ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Особенности полевой съемки и автоматизированной обработки цифровых моделей обнажений горных пород при анализе трещиноватости

О.В.Лунина✉, А.С.Низовцев
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Лунина О.В., Низовцев А.С. Особенности полевой съемки и автоматизированной обработки цифровых моделей обнажений горных пород при анализе трещиноватости // Записки Горного института. 2026. Т. 280. С. 163-175. EDN MMVLYQ

Аннотация
При автоматизированном извлечении элементов залегания трещин из плотного облака точек существуют проблемы, осложняющие корректную характеристику выхода, нарушенного определенными системами разрывов. В связи с этим проведены опытно-методические работы по анализу трещин и их систем, выделенных автоматизированным способом, для поиска удовлетворительных условий сбора и обработки данных. Первичные материалы с помощью БПЛА DJI Phantom 4 RTK были собраны в зонах Приморского и Северобайкальского глубинных разломов Байкальского рифта. Плотные облака точек получены с помощью фотограмметрического метода. Показано, что однонаправленный ракурс съемки и обнаженность одной стенки выхода горных пород является проблемой для определения систем трещин, но выбор фрагмента цифровой модели обнажений (ЦМО), развернутого к разным сторонам света, позволяет избежать однополярности на диаграмме трещиноватости и обеспечивает получение высокоточных сведений о строении разрывной сети. Правильно подобранный для расчета фрагмент обнажения отражает его системность, экономит время и ресурсы компьютера. При изменении структурной обстановки ЦМО позволяет провести анализ разрывной сети на любом участке выхода, что увеличивает качество и производительность работ. В условиях ограниченного вычислительного потенциала для выделения трещин и их систем достаточно использовать плотное облако точек среднего качества. Правильное применение автоматизированного извлечения элементов залегания трещин и их систем кратно увеличивает эффективность изучения деформационных характеристик горных пород в сфере инженерного воздействия и разработки месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова
трещиноватость; элементы залегания; системы; цифровая модель обнажения; беспилотная аэрофотосъемка; программное обеспечение

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00565, https://rscf.ru/project/25-27-00565/.

Поступила: 27.02.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 10.09.2026*** ***Опубликована: 10.09.2026***

Введение

Анализ трещиноватости применяется для изучения деформаций горных пород, степени их нарушенности, 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). Традиционно практически все исследования разрывной сети в обнажениях проводятся на основе измерений элементов залегания трещин геологическим компасом и подсчета их количества на единицу длины, площади или объема элементарным способом [1]. Реже для этого применяют мобильные телефоны со специальными приложениями, например GeoCompass. Обычно массовые замеры трещиноватости охватывают небольшой участок размером 10-20 м, даже если выход имеет более значительные размеры. Неоднородность строения выхода горных пород может быть отмечена качественно в описании, зарисовках, фотодокументации.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В последние годы благодаря развитию беспилотных технологий и специализированных программных продуктов для построения цифровых моделей обнажений (ЦМО) и их обработки, появились уникальные возможности получать и анализировать значительно больше информации о трещиноватости горного массива. С помощью методов, основанных на дистанционной съемке обнажения, в таких программах как Agisoft Metashape (известной ранее как Agisoft PhotoScan) [2-4], ShapeMetriX [5, 6], 3DM Analyst [7], Sirovision и др. строятся плотные облака точек и фотореалистичные текстурированные 3D-модели горного массива. Далее на основе математических алгоритмов по ЦМО выделяются трещины и их основные системы [8], в том числе с помощью компьютерных программ Discontinuity Set Extractor (DSE) [9-11] и CloudCompare с плагинами [12-14], а также машинного обучения [15]. Используя данные расчетов DSE и CloudCompare, можно рассчитать расстояния между трещинами каждой системы [16], параметры устойчивости массива [17], а также плотности разрывов по всей поверхности выхода, выраженные через различные параметры в модуле для MATLAB DICE [18]. Для этих же целей имеются приложения виртуальной реальности, которые используются для анализа ЦМО горных пород [19].

Первые исследования, касающиеся анализа трещиноватости в цифровой среде, были посвящены сравнению результатов, полученных на основе фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки, лидарной съемки и измерениями обычным компасом [20, 21]. Позднее стали появляться исследования, развивающие методы извлечения данных элементов залегания не только трещин, но и даек, борозд скольжения и других структур [22], а также расчета интенсивности трещиноватости [13, 23]. Использование цифровых моделей может быть многократным для решения разного рода геолого-структурных и геомеханических задач и позиционируется как современный метод исследования геосреды [24], особенно в труднодоступных местах [25], где важно соблюдать уровень безопасности и учитывать временные затраты [26]. Детальные обзоры по использованию ЦМО и автоматизированному извлечению характеристик трещиноватости из плотного облака точек приведены в статьях [27, 28].

Несмотря на преимущества использования цифровых технологий для анализа трещиноватости, большинство опубликованных работ, основанных на ЦМО, используют полуавтоматический способ извлечения элементов залегания трещин путем их оцифровки или кликания курсором компьютерной мыши по изображению поверхности разрыва. При автоматизированном способе часто получается результат в виде одного, реже двух максимумов трещиноватости на диаграммах [29-31], чего недостаточно для тектонофизического анализа с целью реконструкции напряженного состояния парагенетическими методами [32, 33]. В реальности трещиноватость любого горного массива определяется как минимум тремя основными системами трещин, которые различаются азимутами и/или углами падения.

Другими проблемами анализа цифровых обнажений являются временны́е затраты и ресурсы компьютера. 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 настоящего исследования – провести опытно-методические работы по анализу трещин и их систем, выделенных автоматизированным способом в известных компьютерных программах, для нахождения удовлетворительных условий сбора и обработки данных, которые будут способствовать использованию цифровых моделей обнажений для анализа трещиноватости и их более содержательному внедрению в практику горно-геологических работ.

Методика

В рамках опытно-методических работ было изучено пять обнажений горных пород, расположенных в зонах Приморского и Северобайкальского глубинных разломов Байкальского рифта (рис.1). Аэрофотосъемка проводилась в ручном режиме с помощью БПЛА DJI Phantom 4 RTK, который оснащен камерой с 1-дюймовой матрицей CMOS разрешением 20 Мп и механическим затвором, позволяющим избежать искажений изображения. Улучшенная матрица, оптимизированный широкоугольный объектив с диафрагмой f/2.8 и технология обработки обеспечили достаточно высокую детализацию фото с реалистичными цветами. Съемка проводилась с расстояния до

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

объекта от 1,5 м для Краснояровского обнажения до первых десятков метров для Сухого обнажения. Преимущественный угол наклона камеры 0° относительно горизонта плавно изменялся до 45°, а иногда до 90° (в случае необходимости). Движение осуществлялось снизу вверх, вправо вниз, вправо вверх и т.д. с поворотами дрона в обе стороны на уместный угол, определяемый морфологией выхода. Перекрытие между снимками составило 75-80 %.

