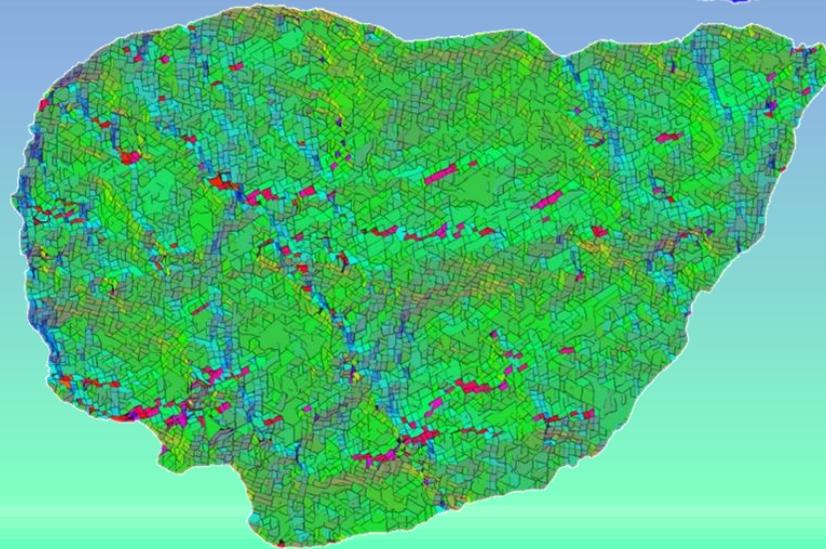
Плотное облако, созданное в Agisoft Metashape



Плотное облако, классифицированное в DSE



Плоскости, выделенные в  
CloudCompare



# Диаграммы трещиноватости

1

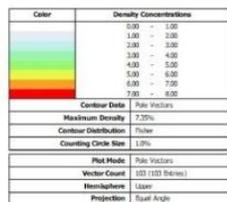
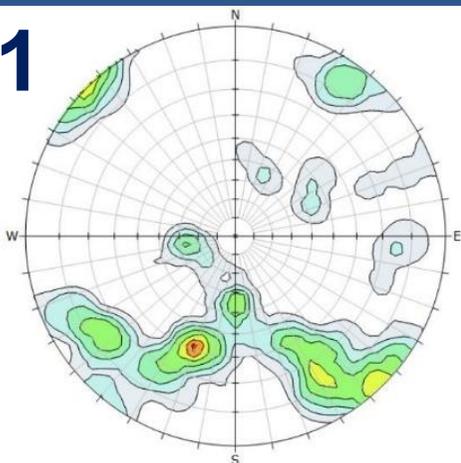


Диаграмма по данным полевых замеров

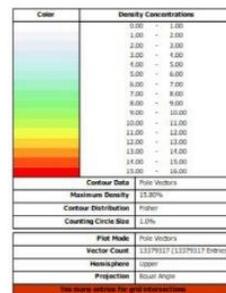
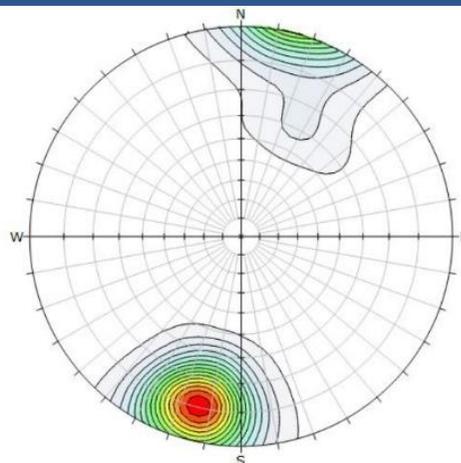


Диаграмма по данным замеров, извлеченных DSE

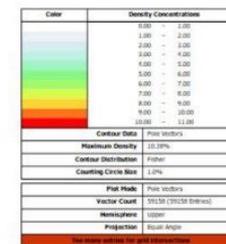
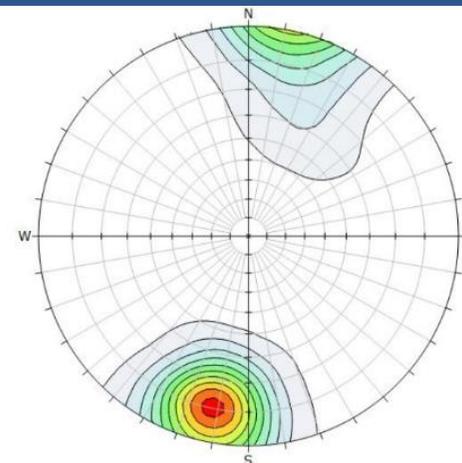


Диаграмма по данным замеров, извлеченных CloudCompare

2

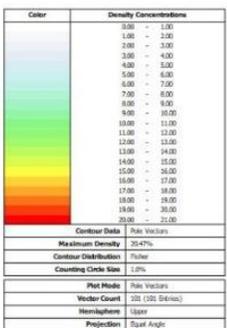
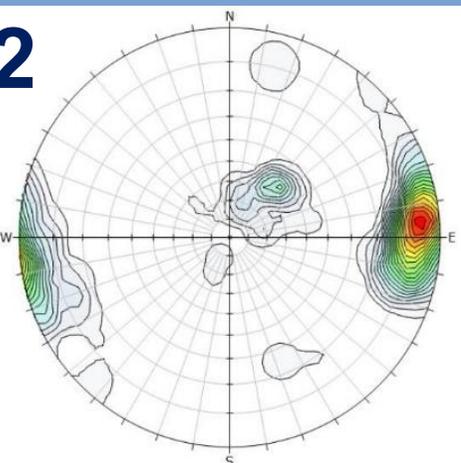


Диаграмма по данным полевых замеров

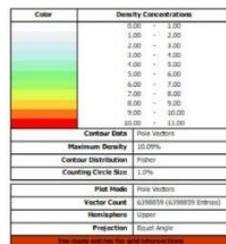
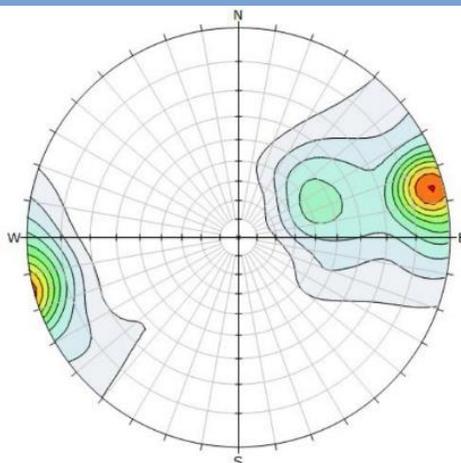


Диаграмма по данным замеров, извлеченных DSE

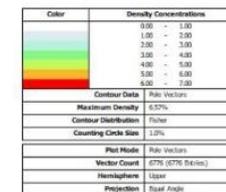
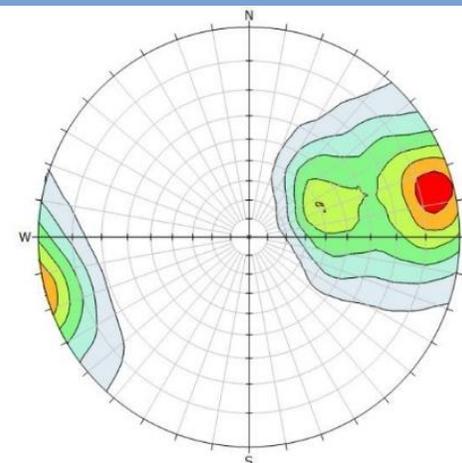


Диаграмма по данным замеров, извлеченных CloudCompare

1 – Красноярское обнажение; 2 – Среднекедровое обнажение

# Диаграммы трещиноватости для Сарминского - 1 обнажения, построенные в программе DIPs

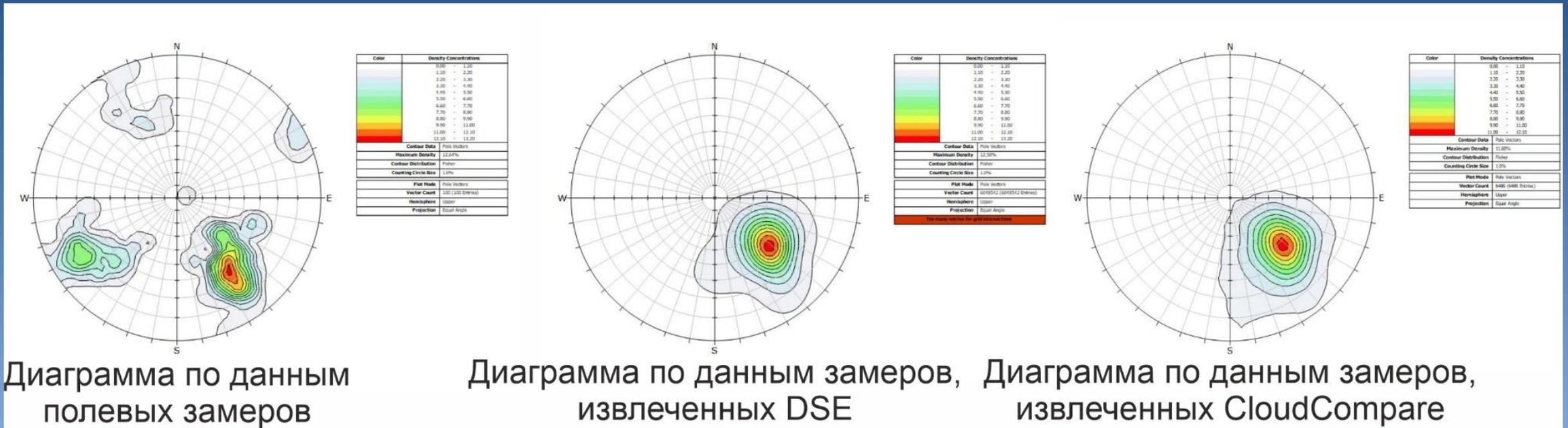
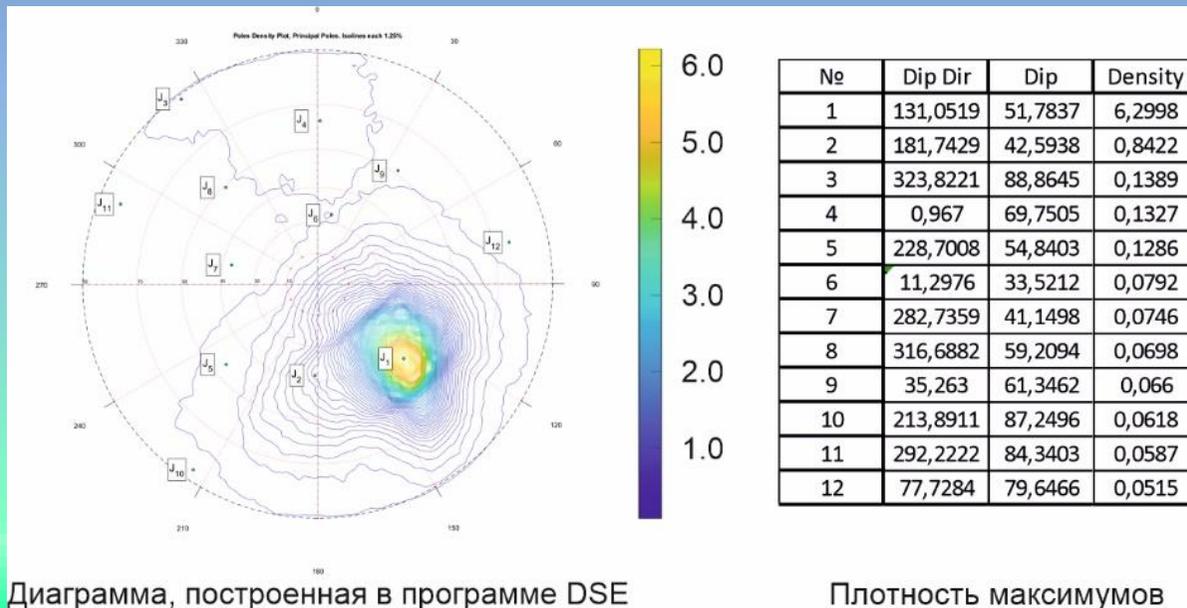


