

УДК 528.71/.72:551.243 + 553.52/.54 (470.22)

## **ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОБНАЖЕНИЯ КАК СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛАХДЕНПОХСКОГО РАЙОНА**

**В. А. Шеков, А. А. Иванов, С. А. Крылова**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Поиски и выявление площадей, перспективных на добычу блочного камня, представляют собой многостадийную процедуру. Требования современного рынка строительных материалов к качественным и количественным свойствам блочного камня способствуют совершенствованию методов оценки природной трещиноватости территорий на разных масштабных уровнях еще на стадии проведения поисковых работ. В связи с этим в современных условиях для поиска новых объектов, соответствующих современным требованиям рынка, наиболее эффективными становятся статистические и горно-геометрические методы с последующей их обработкой. На протяжении коротких полевых сезонов 2018–2019 гг. вдоль трассы Приозерск – Сортавала в рамках изучения структурных неоднородностей и систем залегания трещин, представленных докембрийскими породами Лахденпохского людиковийско-калевийского метаморфического комплекса, на отдельных участках общей протяженностью более 20 км собрана цифровая коллекция обнажений. Участок вдоль трассы, где в ходе дорожно-строительных работ в дорожной выемке хорошо вскрыты коренные породы, является идеальным с точки зрения проведения фотограмметрической съемки. Для обработки материалов использовался подход, основанный на использовании технологии фотограмметрии для создания цифровых моделей обнажений (DOM – Digital Outcrop Model). Невысокие требования технологии фотограмметрии к оборудованию, его стоимости позволяют рассматривать этот метод описания обнажений как очень перспективный при проведении полевых геологических работ, позволяющий быстро и эффективно формировать цифровую модель местности практически любого разрешения. Важной особенностью подхода является повышение безопасности при работе на вертикальных и недоступных участках обнажений значительной высоты. Одновременно повышается информативность таких новаций, позволяющая многократно использовать полученную модель при камеральной работе для различных целей.

**Ключевые слова:** цифровая модель обнажения; трещина; фотограмметрия; структурная геология; геологическая формация; докембрий; Республика Карелия.

### **V. A. Shekov, A. A. Ivanov, S. A. Krylova. DIGITAL OUTCROP MODEL AS A MODERN METHOD OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT RESEARCH: THE EXAMPLE OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN LAHDENPOHSKY DISTRICT**

Prospecting and identification of areas promising for dimension stone quarrying is a multi-stage procedure. The qualitative and quantitative requirements of the modern building materials market to dimension stone contribute to the advancement of methods for assessing the natural fracturing of territories at different scales already in the prospecting

stage. In this regard, to search for new objects that meet modern market requirements, the most efficient are the statistical and mining-geometrical methods with subsequent processing of their results. During the short field seasons of 2018–2019, a digital collection of outcrops was compiled as part of a study of structural heterogeneities and fracture orientation systems in some areas represented by Precambrian rocks in the Lahdenpohsky Ludikovian-Kalevian metamorphic complex along the Priozersk-Sortavala road, totaling more than 20 km in length. The area along the road where bedrock was exposed by roadway excavation is ideal from the point of view of photogrammetric survey. The approach used for processing the material was based on photogrammetry technology application for creating digital outcrop models (DOM). The relatively low equipment requirements of the photogrammetry technology, and its cost allow considering this method of describing outcrops as very promising for geological fieldwork, permitting for a quick and efficient generation of a digital terrain model of almost any resolution. An important feature of this approach is that it makes the work on vertical and inaccessible sections of outcrops at considerable heights safer. At the same time, the information content of such innovations is increased, and the resulting model can be repeatedly used in office work for various purposes.

**Key words:** digital outcrop model; fracture; photogrammetry; structural geology; geological formation; Precambrian; Republic of Karelia.

## Введение

Методы получения цифровых объемных моделей земной поверхности известны уже много лет. За последние два десятилетия эти технологии вслед за развитием техники сканирования, увеличением мощности вычислительных средств и усложнением программного обеспечения значительно двинулись вперед. Сегодня эти технологии уже не считаются экзотикой и области их применения расширяются в геометрической прогрессии.