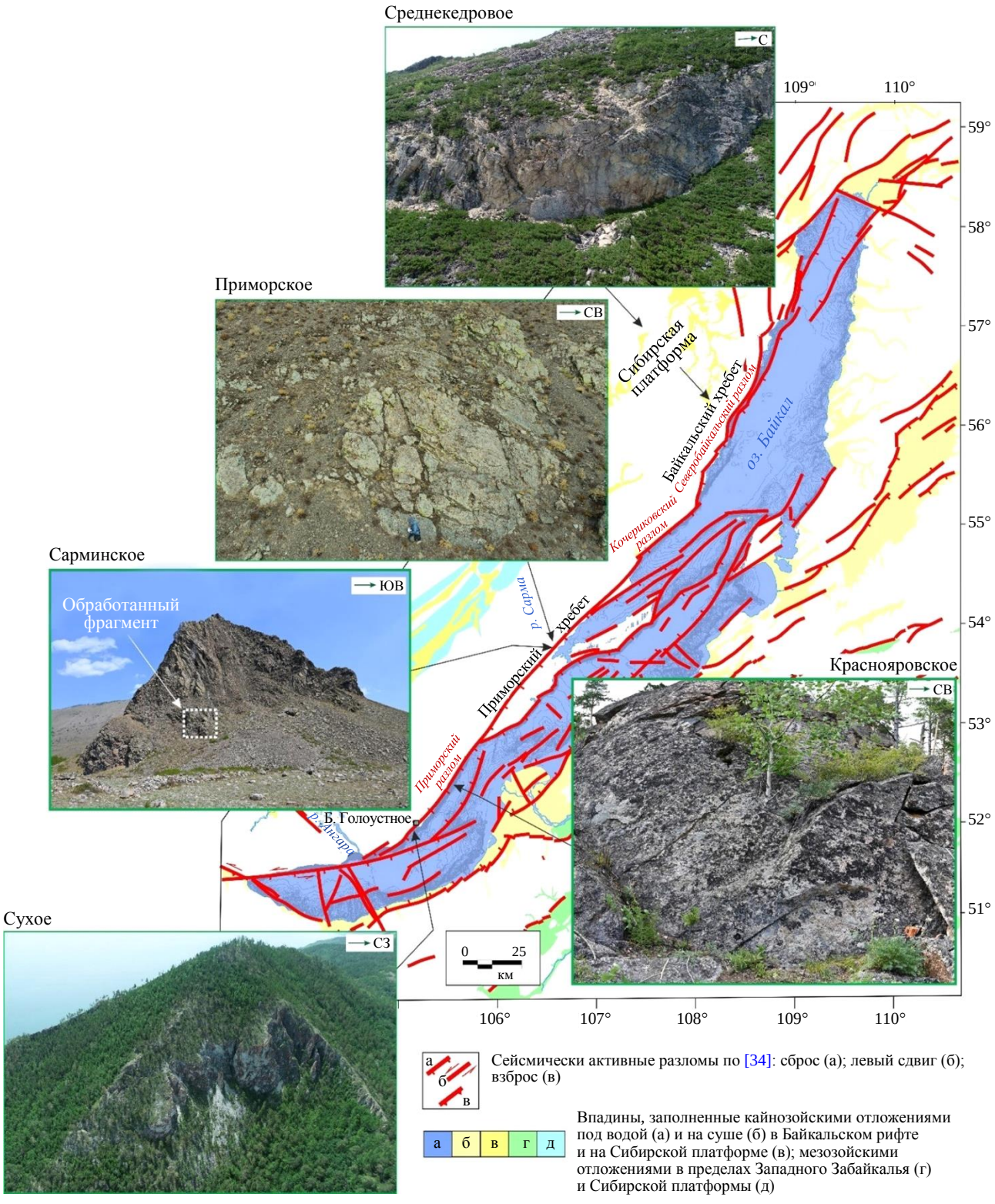


Рис.1. Местоположение изученных обнажений скальных пород в пределах Байкальского рифта

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для получения плотных облаков точек, которые представляют собой разновидность ЦМО, использовался фотограмметрический метод, реализованный в программе Agisoft Metashape. Перед обработкой дефектные и нечеткие фотографии удалялись. Далее в автоматическом режиме выполнялись следующие операции: загрузка фотографий; выравнивание фотографий; оптимизация выравнивания; построение плотного облака точек, сопоставимого с облаками точек LIDAR. Точки в результирующем плотном облаке окрашены в соответствии со спектральными RGB-данными соответствующих изображений, имеют координаты в пространстве и точно описывают топографию выхода горных пород. Их средняя плотность на среднем качестве расчетов составила от 7115 для Среднекедрового до 65263 точек/м^2 для Сарминского обнажения; для выхода горных пород «Сухое» – 449 точек/м^2. Именно плотное облако точек из-за своей дискретности используется для автоматического расчета элементов залегания трещин и их систем. Текстурированная ЦМО предпочтительна для визуализации объекта и геологической интерпретации путем ручной оцифровки слоев, трещин и других структурных элементов.

Для извлечения азимутов и углов падения трещин тестировались две наиболее известных компьютерных программы – DSE [9] и плагин FACETS для пакета CloudCompare [12] – с открытым исходным кодом. Построение диаграмм трещиноватости и выделение основных систем разрывов проводилось в приложениях DSE и Dips v. 7.0. Приложение Dips позволяло сравнивать диаграммы, построенные единообразно по выборкам трещин, получаемых разными способами. Перед обработкой с плотного облака удалялись все участки с помехами, такими как растительность, осыпи и др.

В программе DSE разрыв состоит из множества точек, которые принадлежат некоторой плоскости при заданных параметрах и, соответственно, имеют координаты в пространстве. Каждая такая классифицированная точка облака в определенной плоскости условно названа трещиной с пересчитанными азимутом и углом падения, которые и участвуют в построении диаграммы трещиноватости. В программе CloudCompare точки уже объединены в плоскости (FACETS).

Для четырех из пяти выходов горных пород проведены геолого-структурная документация и массовые замеры геологическим компасом, включающие от 100 до 103 трещин. Работы выполнялись в соответствии с принятыми в структурной геологии правилами путем последовательного измерения всех трещин в пределах произвольно выбранного участка коренного выхода площадью ~10 м^2 с указанием их элементов залегания и, если возможно, генетической разновидности (скол, отрыв), состояния поверхности скольжения и других характеристик. Традиционное описание не проводилось для коренной стенки отрыва обвала, обнаженного на относительной высоте более 300 м над уровнем Сухого озера в пади Семеновка в 4,13 км на запад-юго-запад от южной окраины села Большое Голоустное (рис.1).