Диаграмма по данным полевых замеров

Диаграмма по данным замеров, извлеченных DSE

Диаграмма по данным замеров, извлеченных CloudCompare



Диаграмма, построенная в программе DSE

Плотность максимумов

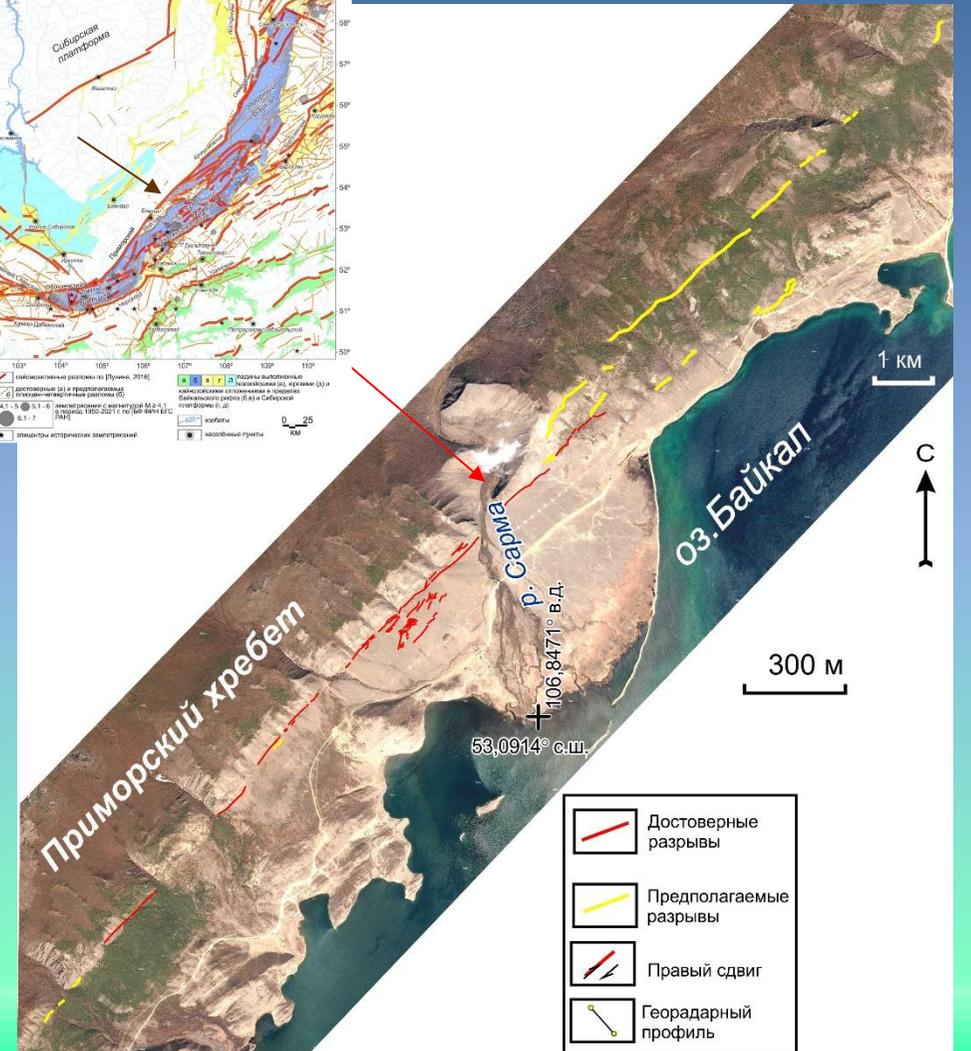
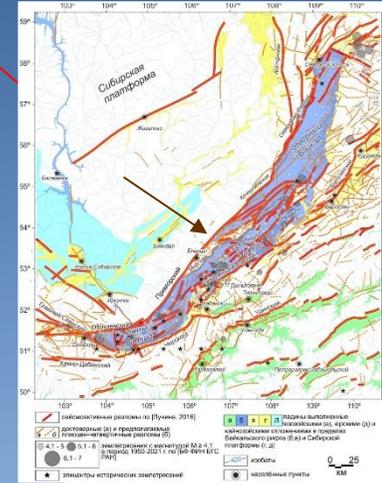
← в программе DSE (Discontinuity Set Extractor)

## Выводы 1-3:

- Высокая точность математического расчета азимутов и углов падения трещин и хорошая сходимость с результатами измерения геологическим компасом;
- Ракурс съемки и обнаженность одной стенки выхода – проблема для определения разнообразия систем трещин;
- DSE позволяет выделить основные системы трещин.

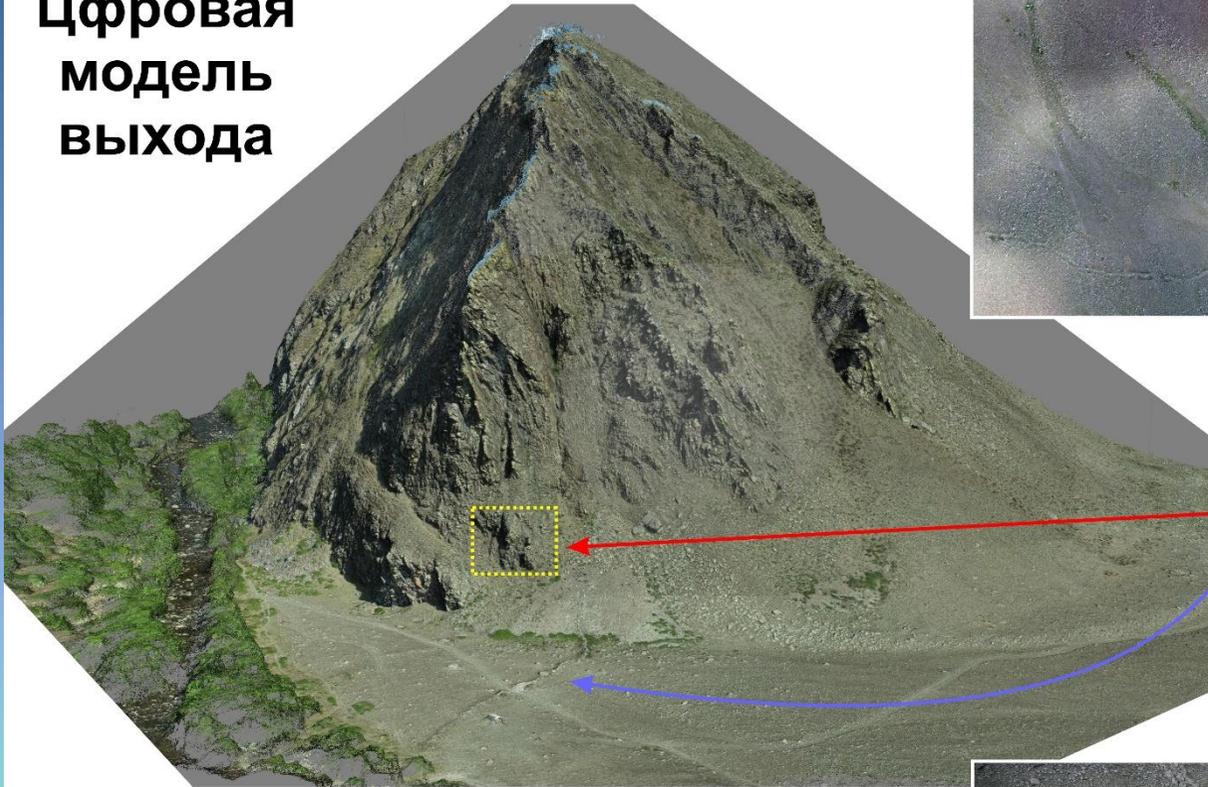


# Обнажение Сарминское – 2 (ущелье Сарма и главный сместитель Приморского разлома)

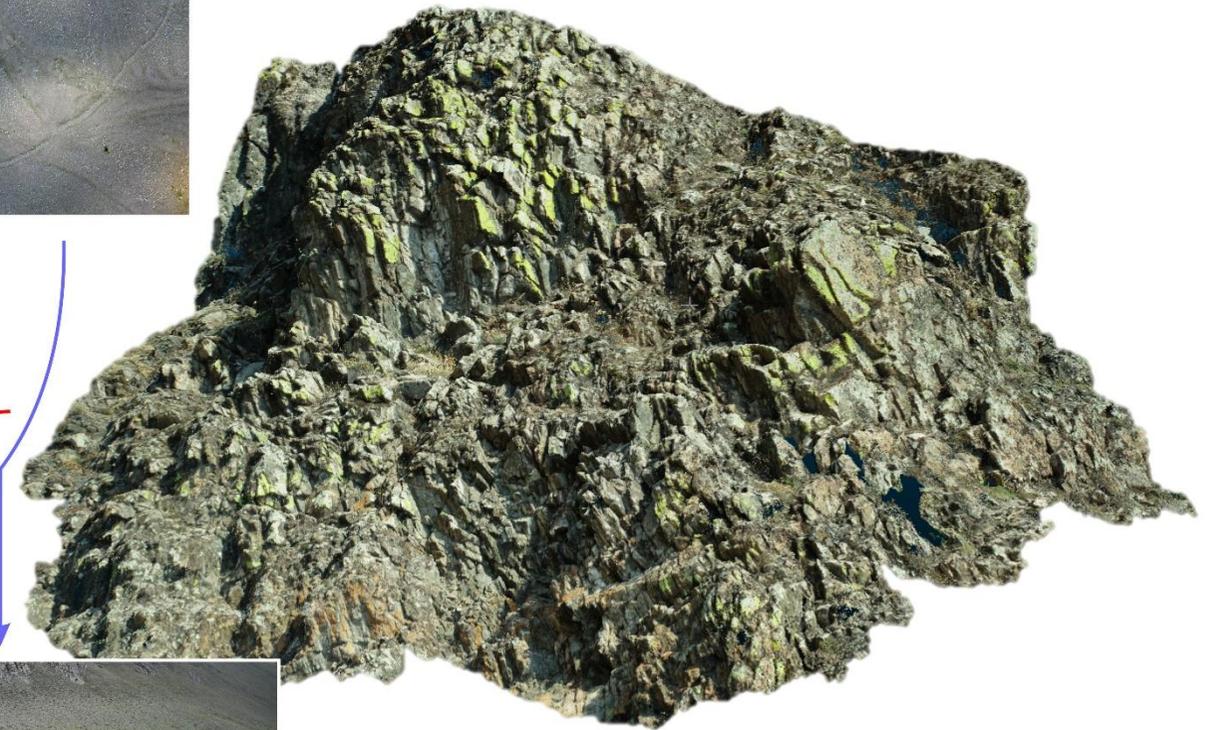


# Обнажение Сарминское – 2

Цфровая  
модель  
выхода



Плотное облако, созданное в  
Agisoft Metashape

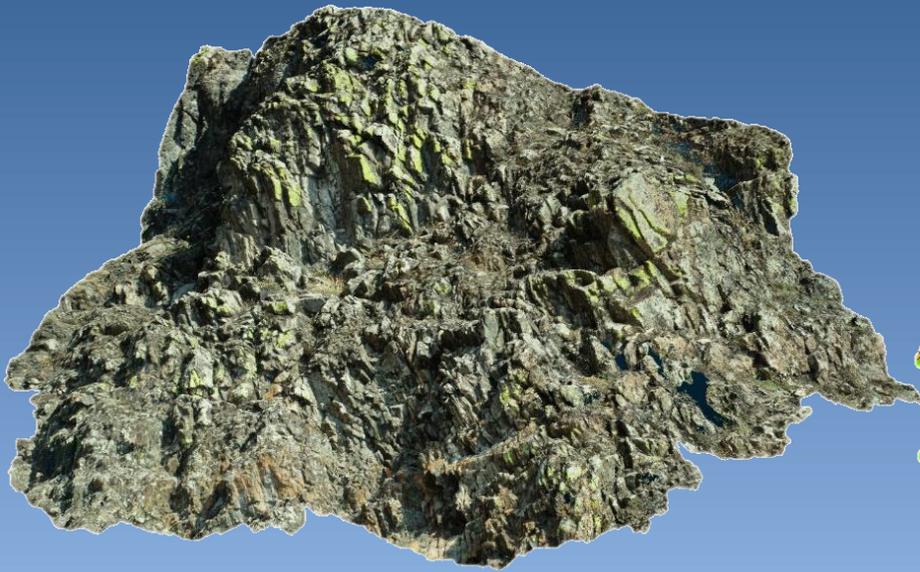


Вал, связанный с деятельностью  
курыкан, обитаемых в Западном  
Прибайкалье в VI–IX веках нашей эры

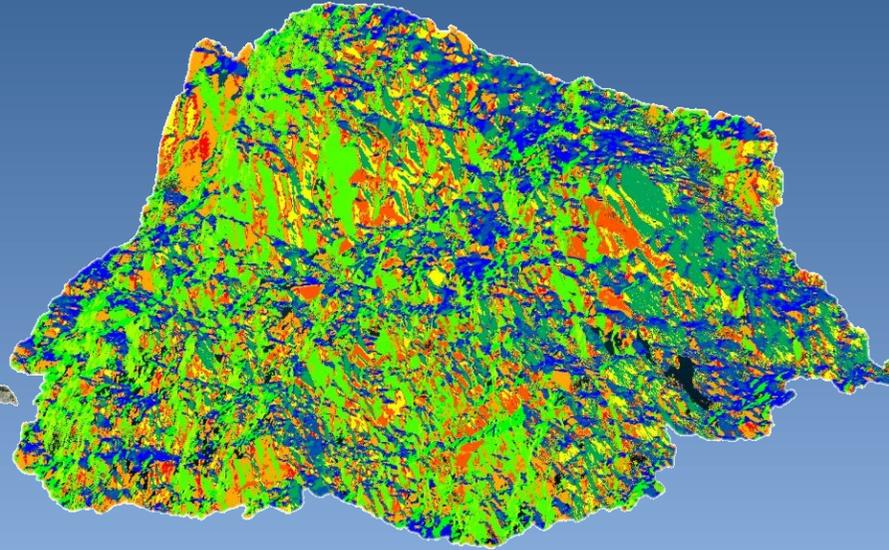


# Извлечение систем трещин обнажения Сарминское - 2

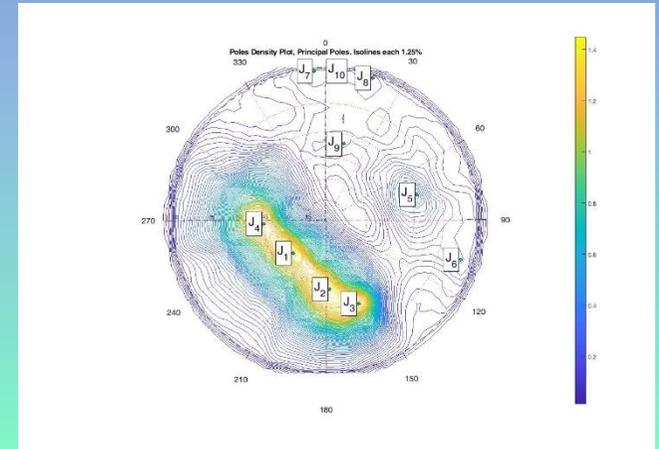
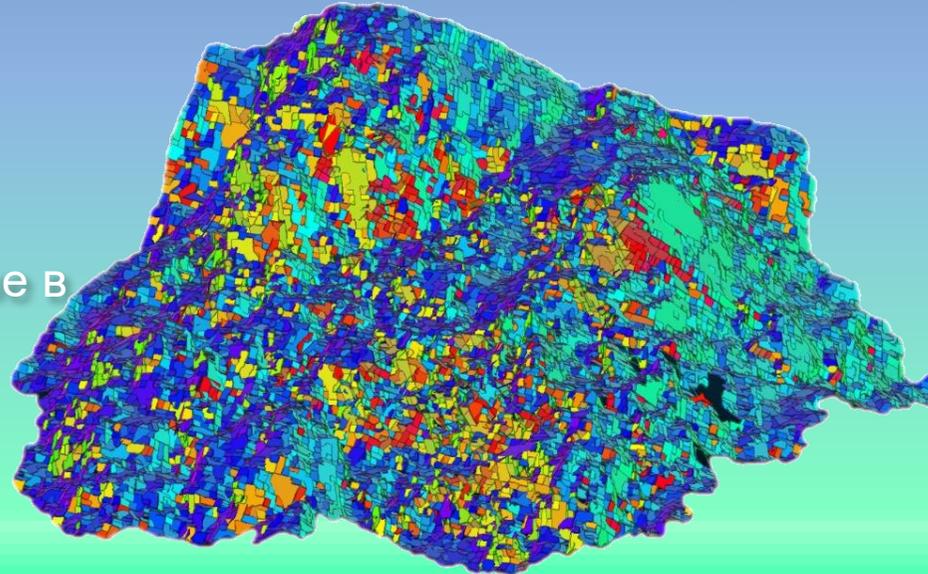
Плотное облако, созданное в Agisoft Metashape