В настоящий момент ключевые позиции в области получения цифровых моделей на основе реальных объектов на поверхности земли принадлежат двум технологиям – лазерного сканирования и фотограмметрической съемки. Очень много публикаций, сравнивающих технические возможности обеих технологий, появилось в области градостроительства и геодезии [Murphy et al., 2013], археологии – для документирования архитектурных памятников [Cabrelles et al., 2010; Chiabrande et al., 2016], в том числе основанных на применении технологии BIM (Building Information Model), как, например, HBIM (Historic Building Information Model) [Murphy et al., 2011].

LIDAR (Light Detection And Ranging) технология. Работа с 3D цифровыми (виртуальными) геологическими обнажениями начала развиваться параллельно и основывалась на использовании методов лазерного дистанционного зондирования. Методы сканирования окружающей среды основываются на использовании приборов под общим названием LIDAR, лазерный луч в которых, сканируя

окружающий мир с разрешением до 1–5 мм (т. е. размер точки), в зависимости от дальности измерения, позволяет получать точечные облака сложных объемных объектов с объемами до десятков и сотен миллионов точек. Статическое расположение лидарных приборов на земле называется TLS (Terrestrial Laser Scan). Обработка облаков точек, полученных этим методом, позволяет создавать полигональные модели объектов, а при наложении на них текстур возможно получение фотореалистичных моделей объектов очень высокой точности.

TLS помещается перед обнажением в соответствии с его характерными параметрами. При необходимости оборудование перемещается для сканирования соседних областей, чтобы перекрыть поверхность обнажения. Выравнивание различных сканирований и позиционирование полученных цифровых объектов являются частью стадии постобработки. Вес оборудования TLS ограничивает его использование на коптерах при съемке вертикальных обнажений.

В настоящее время выделяют множество видов лазерных сканеров, которые делятся по принципу измерения расстояния, по мобильности [Фролов...]. Некоторые типы относятся к классу стационарных, то есть съемка окружающего мира производится со штативов, другие являются мобильными, способными производить съемку местности в движении, благодаря использованию переносной головки лазерного сканера. Однако цена таких сканеров препятствует широкому их использованию для целей геологического моделирования.

Фотограмметрия – технология, основывающаяся на обработке изображений для получения цифровой модели поверхности земли (Digital Terrain Model, DTM) [Ullman, 1979; García-Sellés et al., 2014]. Набор изображений с обнажения формирует фотограмметрический блок, в котором вычисляются неизвестные параметры (положение и ориентация камер) для создания модели местности. Развитием этой технологии занимается направление, которое носит название «структура из движения» (Structure from Motion, SfM). Эта технология является эволюционным фотограмметрическим методом, основанным на новых алгоритмах сопоставления изображений и достижений в области компьютерного зрения.

SfM-технология позволяет создавать 3D-модели гораздо более скромными методами, достигая при этом точности лазерных сканеров. Мобильность и оперативность использования такого подхода инициировали дальнейшее развитие метода – появились мощные и производительные алгоритмы и программы обработки изображений, а совершенствование техники (фотоаппаратов, смартфонов) позволило сделать эту технологию доступной для обычного человека. Следует отметить «дружелюбность» данного метода в отношении горных пород. Фотограмметрия имеет некоторые ограничения при съемке однородных фонов, блестящих, отражающих и прозрачных объектов. Горные породы, как правило, имеют шероховатую неоднородную поверхность, которая для такой технологии является наиболее приемлемой.

Разница в результатах использования лазерных сканеров и фотоаппаратов для документирования горных пород остается, хотя бы за счет того, что фотограмметрия позволяет получить более разреженные облака точек, чем лазерная съемка. Но точность полученных моделей в последнее время уже почти сравнялась с результатами, получаемыми лазерными методами [Grussenmeyer et al., 2008; Nuttens et al., 2011], разрешение стало практически одинаковым во многих случаях съемки одного и того же объекта различными методами. Главное же преимущество метода фотограмметрии в том, что его простота и стоимость получения конечного продукта значительно ниже по сравнению с использованием различных LIDAR-устройств. Во многих случаях это обеспечивается еще и применением дешевых или вовсе бесплатных программ постобработки, сопоставимых по мощности с коммерческими программами.