Результаты и их обсуждение

Первые тестовые цифровые модели обнажений горных пород. Результаты обработки цифровых моделей первых трех обследованных обнажений Среднекедровое, Приморское и Краснояровское, сложенных гранитами, показали хорошую сходимость координат главного максимума на диаграммах трещиноватости, полученных путем автоматизированного извлечения элементов залегания трещин и ручного измерения геологическим компасом (рис.2). Существенным недостатком, как и во многих предыдущих работах, стала однополярность систем трещин, что связано с экспозицией главной стенки обнажения, на которую направлена фотокамера. По полевым замерам также отмечается системная трещиноватость, но наличие только одного максимума недопустимо. Таким образом, авторы столкнулись с проблемой влияния ракурса съемки, вследствие чего выяснилось, что для большинства геолого-структурных задач (выделение основных систем и сопряженных максимумов трещиноватости с последующей реконструкцией поля напряжений) необходим определенный подход к съемке обнажения и анализу разрывной сети с помощью автоматизированных вычислений.

Беспилотная аэрофотосъемка четвертого обнажения в пади Семеновка проведена 10.07.2021 г. с целью тестирования возможностей получения информации о труднодоступных выходах горных пород, значительно удаленных от исследователя на большой высоте. По данным источника [35], обвал пород произошел при землетрясении 3810±100 лет назад, при котором справа по течению водотока на максимальной абсолютной высоте 850 м произошел отрыв сильно трещиноватого скального массива. Обвальные массы перегородили русло, и образовалось Сухое озеро, изредка наполняемое водой в зависимости от уровня грунтовых вод (рис.3, *а*). Стенка отрыва, удаленная

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

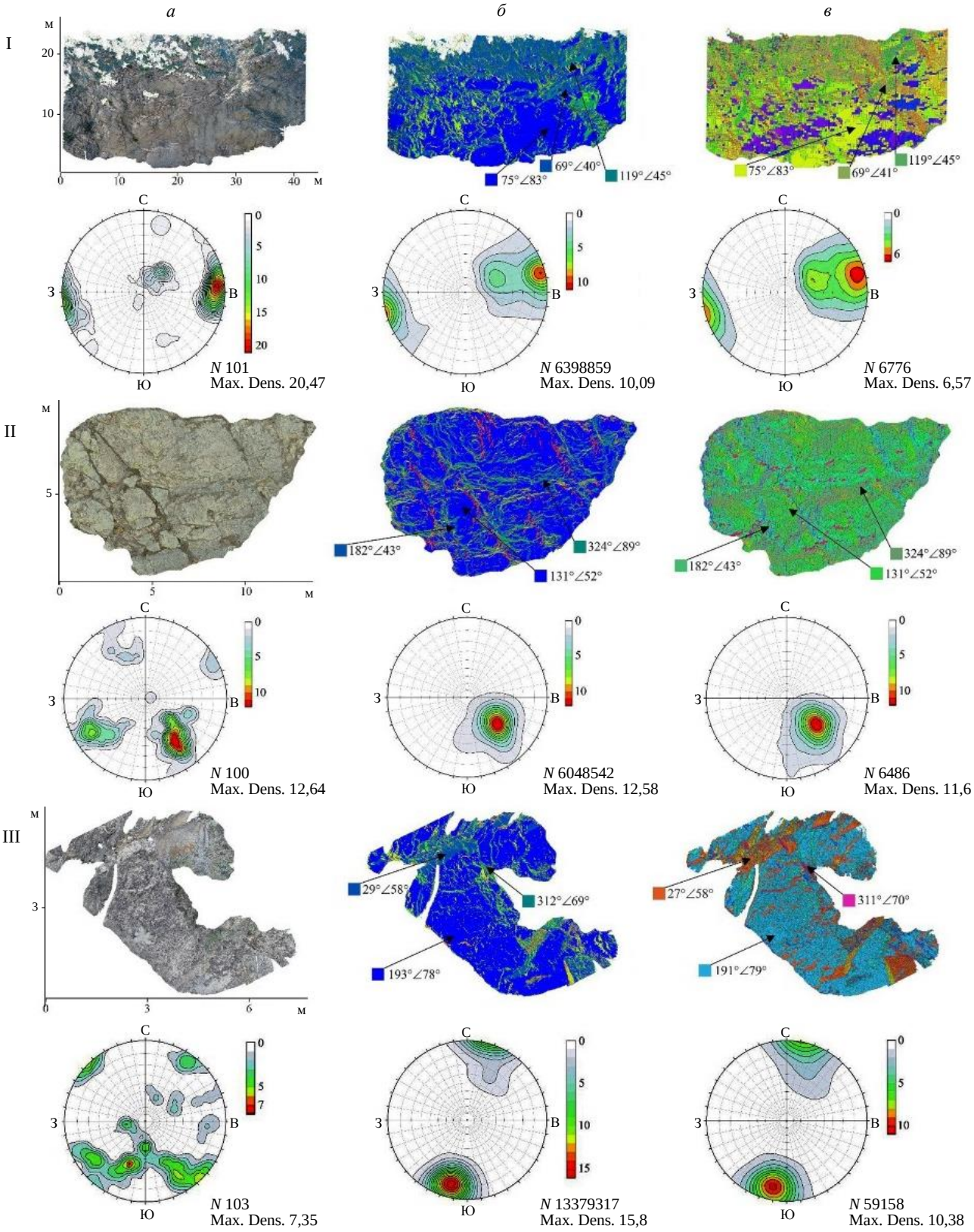


Рис.2. Результаты обработки цифровых моделей Среднекедрового (I), Приморского (II) и Краснояровского (III) обнажений, сложенных гранитами: *а* – плотные облака точек и диаграммы массовых замеров трещин, измеренных горно-геологическим компасом; *б* – плотные облака точек, классифицированных в программе DSE, и диаграммы извлеченных с помощью DSE трещин; *в* – плотные облака точек, классифицированных в программе CloudCompare, и диаграммы извлеченных с помощью CloudCompare трещин. Уровни изолиний проведены через 1 %. Цвет на классифицированных плотных облаках точек соответствует определенной системе разрывов, некоторые из которых подписаны; диаграммы построены в проекции верхней полусферы