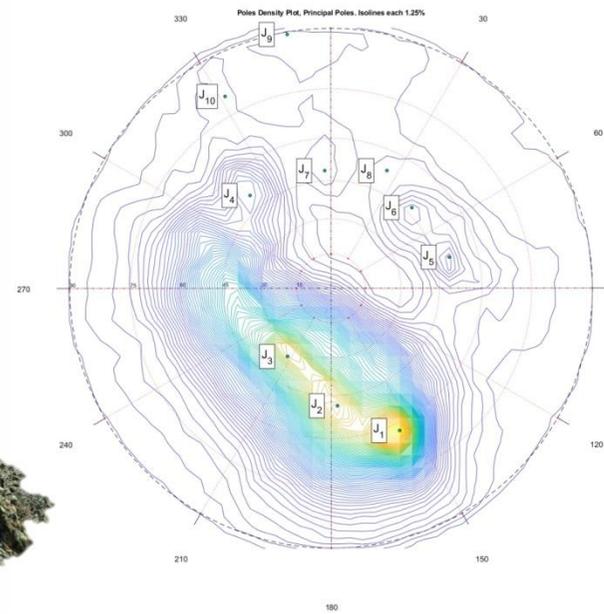
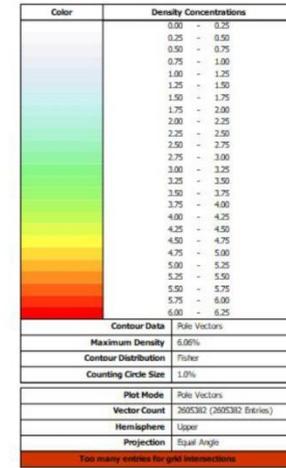
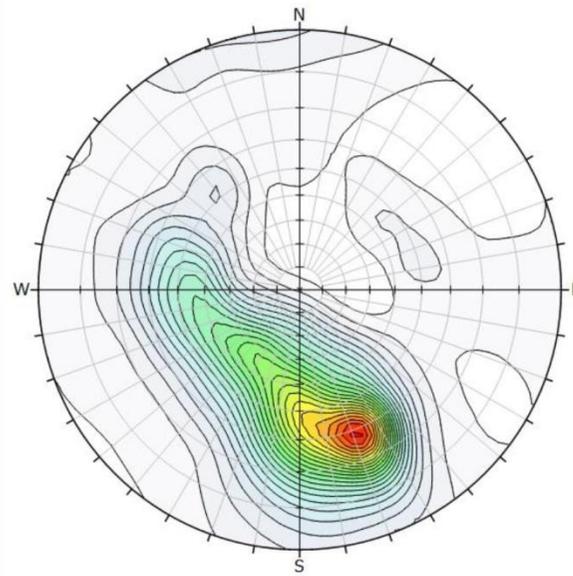
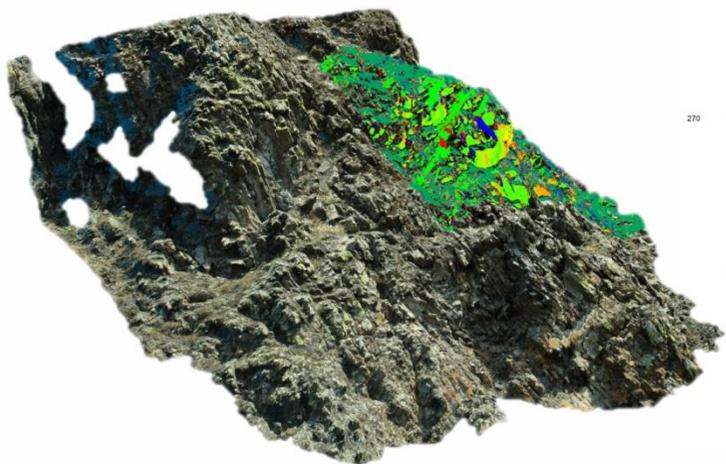
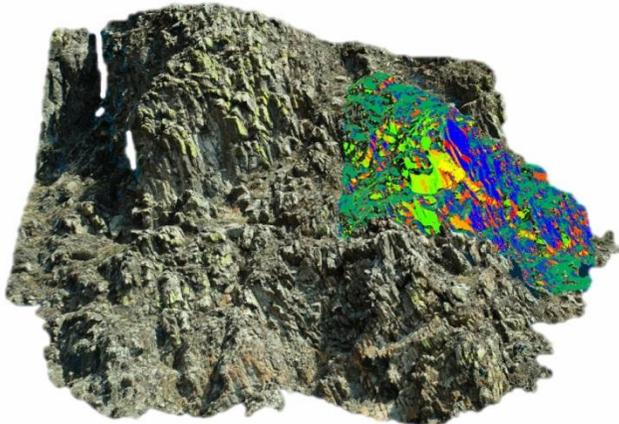
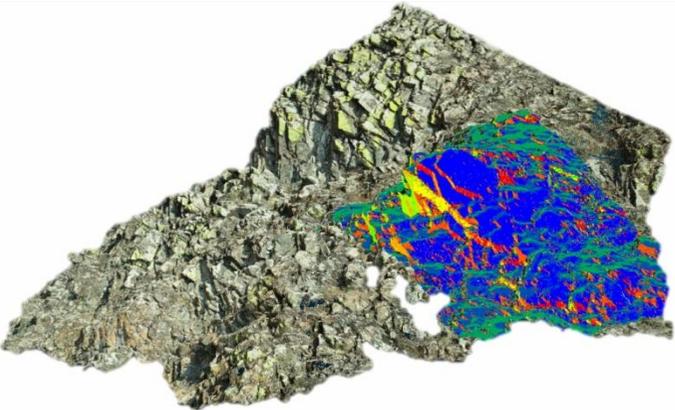
Плотное облако, классифицированное в DSE



Плоскости, выделенные в CloudCompare

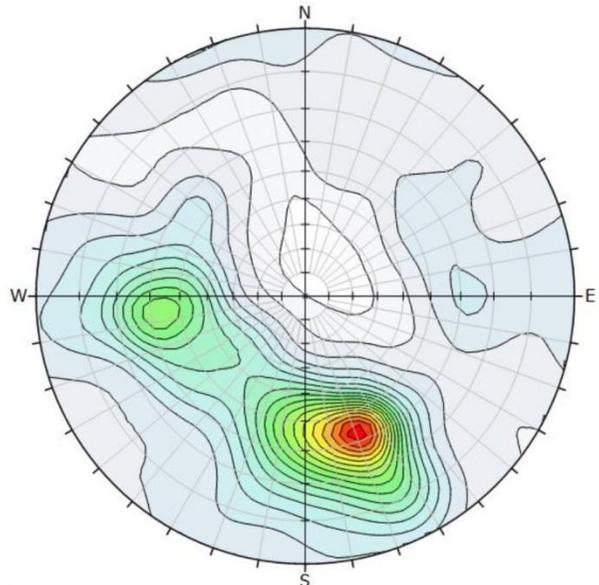
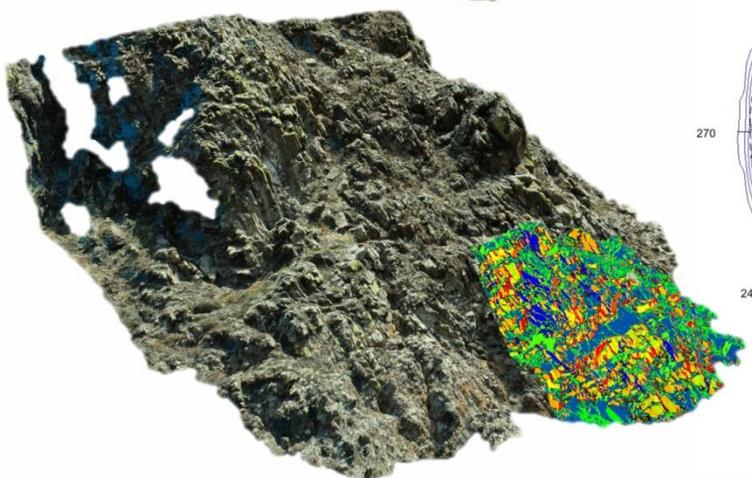
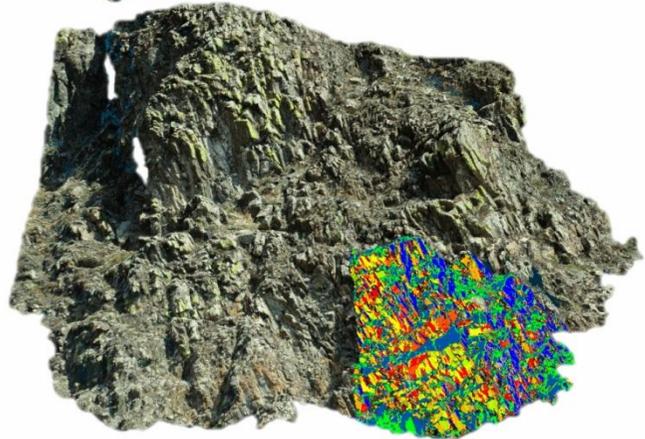
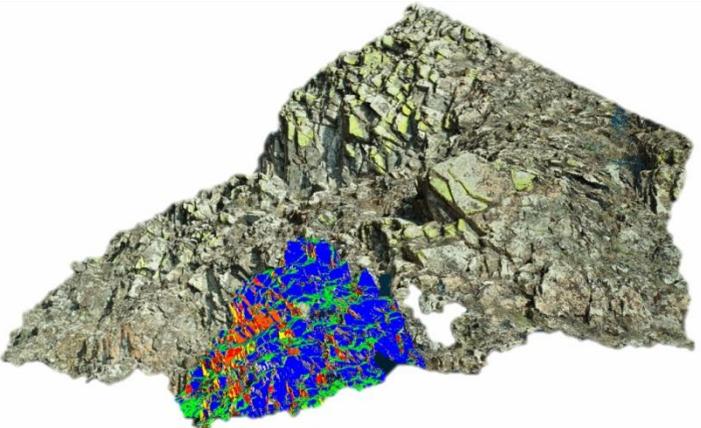


**Диаграммы  
 трещиноватости для  
 1 фрагмента  
 Сарминского  
 обнажения - 2,  
 построенные в  
 программе DIPs и  
 DSE**



No	Dip Dir	Dip	Density
1	154.45	62.51	2.70
2	176.99	48.74	2.20
3	212.47	34.49	2.05
4	319.09	50.59	0.49
5	75.25	50.12	0.35
6	44.99	47.27	0.29
7	356.98	48.74	0.15
8	25.33	53.18	0.13
9	350.31	89.44	0.13
10	331.26	80.18	0.12

**Диаграммы  
 трещиноватости для  
 2 фрагмента  
 Сарминского -  
 обнажения - 2,  
 построенные в  
 программе DIPs и  
 DSE**



Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.25
	0.25 - 0.50
	0.50 - 0.75
	0.75 - 1.00
	1.00 - 1.25
	1.25 - 1.50
	1.50 - 1.75
	1.75 - 2.00
	2.00 - 2.25
	2.25 - 2.50
	2.50 - 2.75
	2.75 - 3.00
	3.00 - 3.25
	3.25 - 3.50
	3.50 - 3.75
	3.75 - 4.00
	4.00 - 4.25
	4.25 - 4.50
	4.50 - 4.75

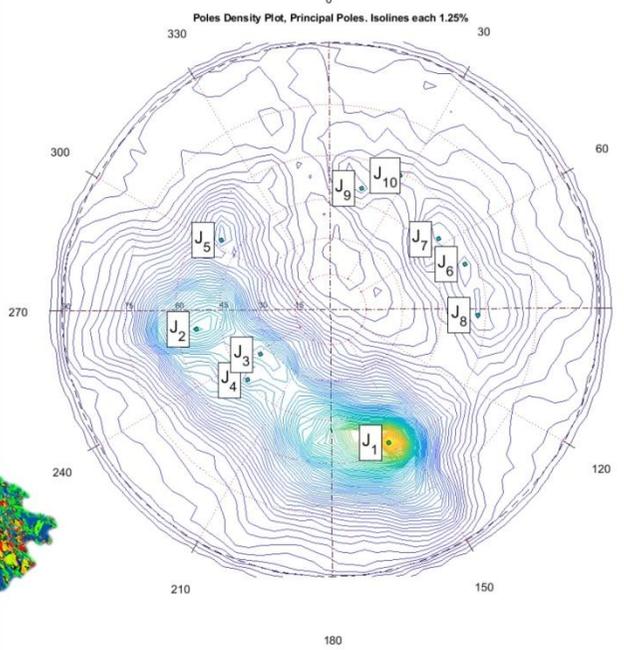
  

Contour Data	
Maximum Density	4.67%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