Отдельного внимания требуют специализированные программы создания цифровых

геологических моделей, нацеленных не только на визуализацию, но и на информационное описание геологических обнажений, на работу с их особенностями [Hodgetts, 2014]. Несмотря на узкое применение, можно выделить, например, программу VRGS2020 (Virtual Reality Geological Studio), разработанную в университете г. Манчестера, Великобритания [Integrating..., 2007], использующую результаты как лазерного сканирования, так и полученные при фотограмметрической съемке.

Для использования цифровых моделей при расчете различных горно-технологических процессов применяется программа ShapeMetriX3D компании 3GSM GmbH, Австрия [3gsm...]. Эта программа предназначена для геологического картирования, которое может осуществляться на поверхности, в пределах открытого карьера, и под землей, и основана на получении полигональных моделей с использованием как технологии лазерного сканирования, так и SfM-технологий на базе цифровых зеркальных камер. Результатом такой съемки является модель обнажения с довольно высоким разрешением и значительными размерами. Встроенный аналитический аппарат позволяет выделять трещины, стратиграфические элементы и другие геологические особенности обнажения, проводить замеры залегания этих элементов, их взаимодействие, рассчитывать их геометрические параметры и другие свойства.

Развитию технологии описания цифровых обнажений (DOM) посвящена целая серия публикаций [Bellian et al., 2005; Tavani et al., 2014; Corradetti et al., 2017 и др.], за последние два десятилетия их можно насчитать несколько десятков. Как правило, цифровая 3D-модель обнажения строится с использованием различных специализированных программ. В качестве альтернативы используют свободно распространяемые программы. По своему уровню они зачастую не уступают коммерческим.

Помимо узкоспециализированных программ подготовки цифровых моделей земной поверхности или обнажений на рынке представлено большое количество программ фотограмметрии общего профиля, которые не нацелены на решение узких задач геологии, но позволяют получать очень хорошие результаты, в том числе и в этой сфере. Сегодня можно насчитать более десятка различных программ, позволяющих по серии фотографий построить облако точек, характеризующих различные контрастные участки обнажения, построить его полигональную модель и, наложив текстуру, извлеченную из фотографий, сформировать полноценную модель обнажения.

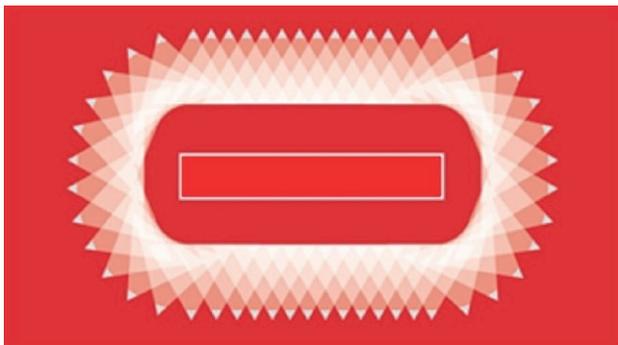


Рис. 1. Порядок фотографирования объекта (расположен в центре) при фотограмметрической съемке, с обходом вокруг этого объекта

Fig. 1. The procedure for photographing an object (located in the center) during photogrammetry surveying, bypassing this object

К особенностям технологии SfM относят некоторые правила, с учетом которых должна осуществляться съемка: снимать необходимо в хороших погодных условиях; объект надо фотографировать со всех сторон; каждый кадр должен пересекать предыдущий; при необходимости детальные виды снимаются отдельно. Главное из достоинств фотограмметрии для геолога – можно получить нужную информацию об объекте, всего лишь один раз выехав на обнажение, а далее проводить визуальный анализ на рабочем месте. По цифровой модели можно произвести замеры ориентации как открытых плоских структур, так и закрытых, визуализировать результаты в виде таблиц, диаграмм или детальной модели элементов обнажения,

то есть можно провести более подробный анализ объекта.

В инструкции по использованию программы 3DF Zephyr Free компании 3DFLOW edition приведена схема фотографирования объекта для получения модели (рис. 1).

Съемка производится со всех сторон. Должны быть получены как минимум две фотографии, на которых видна одна и та же точка. Модель может быть построена только для тех участков, которые были сфотографированы дважды и не менее чем с двух ракурсов. Наложение соседних фотографий по площади должно быть не менее 60 %. Это повышает возможности оцифровки модели по фотографиям, повышает ее точность (рис. 2). Детальное описание процесса фотографирования изложено в инструкциях к соответствующим программам.