N – число замеров; Max. Dens. – максимальная плотность

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

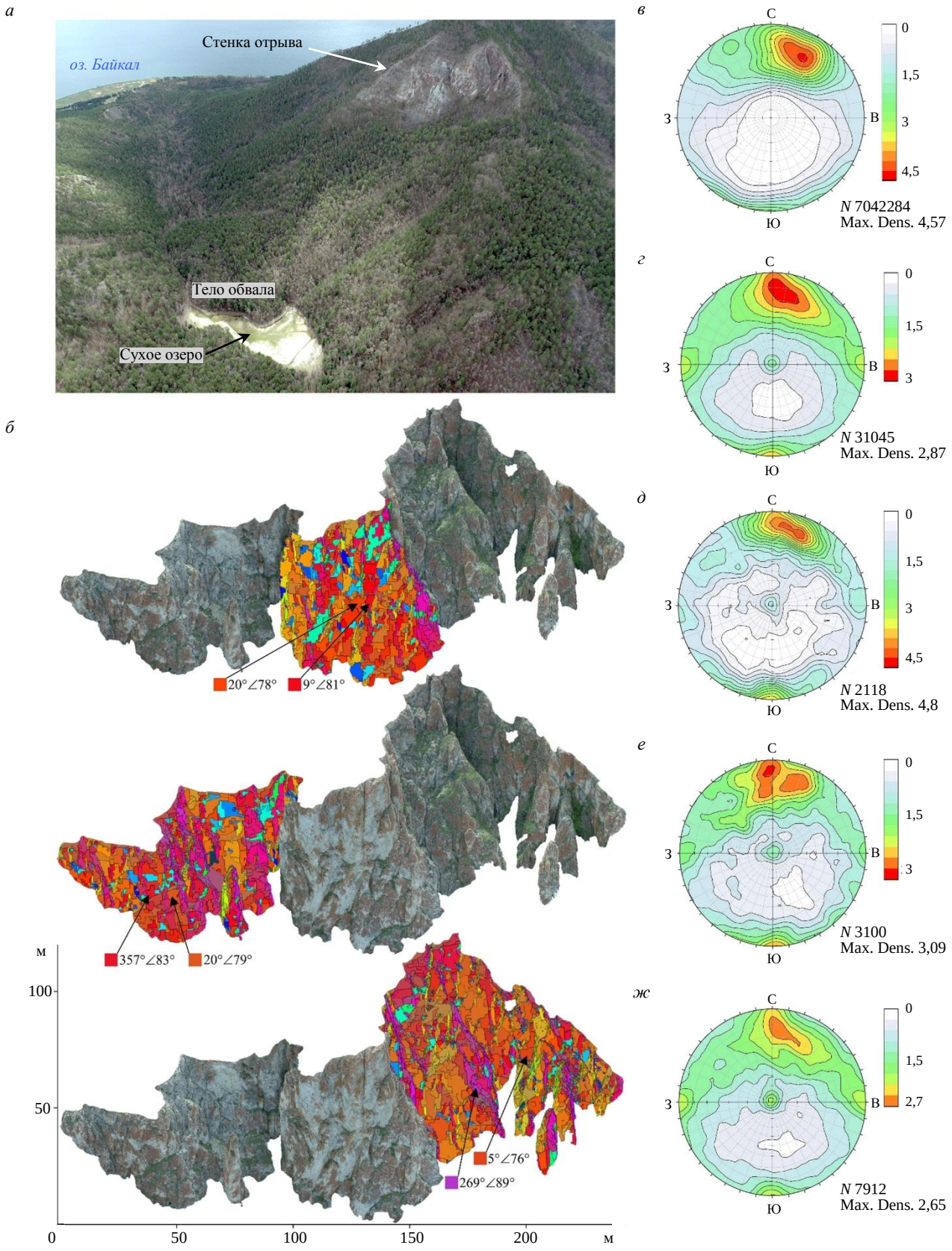


Рис.3. Результаты обработки цифровой модели Сухого обнажения: *а* – местоположение стенки отрыва обвала, представляющего собой коренной выход доломитов; *б* – подготовленное для обработки плотное облако точек обнажения с наложенными его фрагментами, классифицированными в программе CloudCompare в зависимости от положения трещин в пространстве; *в*, *г* – диаграммы трещиноватости, извлеченной из всего обнажения с помощью программ DSE (*в*) и CloudCompare (*г*); *д-ж* – диаграммы трещиноватости, извлеченной из фрагментов обнажения с помощью программы CloudCompare. Уровни изолиний проведены через 0,3 %

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

на ~630 м по прямой от днища Сухого озера и местоположения оператора съемки, представляет собой дугу с неровными краями общей длиной 543 м. Диаграммы трещиноватости, данные для которых получены для всего обнажения горных пород в программах DSE и CloudCompare, демонстрируют преобладающие азимуты падения трещин, максимумы которых выстраиваются в поясовое расположение, соответствуя этой дуге (рис.3, *в, г*). Загрузка большого количества трещин из DSE (7042284 проекций нормалей) и из CloudCompare (31045 трещин – фасетов) порождает только два максимума на диаграммах из-за значительного доминирования трещин с определенными азимутами и углами падения, направленными на фотокамеру. Главный максимум падает круто на север-северо-восток (27°∠72° по DSE и 10°∠75° по CloudCompare). При уменьшении разрывов в выборках путем деления обнажения на три части количество максимумов увеличивается, так как уменьшается доля поверхностей, обращенных на камеру (рис.3, *д-ж*), более очевидно просматривается роль поперечной системы трещин субмеридионального простирания. При этом отмечается подобие диаграмм, построенных для левой, центральной и правой частей обнажения, а также неизменность положения основной системы трещин в пределах 10°, приведенных по данным, обработанным в CloudCompare.

В отличие от программы CloudCompare, DSE строит диаграммы трещиноватости в изолиниях плотности, а также рассчитывает основные системы трещин [21]. При этом количество выделяемых максимумов (discontinuity sets) и допустимый угол между ними задаются как условие к расчету и визуализации. Таким образом, в DSE даже при существенном доминировании трещин одной системы можно рассчитать несколько максимумов, часть которых или даже большинство не будут проявляться изолиниями, а будут указаны лишь точкой, так как их плотность (интенсивность) на диаграмме слишком мала. Из этого следует, что при решении структурных задач, если обнажена только одна стенка обнажения без заметных выступов, для построения диаграмм трещиноватости лучше использовать программу DSE или ручной способ выделения трещин в CloudCompare с использованием встроенного инструмента Compass.

Опытно-методические работы на Сарминском обнажении горных пород. Очевидность влияния ракурса и азимутальности съемки на результат автоматизированных структурных построений привела к необходимости целенаправленного изучения пятого коренного выхода гранитов и гранито-гнейсов, расположенного в левом борту долины р. Сарма (см. рис.1). Традиционная геолого-структурная документация обнажения с массовым замером трещин была проведена одновременно с аэрофотосъемкой 26.05.2022 г.