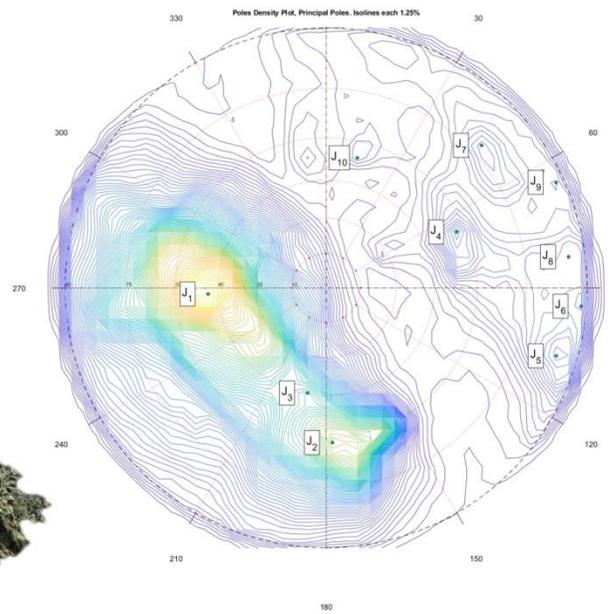
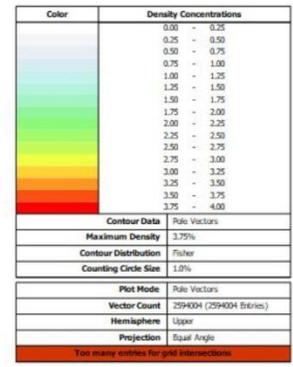
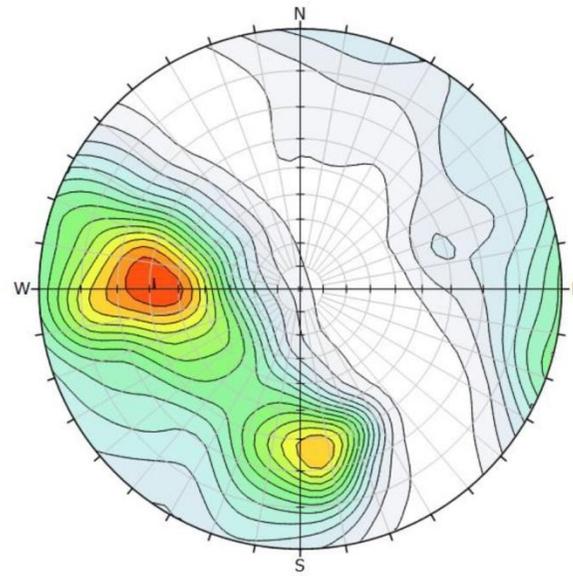
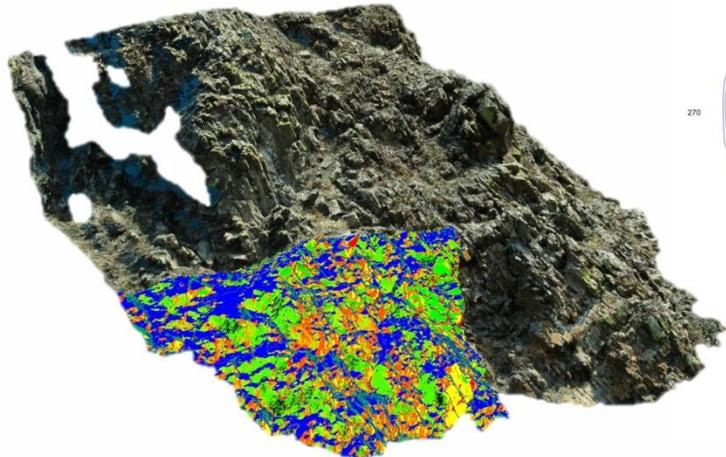
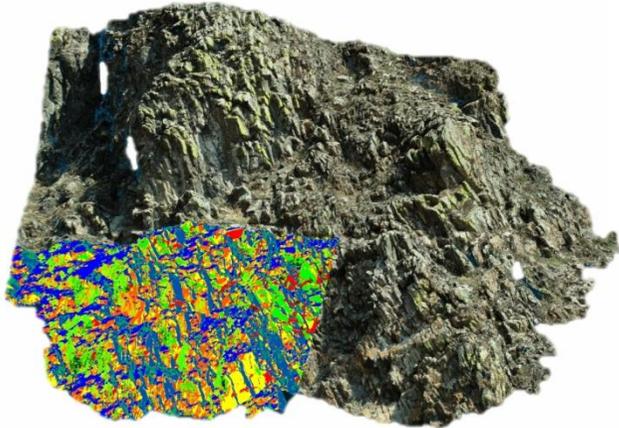
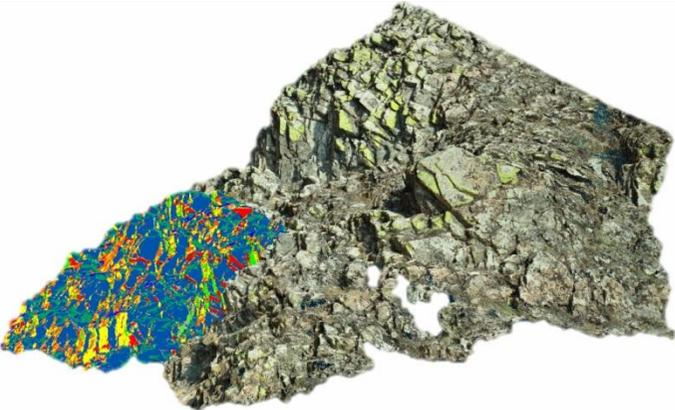
Plot Mode	
Vector Count	204800 (204800 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle

Too many entries for grid intersections

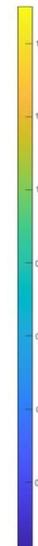
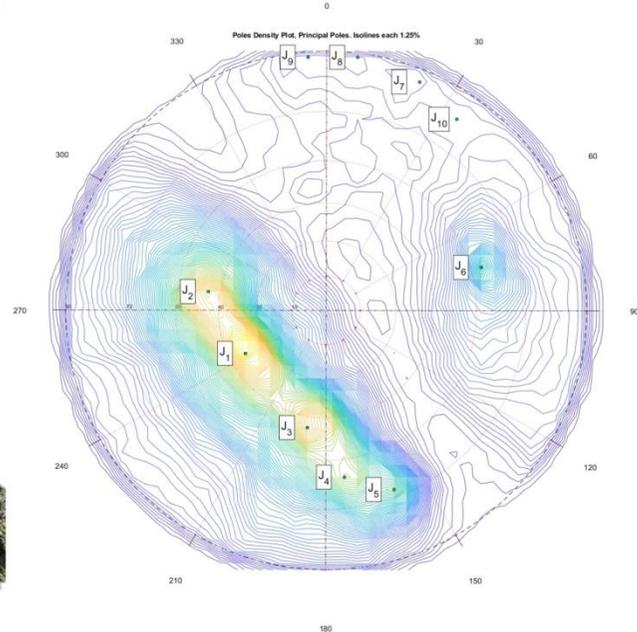
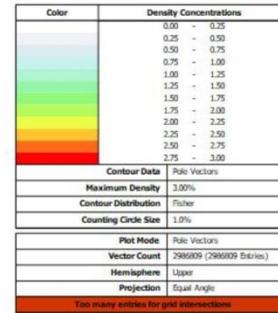
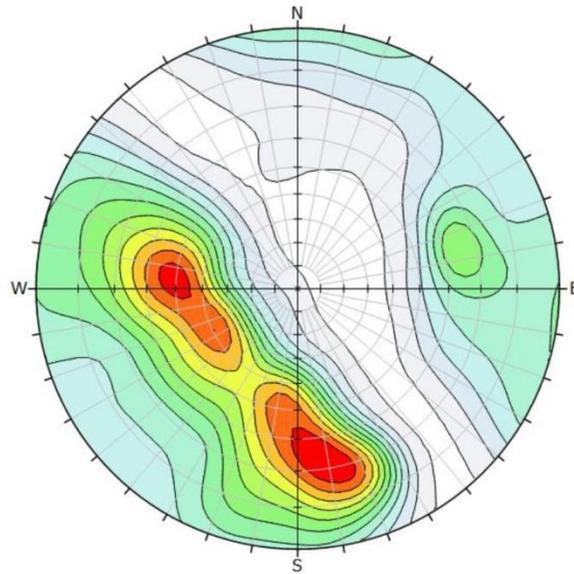
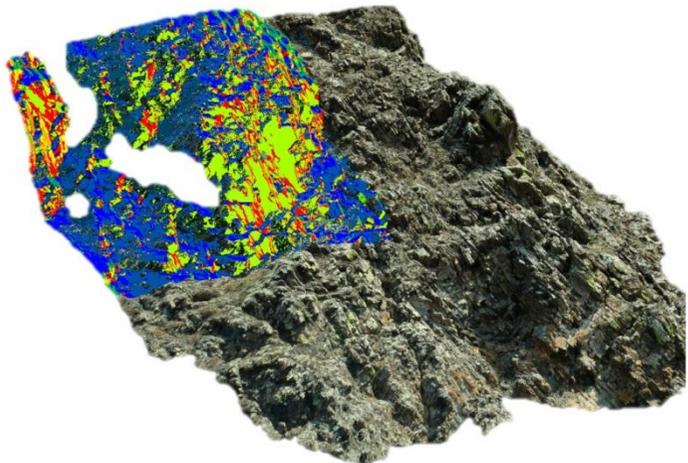
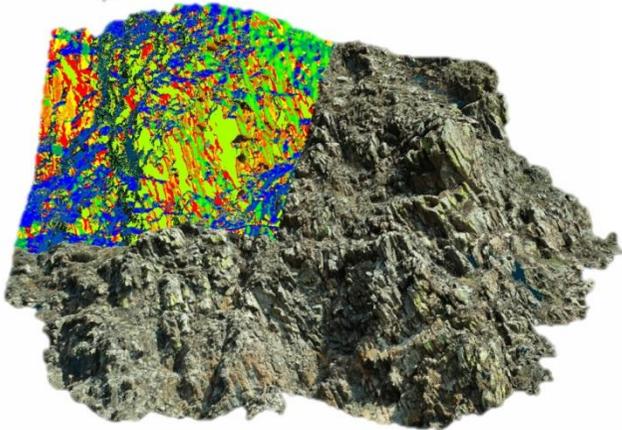
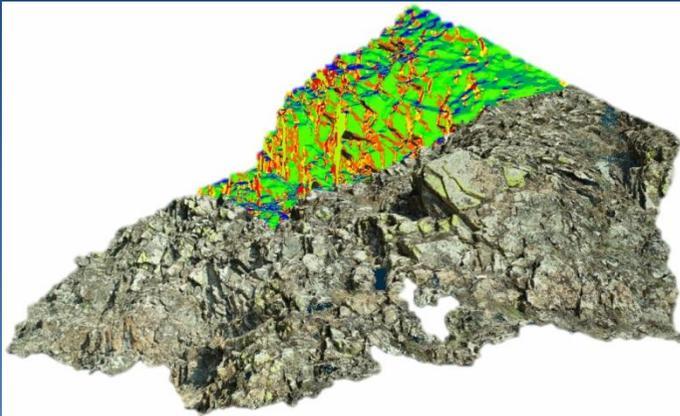


№	Dip Dir	Dip	Density
1	156.79	57.09	2.52
2	261.86	53.58	1.17
3	237.51	34.48	0.96
4	229.75	44.13	0.91
5	302.91	51.46	0.55
6	71.57	55.59	0.43
7	57.11	51.48	0.42
8	92.49	57.46	0.41
9	14.76	50.13	0.30
10	27.66	58.88	0.29

**Диаграммы**  
**трещиноватости для**  
**3 фрагмента**  
**Сарминского -**  
**обнажения - 2,**  
**построенные в**  
**программе DIPs и**  
**DSE**



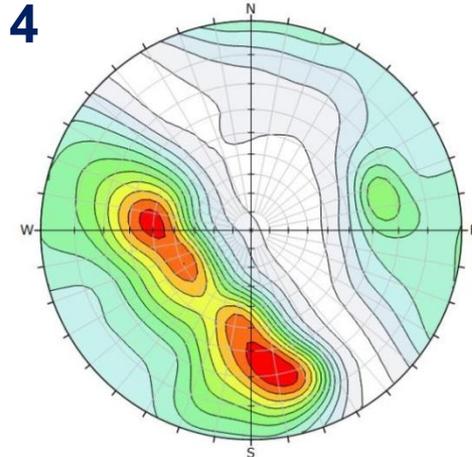
№	Dip Dir	Dip	Density
1	267.00	48.73	1.63
2	177.70	61.55	1.18
3	190.00	44.67	0.89
4	66.80	57.09	0.38
5	106.55	85.16	0.35
6	94.18	88.77	0.29
7	47.38	77.93	0.27
8	82.69	86.22	0.26
9	65.32	88.22	0.18
10	13.40	54.40	0.16



№	Dip Dir	Dip	Density
1	241.70	38.73	1.52
2	278.98	49.20	1.36
3	188.97	49.21	1.29
4	173.66	65.78	1.07
5	159.22	72.88	0.94
6	74.36	63.44	0.79
7	22.07	87.09	0.18
8	6.96	89.04	0.18
9	355.82	88.77	0.17
10	34.11	83.43	0.16

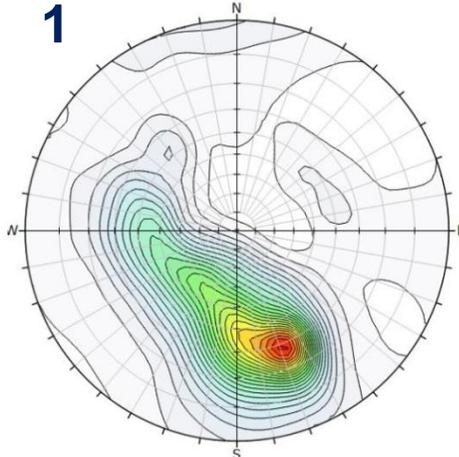
Диаграммы  
 трещиноватости для  
 4 фрагмента  
 Сарминского -  
 обнажения - 2,  
 построенные в  
 программе DIPs и  
 DSE

# Диаграммы трещиноватости для фрагментов Сарминского обнажения - 2, полученные по данным плотного облака точек (1-5), обработанных в DSE и визуализированных в программе DIPs