В результате обработки сделанных фотографий получаем цифровую полигональную модель обнажения, которая может быть масштабирована, позиционирована в пространстве, изображена в соответствующих ракурсах. Модель можно зарегистрировать в программе с учетом ее пространственных координат. Для этого в поле зрения фотоаппарата при съемке размещают специальные маркеры, координаты которых известны. Если фотоаппарат оснащен GPS-устройством, привязка обнажения на местности может быть осуществлена автоматически.

Основным достоинством фотограмметрического подхода является скорость докумен-

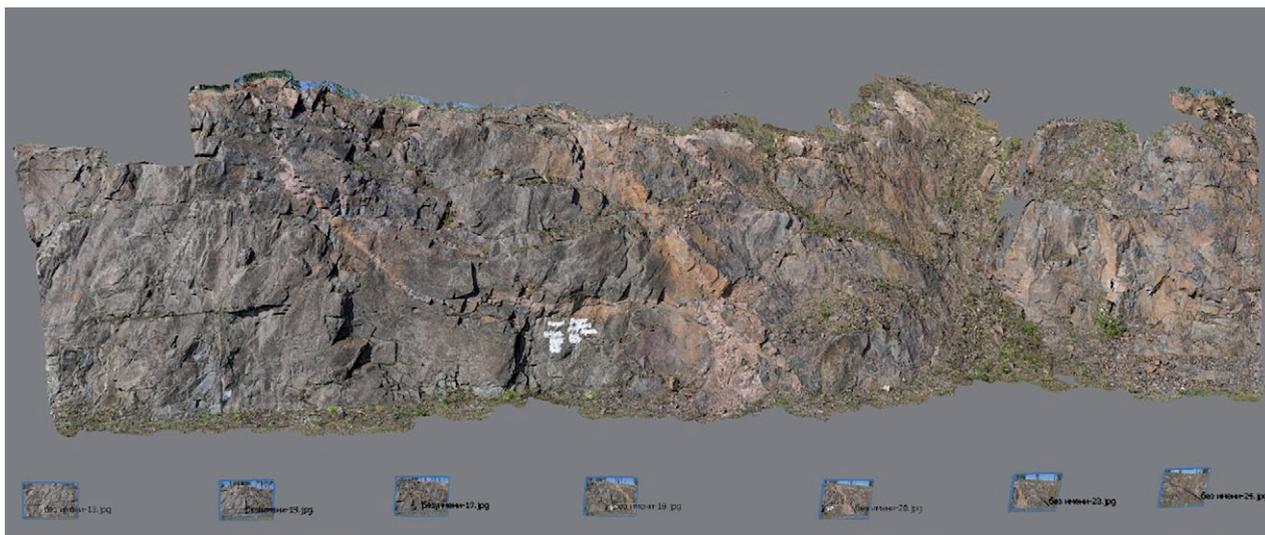


Рис. 2. Модель обнажения с отметкой точек для фотографирования (прямоугольные пиктограммы внизу рисунка – камеры)

Fig. 2. Outcrop model with point marking for photographing (rectangular pictograms beneath the picture are cameras)

тирования обнажения. При соответствующей погоде обнажение в 200 метров может быть задокументировано за 20 минут с учетом детализации отдельных его частей. Дальнейшая обработка требует гораздо больше времени и, в зависимости от мощности компьютера, может занимать более 10 часов. Это обстоятельство преодолевается обычно тем, что все вычисления выполняются в ночное время. Для этого многие программы снабжены специальными командными возможностями автоматизации этой процедуры.