Коренной выход в Сарминском ущелье ввиду обнаженности с трех основных сторон (рис.4, *а*) представляет собой идеальный объект для опытно-методических работ по анализу трещин и их систем, выделенных автоматизированным способом. Цифровой двойник построен для всего выхода (рис.4, *б*), но для анализа взят фрагмент – выступ (рис.4, *в*), который охвачен съемкой с разных направлений и, как оказалось, достаточен для получения истинного результата. Плотные облака точек данного фрагмента классифицированы в программах DSE и CloudCompare (рис.4, *г, д*). Анализ диаграмм трещиноватости, построенных по данным полевого массового замера (рис.4, *е*), в приложении DSE (рис.4, *ж*) и программе Dips по данным DSE (рис.4, *з*), показал хорошую сходимость результатов между собой и отсутствие однополярности максимумов. По данным плагина FACETS, корреляция максимумов с системами трещин на диаграмме по полевым замерам оказалась хуже (рис.4, *и*). Главная система Приморского разлома (рис.4, *а*) с азимутом падения 161°∠64° на рис.4, *е*, 159°∠61° на рис.4, *ж* и 159°∠59° на рис.4, *з* не проявилась на рис.4, *и.* Учитывая особенности алгоритма программы FACETS, следует полагать, что при съемке значительное количество мелких трещин, обращенных падением на камеру, т.е. на юго-запад, попало в объектив камеры. Если бы поверхности разрывов были более крупными, данного эффекта не случилось бы. Это наблюдение подтверждает вывод о более подходящем применении для структурного анализа программы DSE при большом объеме данных, так как из-за «точечного» подхода учитывается не только количество замеров, но и площадь поверхности трещины. Работы с цифровым двойником Сарминского обнажения показали, что многосторонний ракурс съемки и выбор фрагмента выхода, развернутого к разным сторонам света с учетом размера поверхности трещин позволяет избежать однополярности на диаграмме трещиноватости.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© О.В.Лунина, А.С.Низовцев, 2026

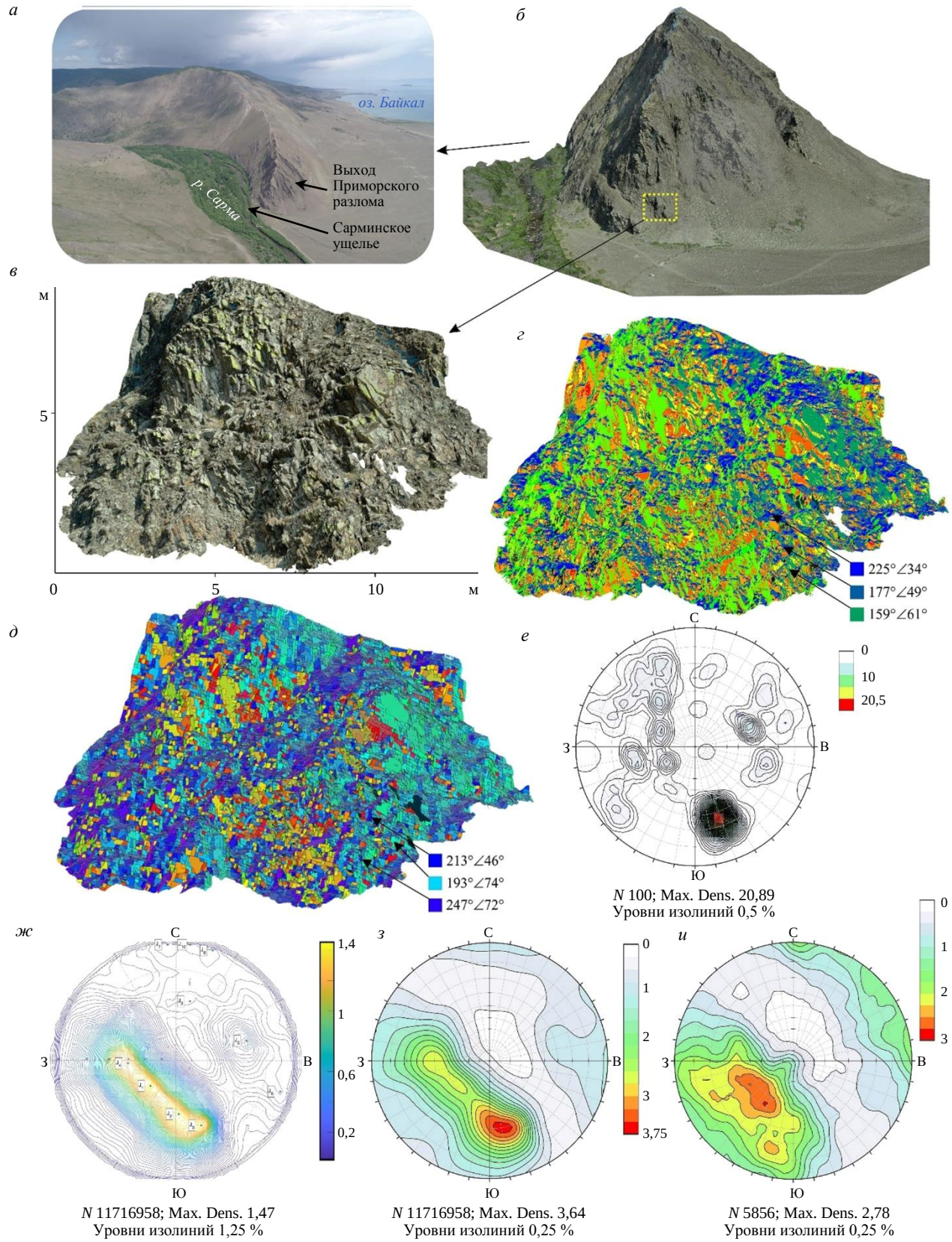


Рис.4. Результаты обработки цифровой модели Сарминского обнажения: *а* – местоположение обнажения в зоне Приморского разлома; *б* – цифровая модель; *в* – фрагмент ЦМО; *г*, *д* – классифицированные в программах DSE (*г*) и CloudCompare (*д*) плотные облака точек в зависимости от положения трещин в пространстве; *е-и* – диаграммы трещиноватости по данным полевого массового замера горно-геологическим компасом (*е*), извлеченной с помощью программы DSE и построенных в ней (*ж*), а также в программе Dips (*з*); извлеченной с помощью программы CloudCompare (*и*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