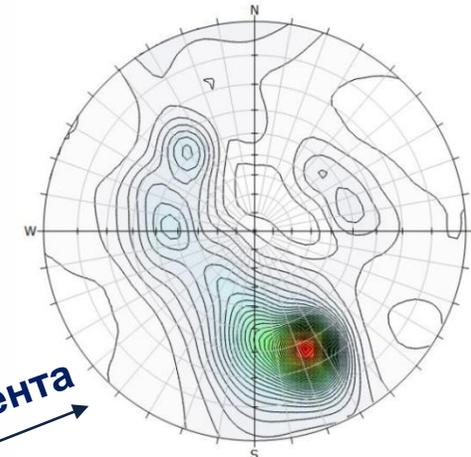
Color	Density Concentrations
0.50	0.50
0.75	0.75
1.00	1.00
1.25	1.25
1.50	1.50
1.75	1.75
2.00	2.00
2.25	2.25
2.50	2.50
2.75	2.75
3.00	3.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	3.00%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	296929 (296929 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle



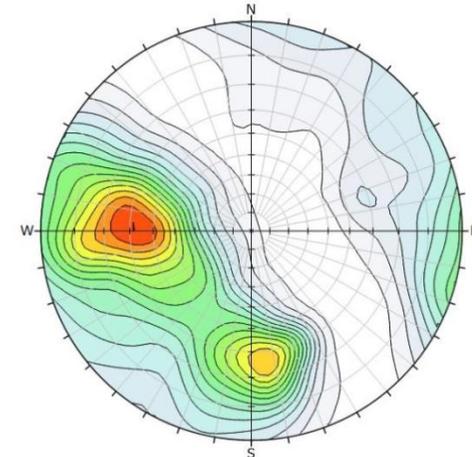
Color	Density Concentrations
0.50	0.50
0.75	0.75
1.00	1.00
1.25	1.25
1.50	1.50
1.75	1.75
2.00	2.00
2.25	2.25
2.50	2.50
2.75	2.75
3.00	3.00
3.25	3.25
3.50	3.50
3.75	3.75
4.00	4.00
4.25	4.25
4.50	4.50
4.75	4.75
5.00	5.00
5.25	5.25
5.50	5.50
5.75	5.75
6.00	6.00
6.25	6.25

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	6.00%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	200282 (200282 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle



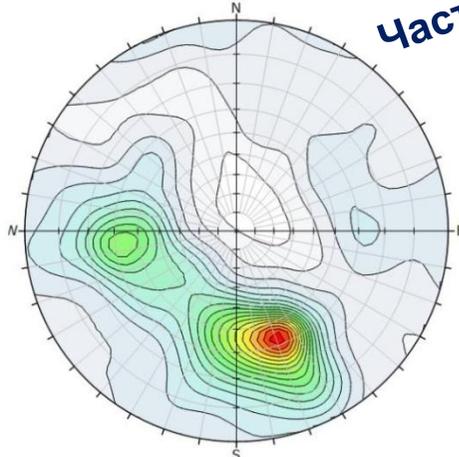
Color	Density Concentrations
0.50	0.50
0.75	0.75
1.00	1.00
1.25	1.25
1.50	1.50
1.75	1.75
2.00	2.00
2.25	2.25
2.50	2.50
2.75	2.75
3.00	3.00
3.25	3.25
3.50	3.50
3.75	3.75
4.00	4.00
4.25	4.25
4.50	4.50
4.75	4.75
5.00	5.00
5.25	5.25
5.50	5.50
5.75	5.75
6.00	6.00
6.25	6.25
6.50	6.50
6.75	6.75
7.00	7.00
7.25	7.25
7.50	7.50
7.75	7.75
8.00	8.00
8.25	8.25
8.50	8.50
8.75	8.75
9.00	9.00
9.25	9.25
9.50	9.50

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	3.00%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	296929 (296929 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle



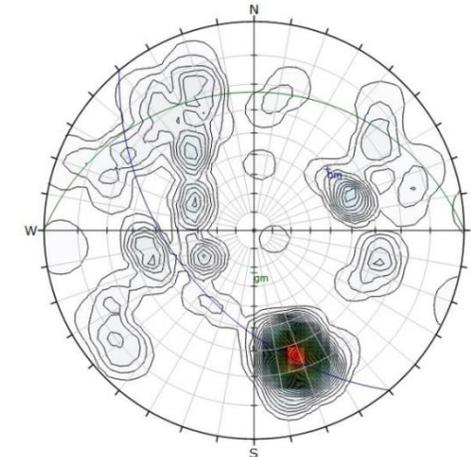
Color	Density Concentrations
0.50	0.50
0.75	0.75
1.00	1.00
1.25	1.25
1.50	1.50
1.75	1.75
2.00	2.00
2.25	2.25
2.50	2.50
2.75	2.75
3.00	3.00
3.25	3.25
3.50	3.50
3.75	3.75
4.00	4.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	3.75%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	259404 (259404 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle



Color	Density Concentrations
0.50	0.50
0.75	0.75
1.00	1.00
1.25	1.25
1.50	1.50
1.75	1.75
2.00	2.00
2.25	2.25
2.50	2.50
2.75	2.75
3.00	3.00
3.25	3.25
3.50	3.50
3.75	3.75
4.00	4.00
4.25	4.25
4.50	4.50
4.75	4.75

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	4.00%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	304803 (304803 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle

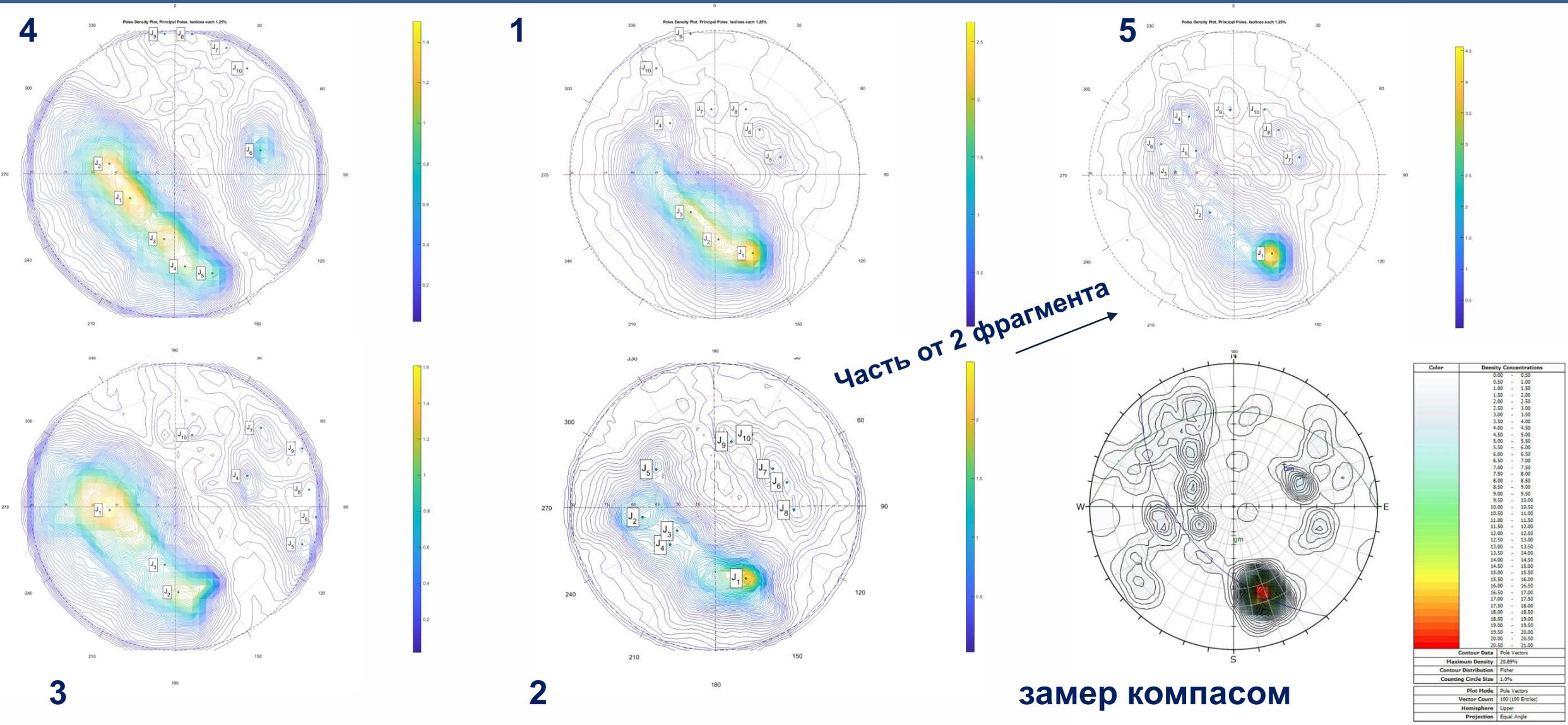


Color	Density Concentrations
0.50	0.50
1.00	1.00
1.50	1.50
2.00	2.00
2.50	2.50
3.00	3.00
3.50	3.50
4.00	4.00
4.50	4.50
5.00	5.00
5.50	5.50
6.00	6.00
6.50	6.50
7.00	7.00
7.50	7.50
8.00	8.00
8.50	8.50
9.00	9.00
9.50	9.50
10.00	10.00
10.50	10.50
11.00	11.00
11.50	11.50
12.00	12.00
12.50	12.50
13.00	13.00
13.50	13.50
14.00	14.00
14.50	14.50
15.00	15.00
15.50	15.50
16.00	16.00
16.50	16.50
17.00	17.00
17.50	17.50
18.00	18.00
18.50	18.50
19.00	19.00
19.50	19.50
20.00	20.00
20.50	20.50
21.00	21.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	20.89%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	100 (100 Entries)
Hemisphere	Upper
Projection	Equal Angle

Часть от 2 фрагмента

# Диаграммы трещиноватости для фрагментов Сарминского обнажения - 2, полученные по данным плотного облака точек (1-5), обработанных и визуализированных в программе DSE



# Диаграммы трещиноватости для Сарминского обнажения - 2

по данным плотного облака точек, обработанных в DSE для разных частей обнажения и суммированных визуализированных в программе

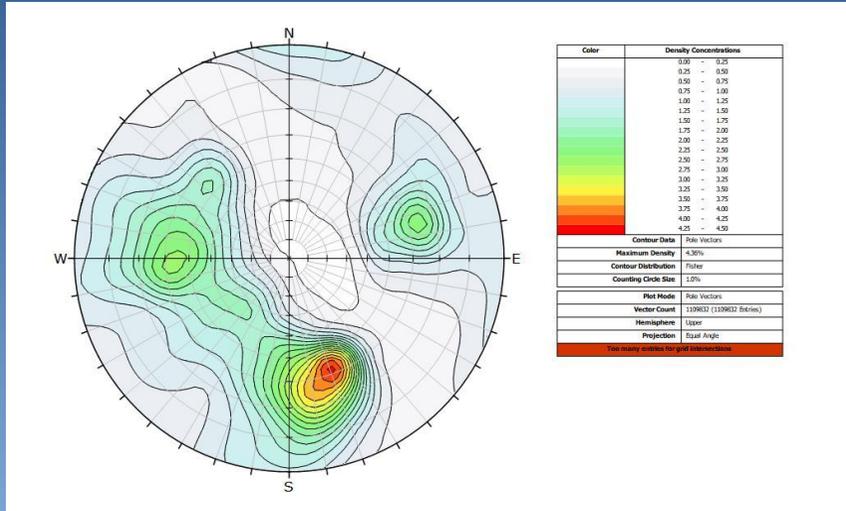
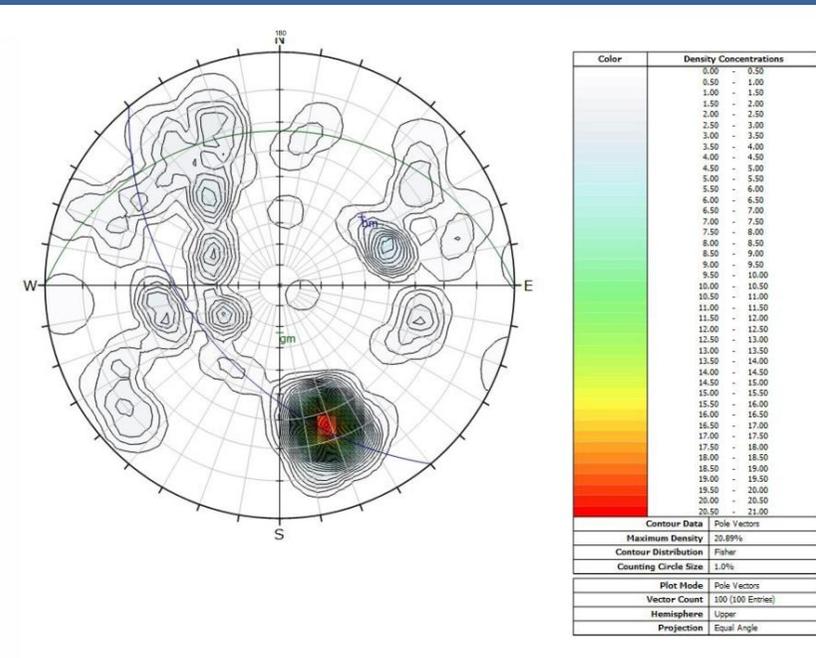
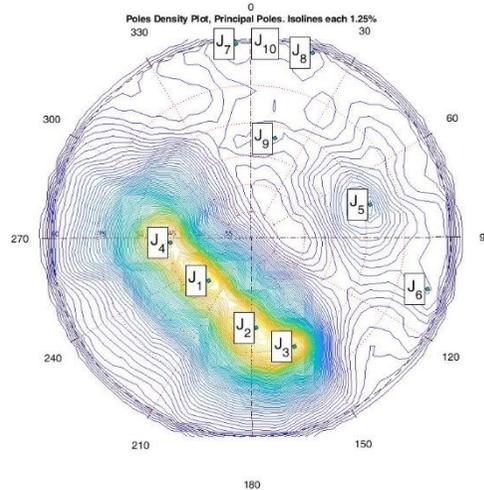