Для подготовки цифровой модели обнажения требуется использование класса программ, которые выполняют операции со снятыми фотографиями. Количество таких фотографий для одной модели ограничивается только размером оперативной памяти компьютера. Для ПК с 32 Гб оперативной памяти оно может достигать нескольких сотен. К таким программам относятся наиболее популярные сегодня Agisoft Photoscan или ее последняя версия Agisoft Metashape – коммерческая программа российского производства. Помимо дорогостоящей (около 3000 долларов США) профессиональной версии предлагается также упрощенная версия, стоимость которой не превышает 200 долларов США, что делает ее доступной. Другая, менее известная, но очень мощная программа – 3DF Zephyr. Ее параметры и цена сопоставимы с предыдущей, однако при использовании в обработке одновременно до 50 фотографий эта программа работает как бесплатная. Meshroom – еще одна бесплатно распространяемая программа, содержащая все основные возможности коммерческих программ и широко используемая среди специалистов. Существует еще более десятка других менее известных как коммерческих, так и свободно распространяемых программ, в той или иной степени используемых разными специалистами, в зависимости от предпочтений и требований. Для специализированной обработки полученных моделей используют вышеуказанные коммерческие программы VRGS2020 и ShapeMetriX3D, программу 3D Reshaper и ее более продвинутые аналоги из набора Leica Cyclone компании Leica Geosystems AG. Другой программой, предназначенной для обработки полученных облаков точек, является свободно распространяемая программа CloudCompare с плагинами, которые расширяют ее возможности в области обработки геологической информации.

Достижения в области получения цифровых моделей поверхностей с помощью фотограмметрии и лазерного сканирования, без сомне-

ния, стали революцией в области обработки 3D-пространства в виде распределенных моделей поверхности. Возможность получения моделей земной поверхности практически любого разрешения с помощью этих технологий позволяет решать множество задач, которые, с одной стороны, значительно облегчают работу геолога, а с другой, позволяют возвращаться к модели много раз, дополняя предыдущие исследования и замеры новыми характеристиками, не учтенными на ранних этапах изучения обнажения.

Описанные технологии имеют свои преимущества при использовании. Часто выполнение замеров пространственного положения на некоторых обнажениях является опасным, а иногда, на высоких участках, просто невозможным. В таких случаях цифровая виртуальная модель обнажения решает эту проблему.

Важным различием в качественных показателях полученных разными методами облаков точек является их плотность на единицу сканируемой поверхности. Если лазерное сканирование дает практически сплошную заливку поверхностей точками, увеличивая размер облачных структур, то результатом работы фотограмметрических программ являются более разреженные поля. Это в дальнейшем может сказаться на качестве выделения поверхностей, характеризующихся как трещины, и снизить точность их выделения. Использование соответствующих функций программы CloudCompare по повышению количества точек на поверхностях трещин в какой-то степени нивелирует эти недостатки, повышая точность выделения трещин из массива.

Важнейшим преимуществом SfM-технологии является стоимость ее реализации и возможность использования с легкими летательными аппаратами – квадрокоптерами, гексакоптерами и другими подобными устройствами. Такие аппараты позволяют использовать для съемки даже зеркальные камеры высокого разрешения.

## **Методика**

Для построения 3D-моделей, рассмотренных ниже, использовалась программа Agisoft Metashape и 3DF Zephyr. Построение 3D-модели в этих программах производится в несколько этапов, все операции выполняются автоматически. Оператору необходимо задать параметры точности модели, которые определяют время, необходимое для ее обработки. Получив готовую модель, пользователь уже может редактировать ее, измерять расстояния

на поверхности модели, рассчитывать площадь поверхности и объем.

Обработка и анализ построенных моделей производились в программе CloudCompare. Программа имеет основной набор инструментов редактирования облачных структур, включая различные алгоритмы для их классификации, манипулирования – вырезания, удаления, копирования и т. д. Для извлечения из облака плоских структур (трещин) в эту программу встроены специализированные плагины: qFacet (для автоматического извлечения трещин) и Compass (ручное извлечение трещин). Оба плагина имеют все необходимые инструменты для идентификации, выделения трещин и получения их элементов залегания. В том числе регистрация облачной модели в географических или местных системах координат.

Плагин qFacet может автоматически извлекать плоские грани из облаков точек, классифицировать грани на основе их ориентации, фильтровать плоскости и отображать их ориентации на стереограмме. Плагин Compass включает два режима: режим карты для определения геологических единиц и режим компаса для измерения ориентации и толщины поверхности. Режим компаса содержит три инструмента для измерения ориентаций: «Плоскость» (используется для измерения ориентации полностью открытых структур), «Трассировка» (позволяет оценить структуру и ориентацию контакта на основе его пересечения с неплоской поверхностью) и «Линейность» (измеряет тренд и погружение линии между двумя точками). Режим карты предоставляет функциональные возможности хранения и организации наборов данных для интерпретации их в более крупных проектах, где необходимо учесть много различных геологических особенностей.