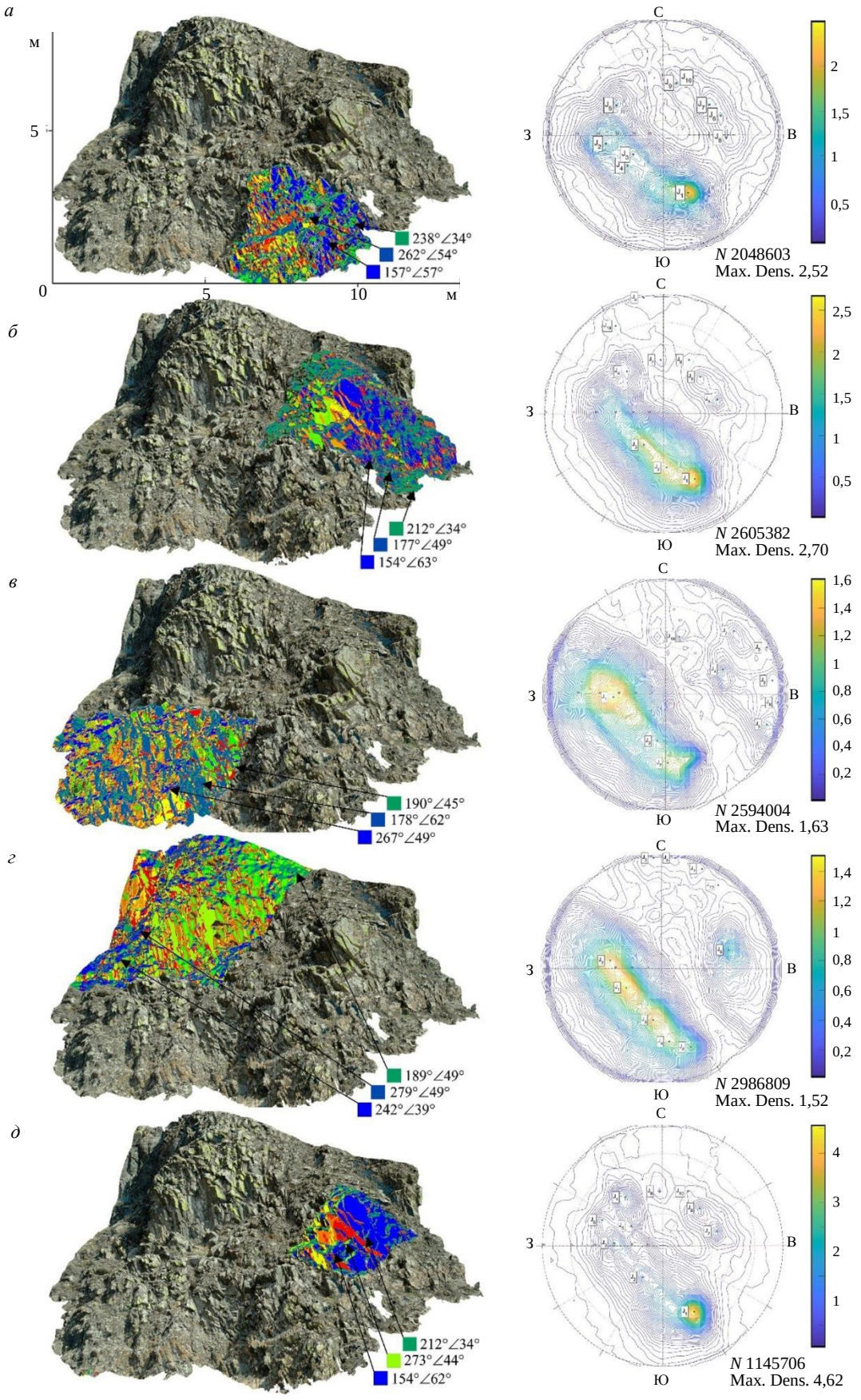


Рис.5. Классифицированные в зависимости от положения трещин в пространстве плотные облака точек Сарминского обнажения и соответствующие им диаграммы трещиноватости с уровнями изолиний 1,25 %: *а-г* – четыре части тестируемого фрагмента обнажения; *д* – часть фрагмента рис.5, *б*. Обработка и визуализация выполнены в программе DSE

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На следующем этапе тестируемый фрагмент коренного выхода в Сарминском ущелье был разделен на четыре части, для каждой из которых была построена диаграмма трещиноватости (рис.5, *а-г*). В свою очередь из фрагмента рис.5, *б* выделен еще один меньший участок, для которого извлечены и проанализированы элементы залегания разрывов (рис.5, *д*). Данное тестирование этих и других более мелких участков выхода показало, что, какая бы часть выхода не была взята, основные максимумы трещин сохраняются, хотя их плотность может незначительно варьировать. Главные системы совпадают с системами на общей диаграмме для всего выхода как по полевым замерам (см. рис.4, *е*), так и по рассчитанным в программе DSE (см. рис.4, *ж*). Из этого следует, что диаграмма трещиноватости фрагмента обнажения отражает его системность в целом. Нет необходимости тратить время и ресурсы компьютера на анализ всего плотного облака. Однако важно, чтобы фрагмент охватывал как можно больше сторон света.