Диаграмма построена в программе DSE



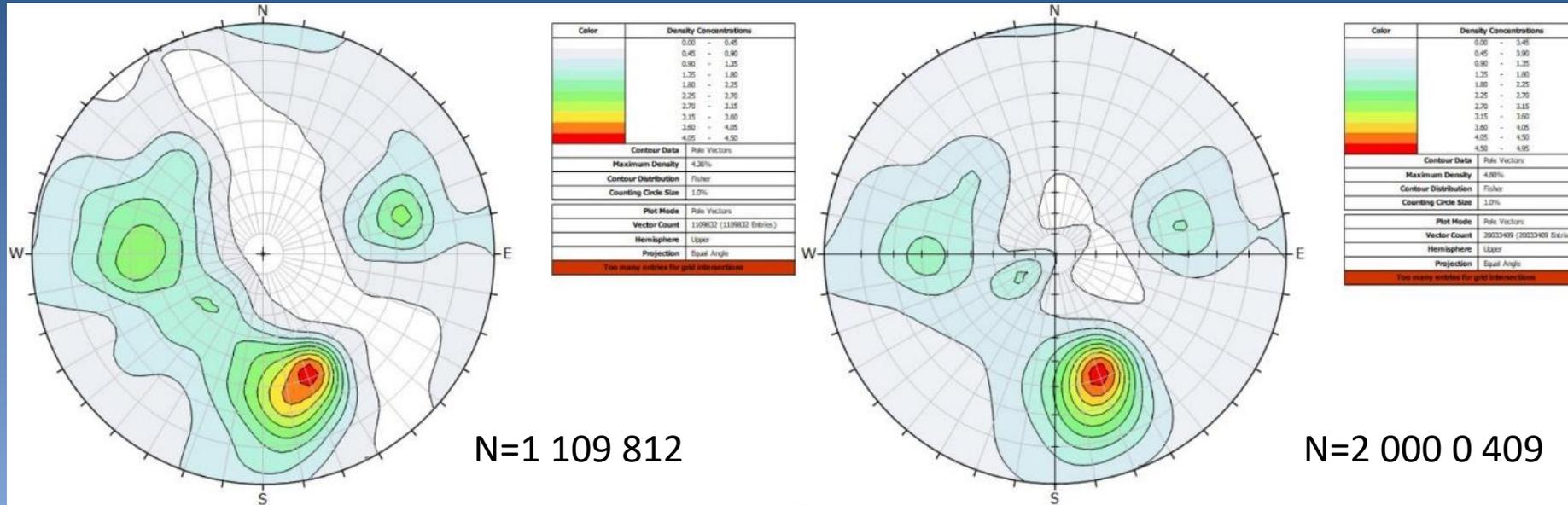
замер компасом

## Выводы 4-5:

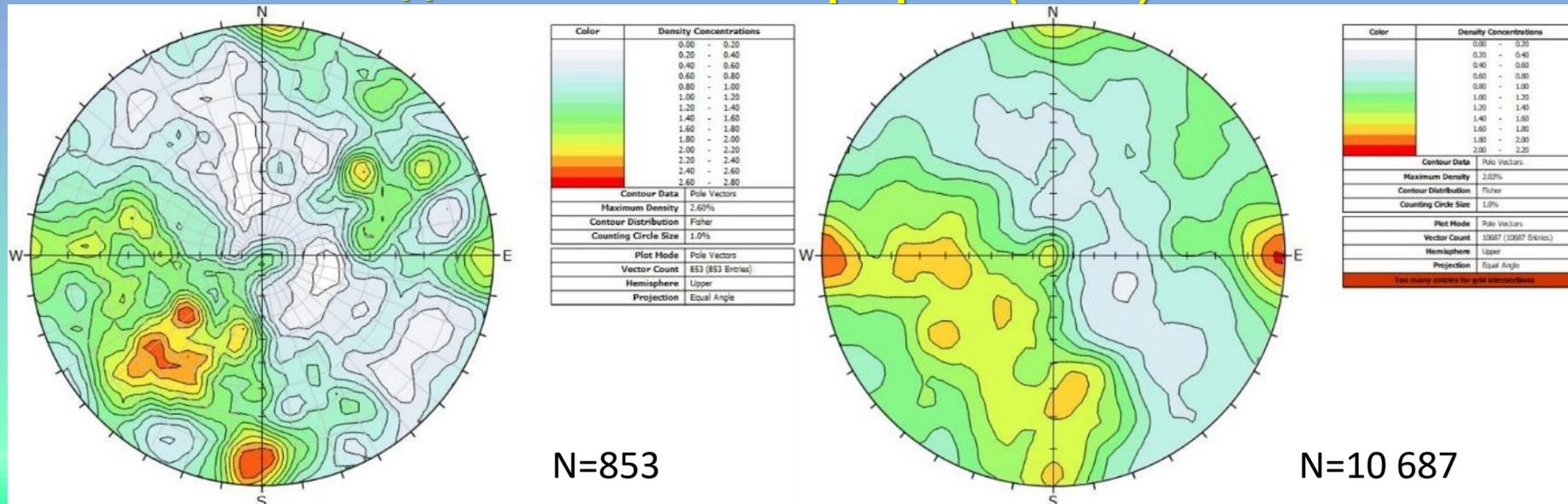
- Разносторонний ракурс съемки и выбор фрагмента выхода, развернутого к разным сторонам света, позволяет избежать проблемы однополярности на диаграмме трещиноватости;
- Правильно подобранный для расчета фрагмент обнажения отражает его системность в целом. Это означает, что нет необходимости тратить время и ресурсы компьютера для анализа всего плотного облака.

# Диаграммы, построенные по данным плотного облака среднего и высокого качества для Сарминского – 2

## По данным из DSE



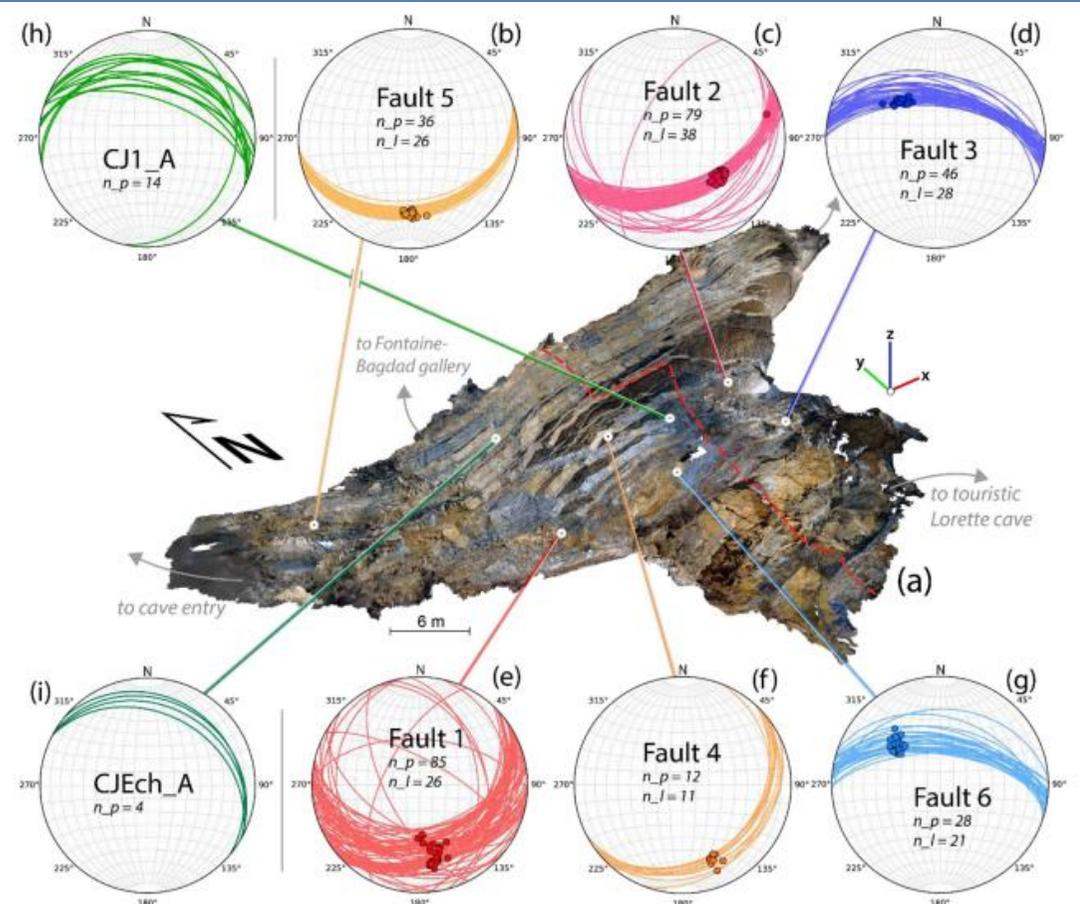
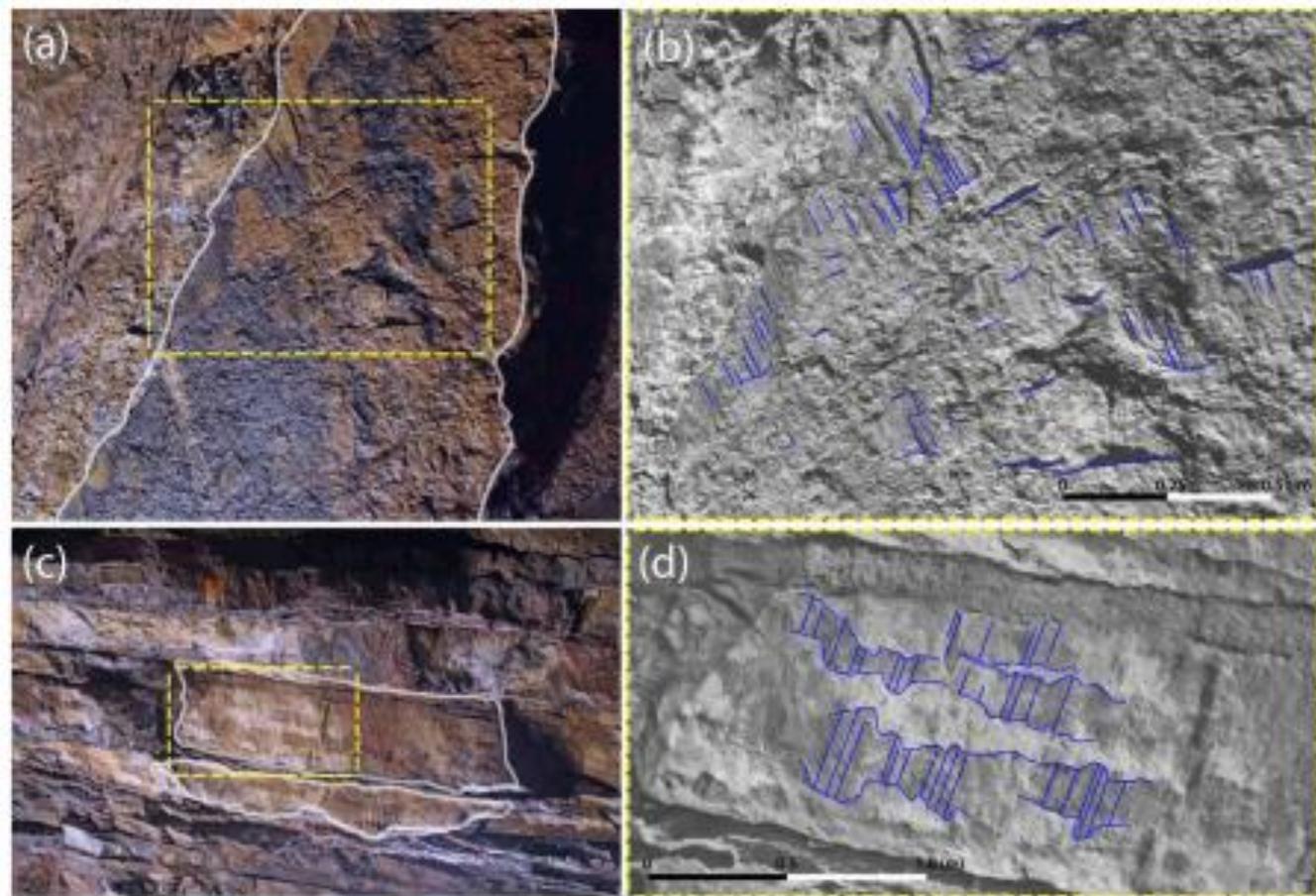
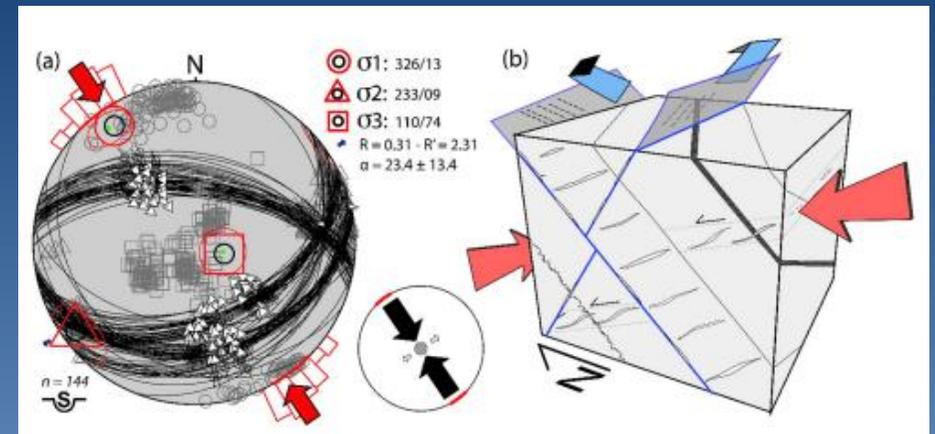
## По данным из Cloud compare (Facet)