## Результаты

**Геологическая характеристика района работ.** По данным геологических, геофизических материалов и анализу космоснимков в юго-восточной части Фенноскандинавского щита выделяются две системы глубинных разломов: ортогональная и диагональная, определяющие современное блоковое строение земной коры региона [Хазов и др., 2004].

Диагональная система, формирующая границы геоблоков, имеет преимущественное распространение (рис. 3). В меньшей степени проявлена ортогональная система, являющаяся более ранней, что подтверждается смещением глубинных разломов системы в плоскости зон северо-западного простирания. Таким

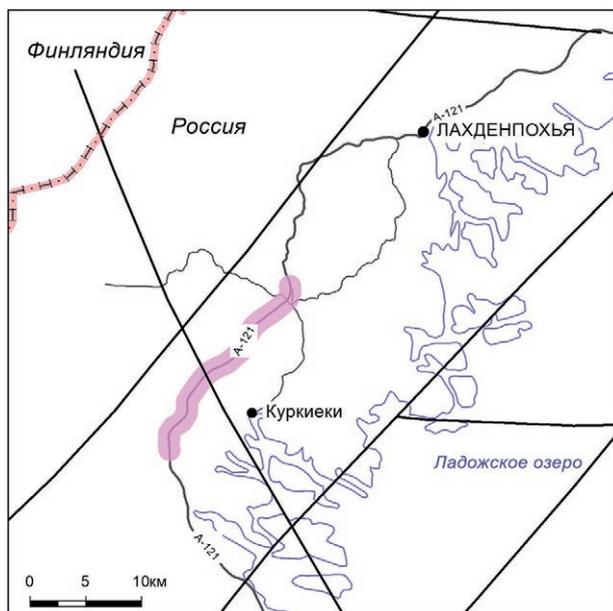


Рис. 3. Обзорная схема района пос. Куркиеки с расположением участка проведения методических работ (выделено розовым цветом) вдоль автотрассы А-121. Сплошные черные линии – региональные разломы [Хазов и др., 2004]

Fig. 3. Overview diagram of the Kurkijoki village area with the location of the methodological work site (highlighted in pink, along the A-121 highway). Solid black lines are regional faults [Khazov et al., 2004]

образом, участок проведения фотограмметрической съемки расположен на некотором удалении от разлома северо-восточного простирания и, в свою очередь, пересекается разломом северо-западного простирания.

Район работ (выделен на рис. 3 широкой розовой кривой) сложен докембрийскими породами лахденпохского людиковийско-калевийского метаморфического комплекса, в котором выделены четыре подкомплекса – ихальский, куркиекский, лумиварский и кухкинский [Степанов и др., 2013]. Три из них, а именно кухкинский, куркиекский и ихальский, развиты в районе работ (рис. 4).

Кухкинский подкомплекс гранитогнейсовый представлен гнейсами гранат-биотитовыми, иногда с кордиеритом, полосами и линзами кристаллосланцев биотит-амфиболовых и амфиболитов, мигматитами по ним.

Куркиекский подкомплекс гиперстено-гнейсовый представлен гнейсами гиперстен-биотитовыми, гиперстен-гранат-биотитовыми, гранат-биотитовыми, мигматитами по ним, полосами и линзами биотит-амфиболовых гнейсов и амфиболитов.

Ихальский подкомплекс амфиболит-графито-гнейсовый представлен гнейсами графит-биотитовыми, гиперстен-гранат-биотитовыми,

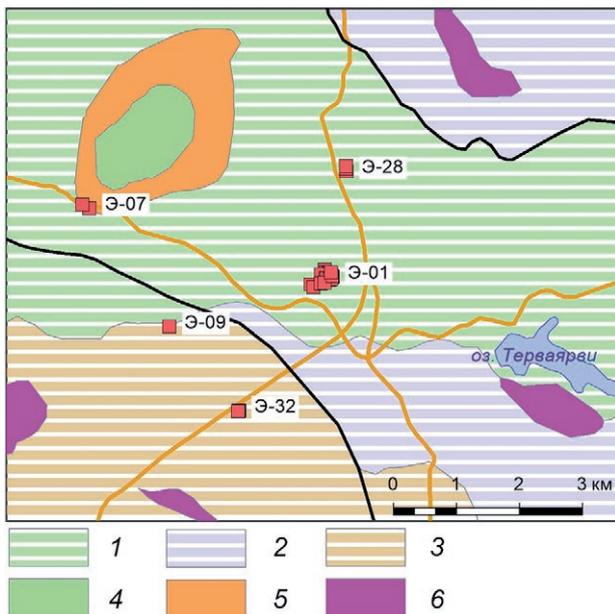


Рис. 4. Схема геологического строения района пос. Куркиеки (Лахденпохский р-н, Республика Карелия):