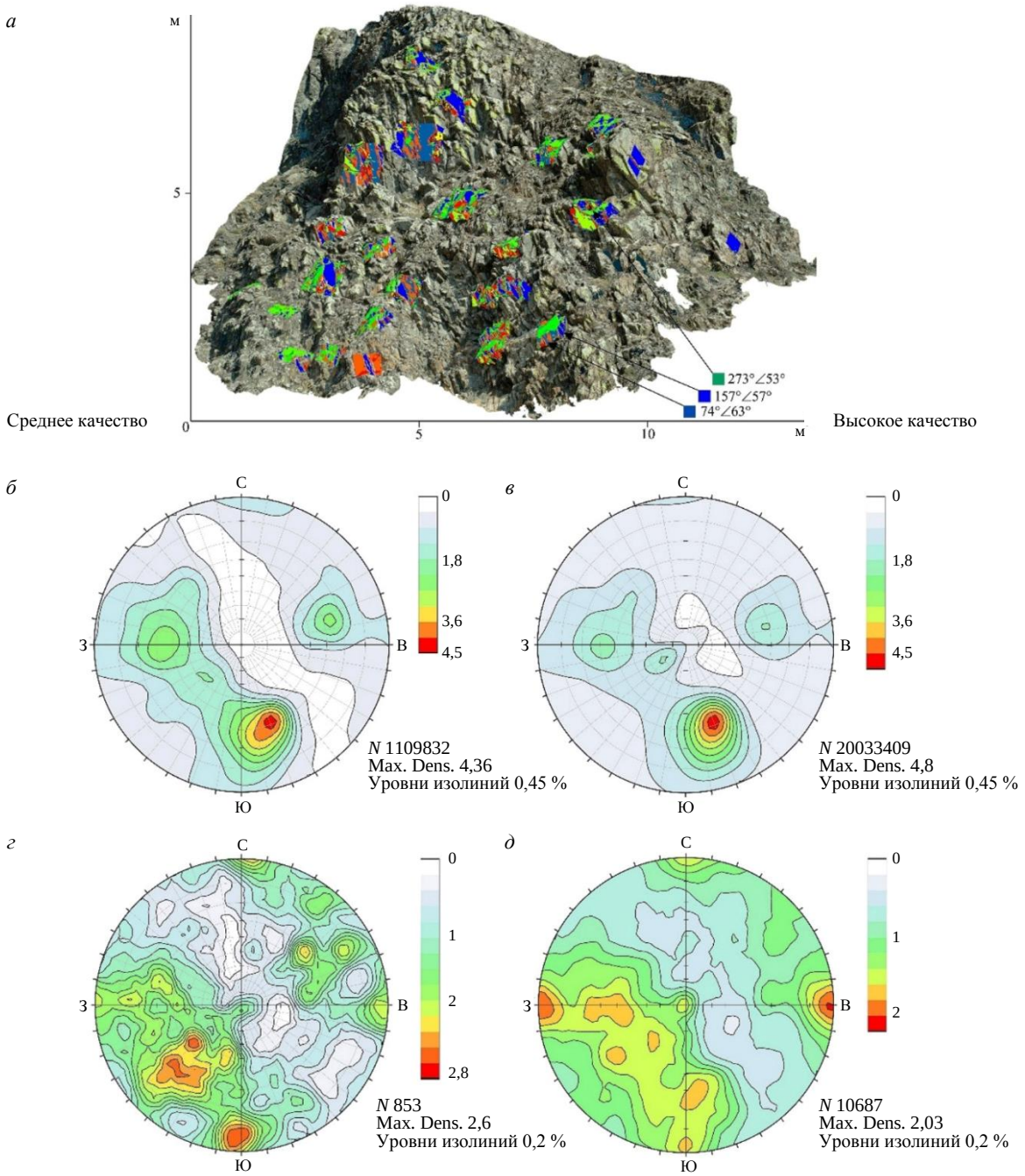


Рис.6. Результаты анализа плотных облаков точек Сарминского обнажения среднего (*б*, *г*) и высокого (*в*, *д*) качества:
а – локальные фрагменты выхода, для которых извлечены элементы залегания трещин и собраны в выборки;
б-д – диаграммы трещиноватости, извлеченной с помощью программ DSE (*б*, *в*) и CloudCompare (*г*, *д*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Несмотря на удовлетворительную визуализацию данных о трещиноватости в программе DSE при структурном анализе (рис.5), для решения геомеханических задач элементы залегания трещин из DSE удобнее визуализировать в других программах, например таких как Dips. Это связано со специальными встроенными инструментами оценки устойчивости склонов. Однако необходимо учитывать, что из-за огромного количества трещин даже при размере окна палетки 1 % в Dips происходит значительное осреднение данных при построении, вследствие чего число максимумов уменьшается (см. рис.4, *з*) по сравнению с выделенными в DSE (см. рис.4, *ж*, рис.5). Проблема решается уменьшением количества анализируемых разрывов путем выбора одного или нескольких небольших фрагментов ЦМО (рис.6, *а*), как это делается для традиционного массового замера трещин на природном обнажении.

Существенной проблемой для анализа цифровых двойников являются недостаточные вычислительные мощности компьютеров и время, затрачиваемое на обработку данных. В связи с этим был проведен еще один эксперимент, направленный на анализ трещиноватости по данным плотного облака среднего и высокого качества. Для этого было взято несколько небольших фрагментов цифровой модели Сарминского обнажения (рис.6, *а*), из которых извлечены трещины и собраны в две выборки. Первая выборка состояла из трещин, полученных суммарно из всех фрагментов плотного облака среднего качества, вторая – высокого качества. Оказалось, что диаграммы трещиноватости, построенные по данным DSE, идентичны, хотя количество трещин в одной выборке в 18 раз превышает число трещин в другой (рис.6, *б, в)*. По данным плагина FACETS программы CloudCompare, диаграммы в целом также очень схожи (рис.6, *г*, *д*), что свидетельствует о том, что для автоматизированного выделения трещин и их систем достаточно использовать плотное облако, полученное в Agisoft Metashape, среднего качества.

Заключение

Современные технические системы и программное обеспечение стремительно развиваются, и их внедрение в анализ трещиноватости неизбежно и необходимо для встраивания результатов геолого-структурных и тектонофизических работ в общий технологический процесс, связанный с поисками, разведкой и разработкой месторождений полезных ископаемых, а также инженерно-геологическими изысканиями под строительство особо ответственных сооружений. Вместе с тем необходимо их правильное применение для получения адекватных результатов о разрывных деформациях земной коры, чему способствуют опытно-методические работы.

В результате проведенного исследования освещены основные проблемы автоматизированного извлечения элементов залегания трещин, определены пути их решения и сделаны следующие выводы:

• Высокая точность математических расчетов азимутов и углов падения трещин и их удовлетворительное сходство с результатами измерения разрывов горно-геологическим компасом позволяет уверенно, но с соблюдением определенных условий использовать специализированные программы DSE и FACETS, плагин CloudCompare для анализа трещиноватости горных пород. Выбор программы из-за разных алгоритмов может зависеть от геометрии выхода и размера поверхности трещин, обращенных падением на камеру во время съемки. Наряду с этим при большом объеме данных, например более 10000 извлеченных трещин, DSE будет более полезным инструментом для тектонофизического анализа, так как позволяет сразу строить диаграммы трещиноватости и выделять большее количество систем трещин на диаграмме. В то же время для некоторых задач будет полезна выгрузка элементов залегания трещин из обеих программ в Dips или другие приложения для построения диаграмм и дальнейшего анализа.

• Однонаправленный ракурс съемки и обнаженность одной стенки выхода горных пород мешают определению разнообразия систем трещин, так как одна из них, обращенная падением на фотокамеру, подавляет все остальные. Несмотря на то, что программа DSE позволяет выделить основные системы разрывов с указанием их плотности в таблице, на диаграмме они выглядят только как центры максимумов и не пригодны для выделения сопряженных систем трещин некоторыми тектонофизическими методами (например, методом П.Н.Николаева). Многосторонний ракурс съемки и выбор фрагмента выхода, развернутого к разным сторонам света, позволяет избежать однополярности на диаграмме трещиноватости и дает возможность получать высокоточные сведения о строении разрывной сети массива горных пород.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• 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. В то же время в случае визуального изменения структурной обстановки из-за наличия крупной разломной зоны, изменения типа горных пород, необходимости детального изучения стенок карьера или других причин ЦМО позволяет многократно автоматизированным способом провести анализ разрывной сети на любом участке выхода, в том числе труднодоступном или даже недостигаемом для человека, что повышает качество и производительность работ.

• В условиях ограниченного вычислительного потенциала для выделения трещин и их систем достаточно использовать плотное облако, полученное в программе Agisoft Metashape, среднего качества, что экономит время и ресурсы компьютера. Высокое качество ЦМО целесообразно для визуального определения разрывов и других деформационных структур.

Возможности использования ЦМО для анализа разрывной сети естественных и искусственных выходов горных пород имеют огромные перспективы для внедрения в фундаментальные исследования строения земной коры и в практику горно-геологических работ. Этому будут способствовать развитие программного обеспечения, в том числе с применением машинного обучения нейросетей для выделения трещин разного иерархического уровня, обсчета их параметров и построения моделей разломно-блоковой среды по серии сближенных в пространстве ЦМО или по цифровой модели всего карьера. Правильное применение автоматизированного извлечения элементов залегания трещин и их систем кратно увеличивает эффективность работ по изучению деформационных характеристик горных пород, вовлекаемых в сферу инженерного воздействия и разработку месторождений полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Серебряков Е.В., Гладков А.С.* Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная» // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 512-525. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4

2. *Chesley J.T., Leier A.L., White S., Torres R.* Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA // Sedimentary Geology. 2017. Vol. 354. P. 1-8. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2017.03.013

3. *Junjie Zou, Honglin He, Yokoyama Y. et al.* A comparative study of bedrock fault scarps by s-UAV and t-LiDAR: Insights into site selection criteria for paleo-seismology studies // Geomorphology. 2022. Vol. 414. № 108372. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108372

4. *Koukouvelas I.K., Kyriou A., Nikolakopoulos K.G. et al.* Geological and 3D Image Analysis Toward Protecting a Geosite: The Case Study of Falakra, Limnos, Greece // Minerals. 2025. Vol. 15. Iss. 2. № 148. DOI: 10.3390/min15020148

5. *Na Wu, Zhengzhao Liang, Yan Tao et al.* Sensitivity Analysis of Fracture Geometry Parameters on the Mechanical Behavior of Rock Mass with an Embedded Three-Dimensional Fracture Network // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 18. № 9284. DOI: 10.3390/app12189284

6. *Tuckey Z.* An integrated UAV photogrammetry-discrete element investigation of jointed Triassic sandstone near Sydney, Australia // Engineering Geology. 2022. Vol. 297. № 106517. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106517

7. *Birch J.S.* Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for Rock Face Characterisation // Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization: Proceedings of the Workshop (Golden, Colorado, June 17-18, 2006). Golden: American Rock Mechanics Association, 2006. P. 13-32.