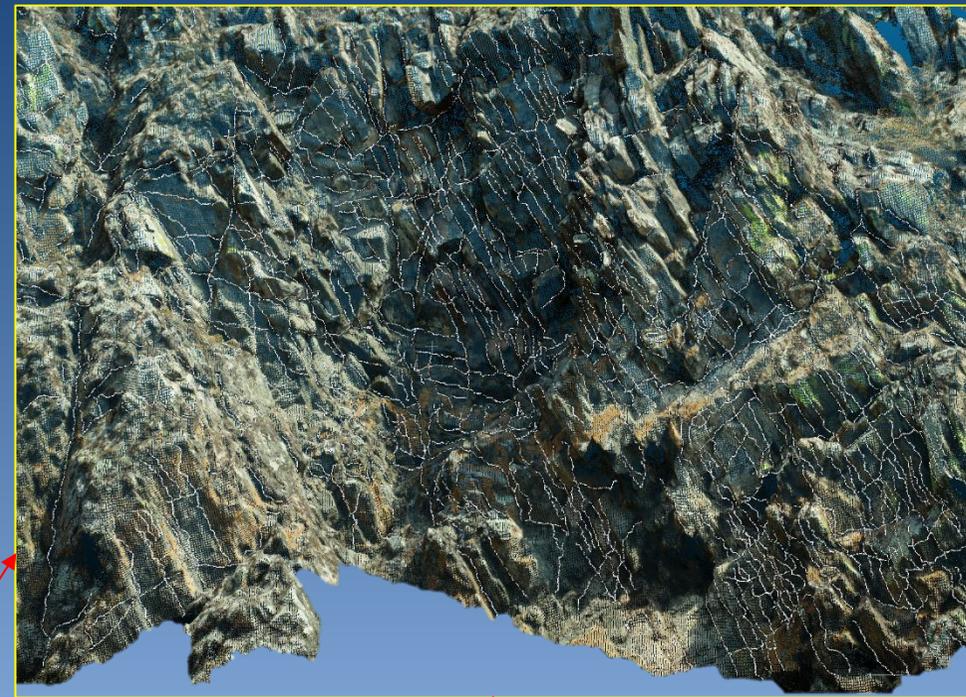
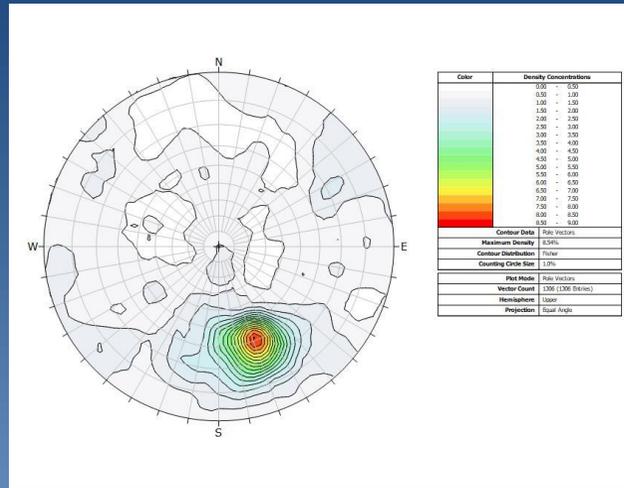
### Вывод 6:

- Для выделения трещин и их систем достаточно использовать плотное облако, полученное в Agisoft Metashape на среднем качестве, что экономит время и ресурсы компьютера.

# Штрихи скольжения и результаты их измерений с помощью «виртуального» компаса в программе «CloudCompare» (Triantafyllou, 2019)

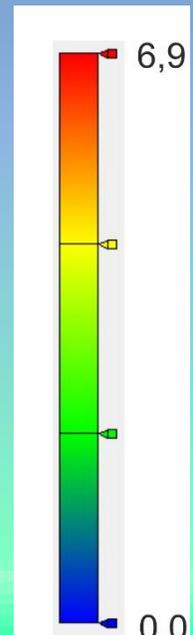
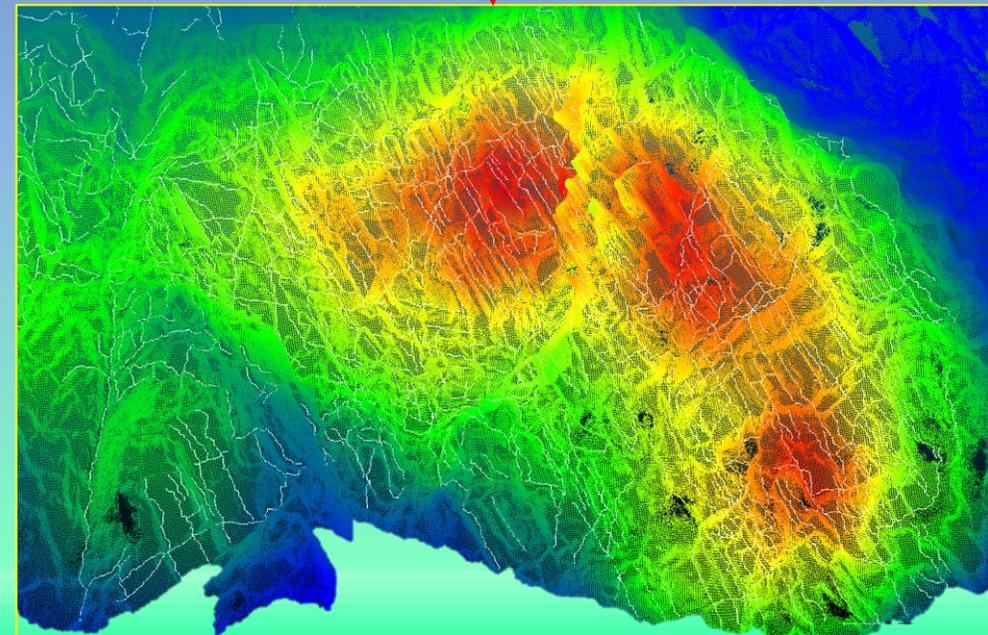
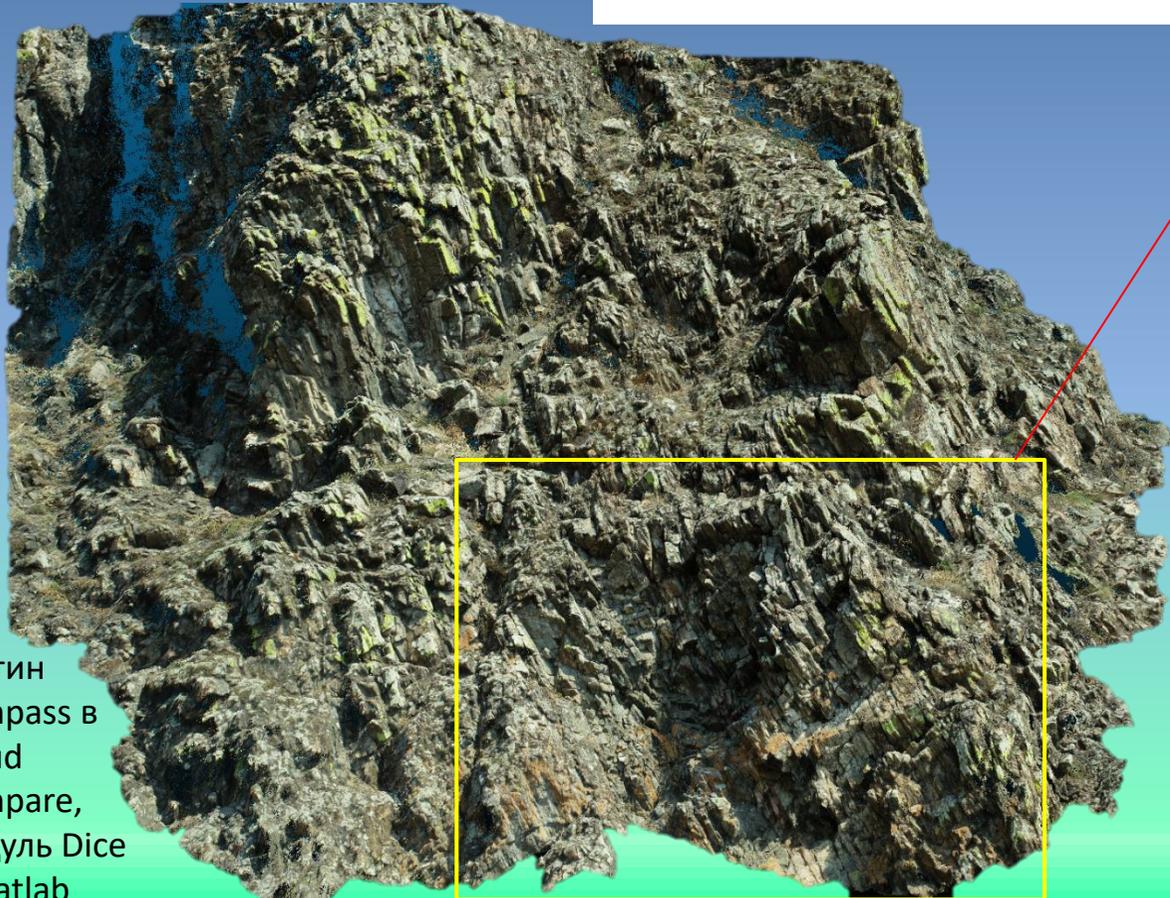


# Объемная (на м3) плотность трещин, извлекаемая из цифрового обнажения Сарминское - 2



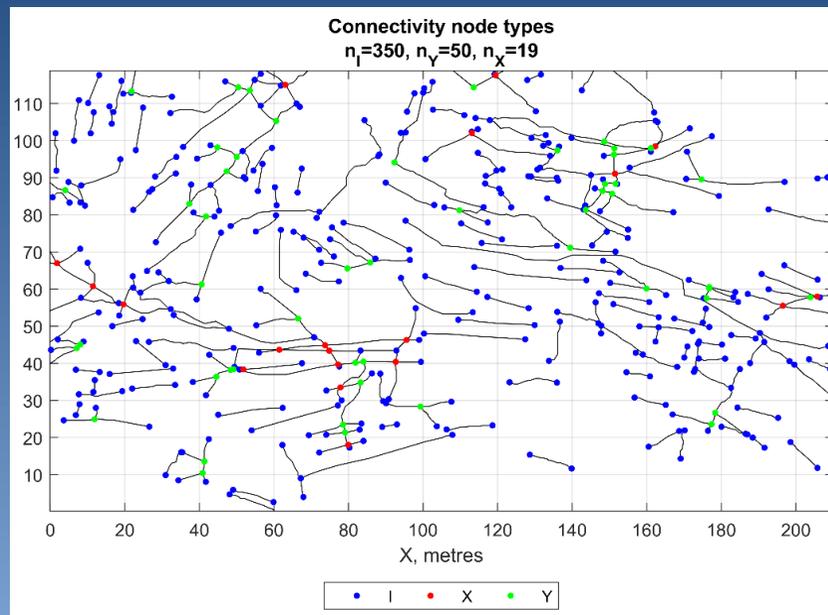
$$P_{32} = \frac{\sum A}{\frac{4}{3} \pi r^3}$$

где  $\sum A$  —  
сумма  
площадей  
трещин,  
пересекаю-  
щих сферу



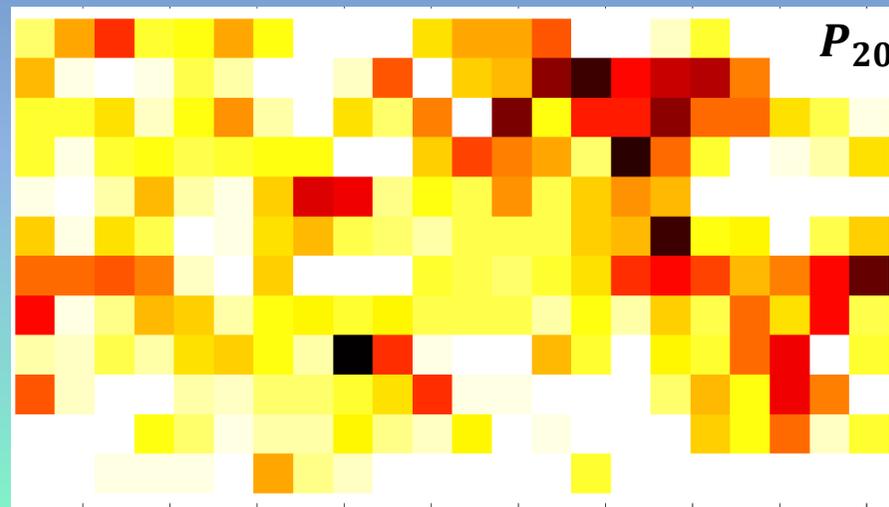
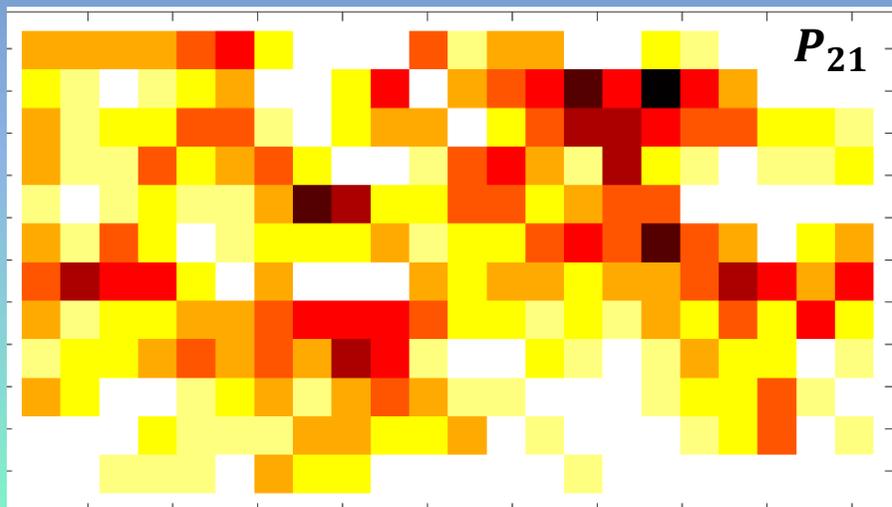
плагин  
Compass в  
Cloud  
Compare,  
модуль Dice  
в Matlab