Лахденпохский метаморфический комплекс: 1 – ихальский подкомплекс амфиболит-гранито-гнейсовый – гнейсы гранат-биотитовые, гранат-амфиболовые; 2 – куркиекский подкомплекс гиперстено-гнейсовый – гнейсы гиперстен-биотитовые, гиперстен-гранат-биотитовые, гранат-биотитовые, мигматиты по ним; 3 – кухкинский подкомплекс гранито-гнейсовый – гнейсы гранат-биотитовые, иногда с кордиеритом, полосы, линзы кристаллосланцев биотит-амфиболовых и амфиболитов. Интрузивные образования: элисенваарско-вуоксинский комплекс субщелочных ультрамафитов, монзонитов и сиенитов: 4 – вторая фаза (сиениты, сиениты кварцевые, дайки лампроитов); 5 – первая фаза (ультрамафиты, меланосиениты полевощпат-биотит-пироксеновые). Нерасчлененные интрузивные образования: 6 – диориты, кварцевые диориты гиперстен-биотитовые, амфибол-биотитовые.

Квадратами с номерами обозначены точки полевых наблюдений. Сплошные черные линии – тектонические нарушения. Геологическая основа скопирована с Государственной геологической карты Российской Федерации. Масштаб 1:200 000, Р-35-XXIV, Р-36-XIX (Сортавала)

Fig. 4. Geological structure scheme of the Kurkijoki village area (Lahdenpohya District, Republic of Karelia):

Lahdenpohsky metamorphic complex: 1 – Ihala subcomplex amphibolite-granite-gneiss – garnet-biotite gneisses, garnet-amphibole; 2 – Kurkijoki hypersthene-gneiss subcomplex – gneisses hypersthene-biotite, hypersthene-garnet-biotite, garnet-biotite, migmatites on them; 3 – Kukhkinsky subcomplex granite-gneiss – garnet-biotite gneisses sometimes with cordierite, strips, lenses of biotite-amphibole shales and amphibolites. Intrusive formations: Elisenvarsko-Vuoksinsky complex of subalkaline ultramafic rocks, monzonites and syenites: 4 – second phase (syenites, quartz syenites, lamproite dikes); 5 – first phase (ultramafites, melano-syenite feldspar-biotite-pyroxene). Undivided intrusive formations: 6 – diorites, quartz diorites hypersthene-biotite, amphibole-biotite.

Squares with numbers indicate the field observation points. Solid black lines are tectonic dislocations. The geological base is copied from the State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000, P-35-XXIV, P-36-XIX (Sortavala)

гранат-биотит-гиперстеновыми, гранат-биотитовыми, мигматитами по ним, полосами и линзами амфиболитов и скарноидов.

К интрузивным образованиям района относятся нерасчлененные раннеорогенные образования калевия, представленные диоритами, и ультрамафиты первой фазы, монзониты и сиениты второй фазы элисенваарско-вуоксинского комплекса субщелочных ультрамафитов вепся.

Съемка обнажений осуществлялась вдоль дороги С.-Петербург – Сортавала на участке между поворотом на пос. Куркиеки и г. Лахденпохья. Точки задокументированных обнажений показаны на рис. 5.

Несмотря на то что вопросу соответствия данных ручных замеров и полученных из цифровых моделей посвящено очень много работ, нами было проведено сопоставление данных, полученных двумя этими методами. Другой проблемой, с которой сталкивается исследователь при документировании обнажений, является наличие разного рода рыхлых отложений, растительности, которые мешают определению структурных элементов залегания трещин в массиве.

**Обнажение № 68**, обозначенное в левом нижнем углу рис. 5, находится в сложных захламленных условиях (рис. 6).

Обнажение сложено гранат-биотитовыми гнейсами кухкинского гранито-гнейсового подкомплекса лахденпохского метаморфического комплекса палеопротерозойского возраста. Малодоступно для изучения трещиноватости. Имеющиеся трещины проявлены в стенке, на которой невозможно работать по правилам безопасности (рис. 7, 8).