8. *Боос И.Ю., Юнаков Ю.Л., Патачаков И.В., Гришин А.А.* Изучение структурных особенностей прибортового массива по 3D-модели откоса, построенной с применением мультикоптера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 19-30. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_19

9. *Riquelme A.J., Abellán A., Tomás R., Jaboyedoff M.* A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 68. P. 38-52. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.03.014

10. *García-Luna R., Senent S., Jurado-Piña R., Jimenez R.* Structure from Motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 262-273. DOI: 10.1016/j.tust.2018.09.026

11. *Monsalve J.J., Pfreundschuh A., Soni A., Ripepi N.* Automated Discontinuity Extraction Software Versus Manual Virtual Discontinuity Mapping: Performance Evaluation in Rock Mass Characterization and Rockfall Hazard Identification // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021. Vol. 38. Iss. 3. P. 1383-1394. DOI: 10.1007/s42461-021-00416-9

12. *Dewez T.J.B., Girardeau-Montaut D., Allanic C., Rohmer J.* Facets: A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS, 2016. Vol. XLI-B5. P. 799-804. DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-B5-799-2016

13. *Panara Y., Menegoni N., Carboni F., Inama R.* 3D digital outcrop model-based analysis of fracture network along the seismogenic Mt. Vettore Fault System (Central Italy): the importance of inherited fractures // Journal of Structural Geology. 2022. Vol. 161. № 104654. DOI: 10.1016/j.jsg.2022.104654

14. *Perozzo M., Menegoni N., Crispini L. et al.* Quantitative characterization of fracture network in large sheath-fold: field and UAV-based digital outcrop model analysis (Ligurian Alps, Italy) // Journal of Structural Geology. 2025. Vol. 201. № 105551. DOI: 10.1016/j.jsg.2025.105551

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

15. *Battulwar R., Emami E., Zare M. et al.* Utilizing Deep Learning for the Automated Extraction of Rock Mass Features from Point Clouds // Geotechnical and Geological Engineering. 2024. Vol. 42. Iss. 7. P. 6179-6194. DOI: 10.1007/s10706-024-02886-2

16. *Buyer A., Schubert W.* Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 270-278. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.181

17. *Riquelme A.J., Tomás R., Abellán A.* Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. Vol. 84. P. 165-176. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.12.008

18. *Menegoni N., Giordan D., Inama R., Perotti C.* DICE: An open-source MATLAB application for quantification and parametrization of digital outcrop model-based fracture datasets // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 15. Iss. 5. P. 1090-1110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.09.011

19. *Seers T.D., Sheharyar A., Tavani S., Corradetti A.* Virtual outcrop geology comes of age: The application of consumer-grade virtual reality hardware and software to digital outcrop data analysis // Computers & Geosciences. 2022. Vol. 159. № 105006. DOI: 10.1016/j.cageo.2021.105006

20. *Cawood A.J., Bond C.E., Howell J.A. et al.* LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models // Journal of Structural Geology. 2017. Vol. 98. P. 67-82. DOI: 10.1016/j.jsg.2017.04.004

21. *Villarreal J.C.A., Rojas D.J.D., Ríos R.C.A.* 3D digital outcrop modelling of the Lower Cretaceous Los Santos formation sandstones, Mesa de Los Santos region (Colombia): Implications for structural analysis // Journal of Structural Geology. 2020. Vol. 141. № 104214. DOI: 10.1016/j.jsg.2020.104214

22. *Triantafyllou A., Watlet A., Le Mouélic S. et al.* 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium) // Journal of Structural Geology. 2019. Vol. 120. P. 55-66. DOI: 10.1016/j.jsg.2019.01.001

23. *Panara Y., Chandra V., Finkbeiner T. et al.* Fracture intensity and associated variability: A new methodology for 3D digital outcrop model analysis of carbonate reservoirs // Marine and Petroleum Geology. Vol. 158. Part B. № 106532. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106532

24. *Шеков В.А., Иванов А.А., Крылова С.А.* Цифровая модель обнажения как современный метод исследования геосреды на примере докембрийских комплексов Лахденпохского района // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 10. С. 84-98. DOI: 10.17076/geo1238

25. *Низовцев А.С., Лунина О.В.* Поиск новых подходов к исследованию трещиноватости на основе беспилотной аэрофотосъемки (на примере объектов в Байкальском рифте) // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы V Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, посвященной памяти академика Н.А.Логачева в связи с 95-летием со дня рождения, 16-19 апреля 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2024. С. 96-99.

26. *Серебряков Е.В., Гладков А.С., Гапфаров Т.Д.* Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 160-177. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_160

27. *Marques Jr. A., Horota R.K., de Souza E.M. et al.* Virtual and digital outcrops in the petroleum industry: A systematic review // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 208. № 103260. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103260

28. *Battulwar R., Zare-Naghadehi M., Emami E., Sattarvand J.* A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 920-936. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.01.008

29. *Nurshal M.E.M., Sadewo M.S., Hidayat A. et al.* Automatic and Manual Fracture-Lineament Identification on Digital Surface Models as Methods for Collecting Fracture Data on Outcrops: Case Study on Fractured Granite Outcrops, Bangka // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. № 560596. DOI: 10.3389/feart.2020.560596

30. *Riquelme A., Cano M., Tomás R., Abellán A.* Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 838-845. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.251

31. *Wen Yan Tung, Nagendran S.K., Ismail M.A.M.* 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 169. № 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/169/1/012051

32. *Семинский К.Ж.* Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445-467. DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0136

33. *Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 154 с.

34. *Лунина О.В.* Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407-434. DOI: 10.5800/GT-2016-7-3-0215

35. *Макаров С.А.* История развития пади Озерко на западном побережье Байкала // География и природные ресурсы. 1999. № 4. С. 36-43.

***Авторы*: Оксана Викторовна Лунина,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*), *lounina@crust.irk.ru, https://orcid.org/0000-0001-7743-8877*, **Алексей Сергеевич Низовцев,** *аспирант, старший лаборант* (*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*), *https://orcid.org/0009-0008-1047-0846*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0