# Плотность трещин на м2 для Среднекедрового обнажения



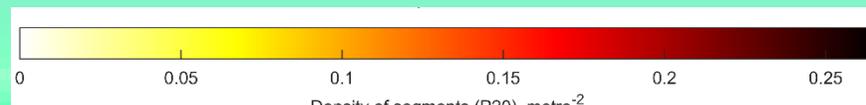
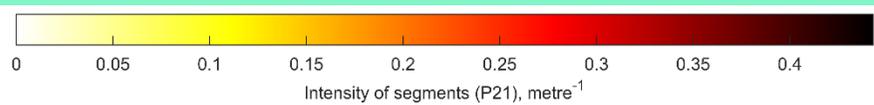
**P21 (интенсивность трещин)** - отношение общей длины трещин в сканируемой площади к единице площади:

$$P_{21} = \frac{\sum l}{\pi r^2}$$

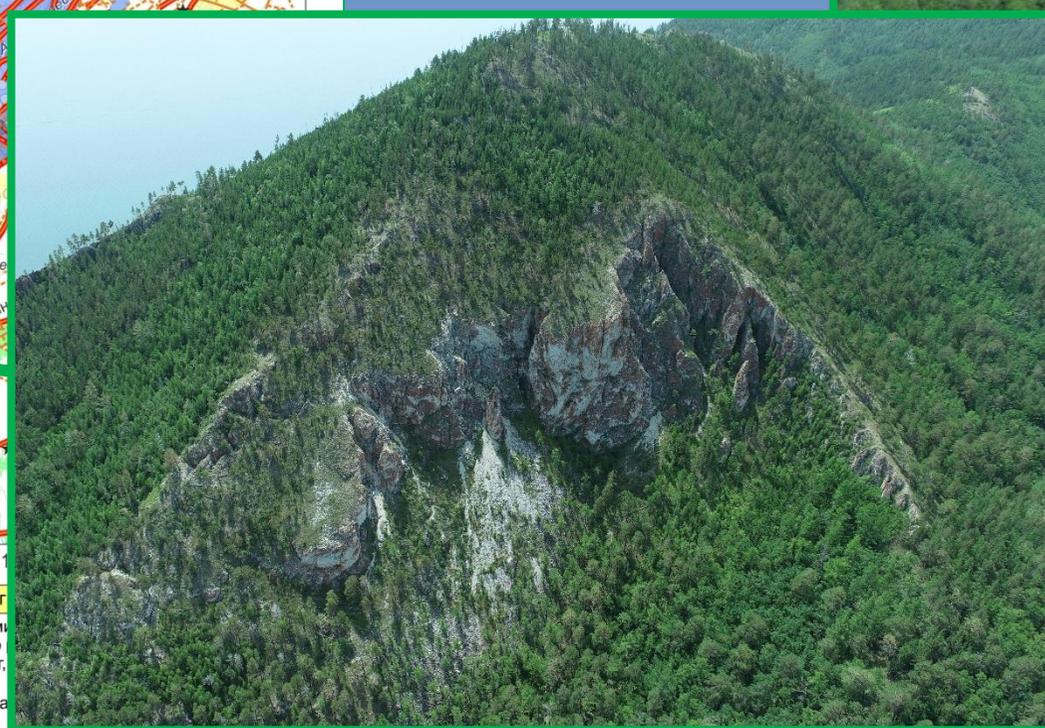
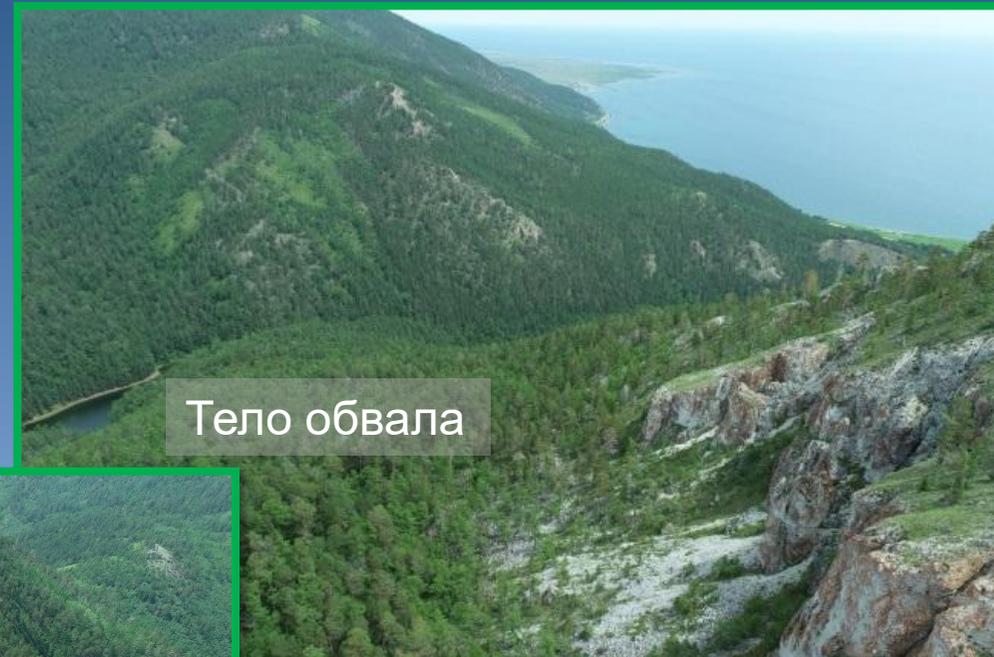
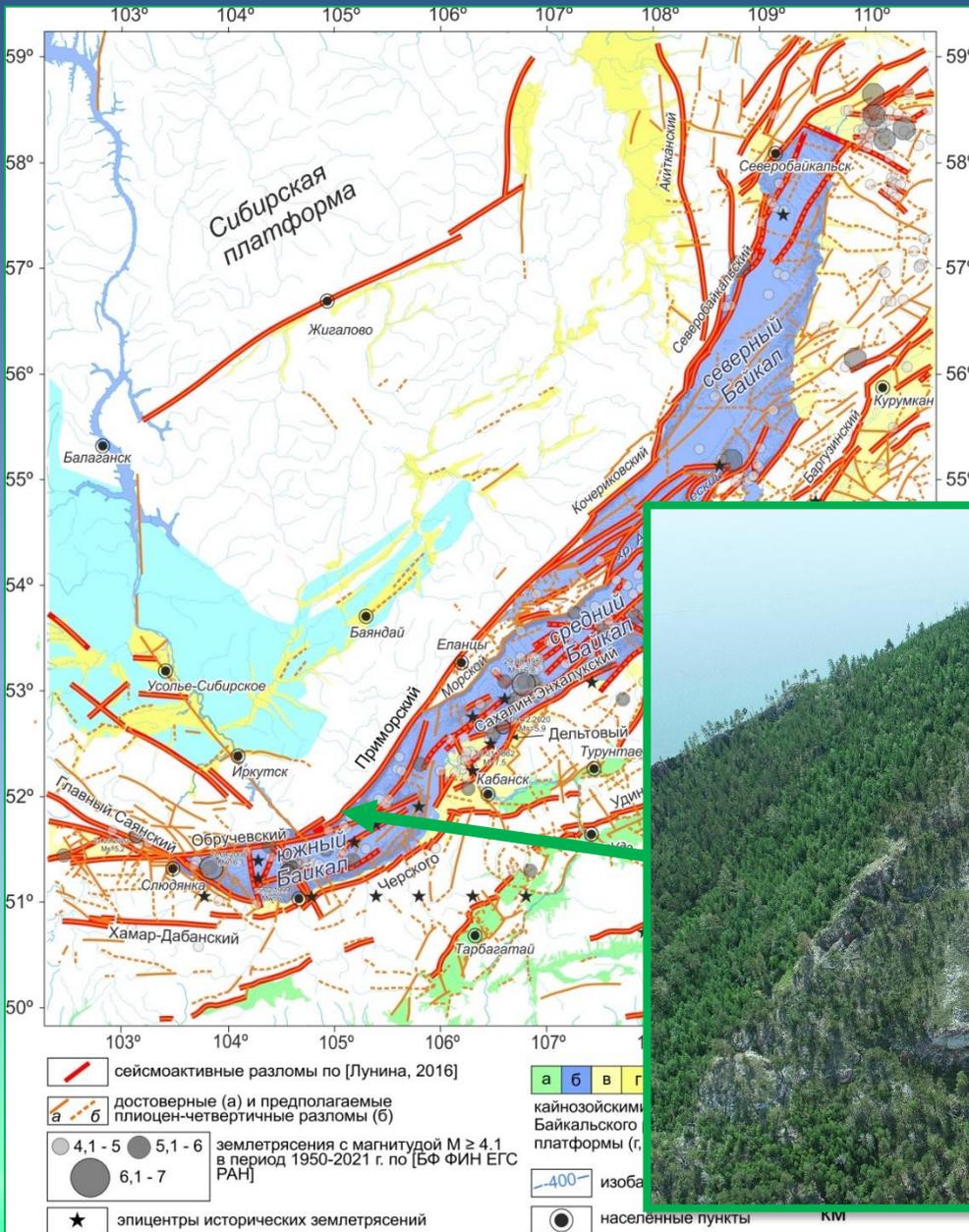


**P20 (плотность трещин)** – отношение количества трещин, центр которых попадает в сканируемую площадь к единице площади:

$$P_{20} = \frac{n}{\pi r^2}$$

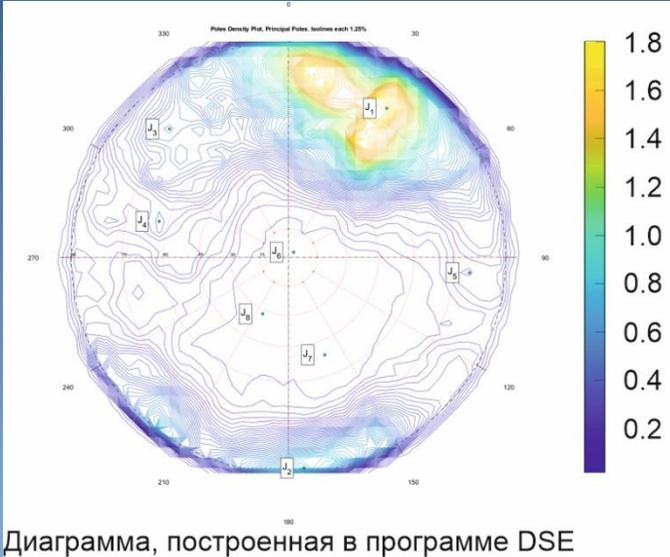


# Обвал в пади Озерко



# Обвал в пади Озерко

Плотное облако, созданное в Agisoft  
Metashape



Диаграмма, построенная в программе DSE

№	Dip Dir	Dip	Density
1	33.2270	79.0740	1.8274
2	175.8151	88.7686	0.8569
3	317.3923	77.9275	0.4344
4	285.6470	63.4326	0.2088
5	94.8983	79.8062	0.1345
6	44.9792	3.8592	0.0159
7	159.7762	51.4735	0.0146
8	204.4405	32.0953	0.0091

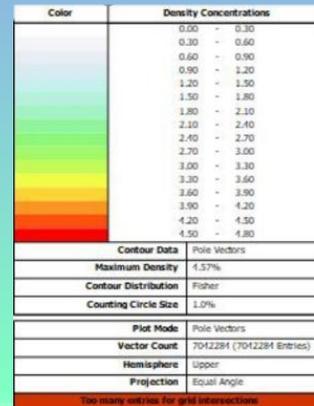
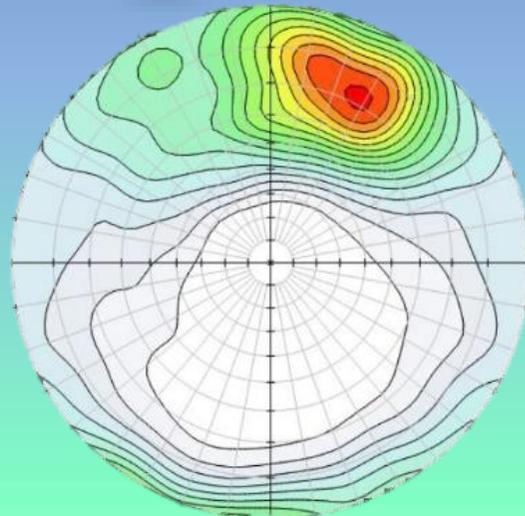


Диаграмма по данным замеров,  
извлеченных DSE

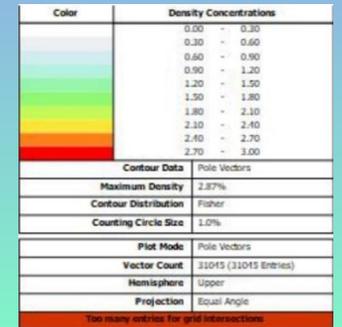
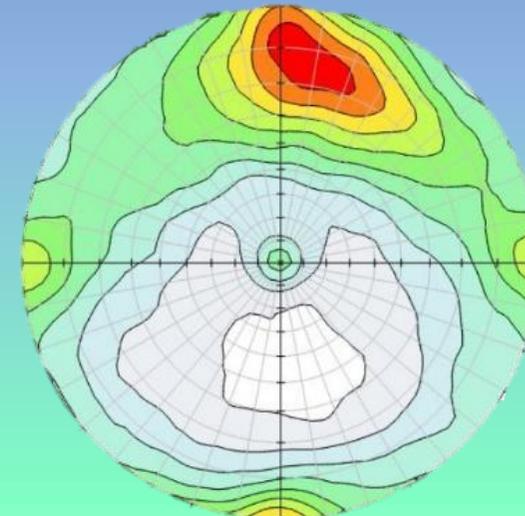


Диаграмма по данным замеров,  
извлеченных CloudCompare

# ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

- Высокая точность математического расчета азимутов и углов падения трещин и хорошая сходимость с результатами измерения геологическим компасом;
- Ракурс съемки и обнаженность одной стенки выхода – проблема для определения разнообразия систем трещин, однако разносторонний ракурс съемки и выбор фрагмента выхода, развернутого к разным сторонам света, позволяет избежать проблемы однополярности на диаграмме трещиноватости;
- Правильно подобранный для расчета фрагмент обнажения отражает его системность в целом. Это означает, что нет необходимости тратить время и ресурсы компьютера для анализа всего плотного облака;
- Для выделения трещин и их систем достаточно использовать плотное облако, полученное в Agisoft Metashape на среднем качестве, что экономит время и ресурсы компьютера;
- Цифровые двойники обнажений горных пород при правильном подходе можно использовать для:
  - определения систем трещин;
  - линейных структурных элементов, таких как слоистость, штрихи;
  - оценки плотности трещин на  $1 \text{ м}^3$  и  $1 \text{ м}^2$ , что позволяет оценивать нарушенность всей поверхности выхода;
  - оценки расстояния между трещинами одной системы для расчета соответствующих параметров/коэффициентов), свидетельствующих об устойчивости массива.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**