Ниже показаны трещины, которые выделены по модели ручным способом с помощью плагина Comras (рис. 9). При ручном выделении выбираются наиболее представительные трещины, которые уверенно выделяются программным способом.

Помимо выделения трещин необходимо получить информацию об элементах их залегания. В данном примере замеры трещиноватости выполнены по всему объему обнажения с общей длиной 60 метров. На рис. 10 представлены результаты замеров элементов залегания каждой трещины.

Программы оценки параметров трещиноватости позволяют в дальнейшем обезличить выделенные трещины и работать с ними уже в режиме самостоятельной обработки (рис. 11). В частности, выделенные трещины могут быть экспортированы в другие программы для дополнительного изучения их взаимодействия.

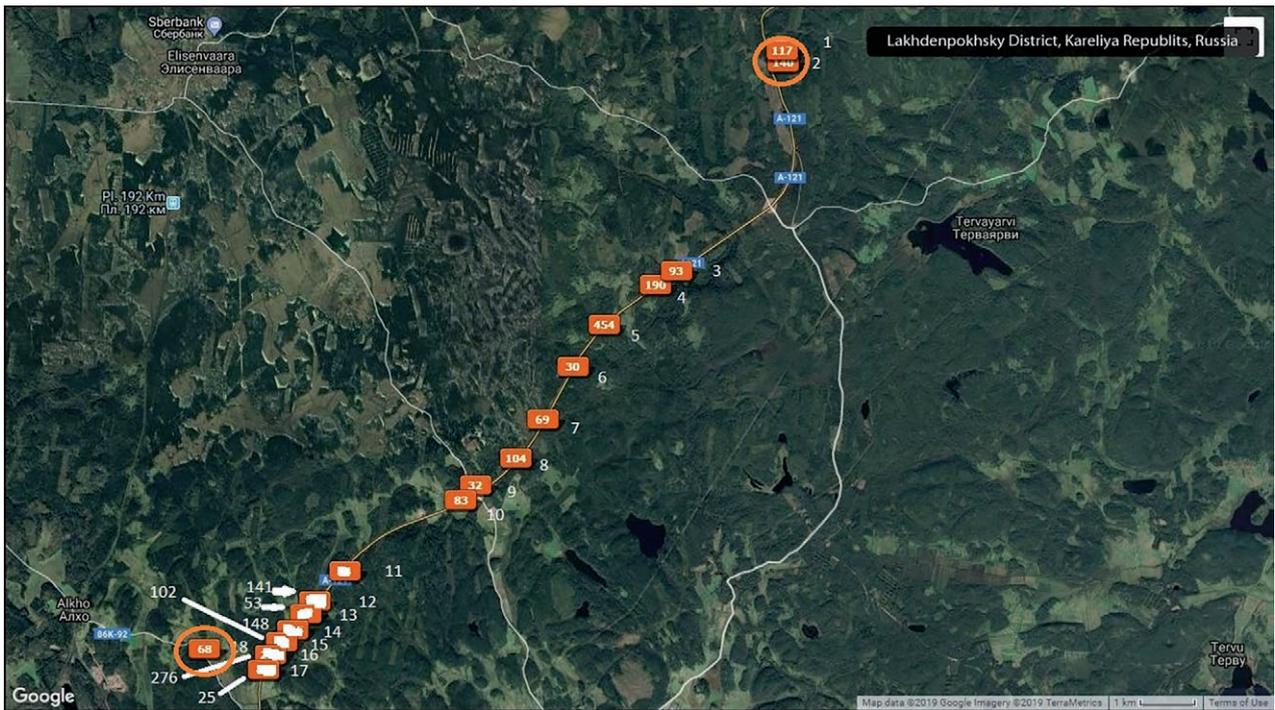


Рис. 5. Схема расположения обсуждаемых объектов. Пилотные объекты выделены окружностями  
 Fig. 5. The layout of the discussed objects. The pilot objects are shown by circles



Рис. 6. Фотография обнажения № 68  
 Fig. 6. Photograph of outcrop No. 68

Неудобные условия залегания обнажения, покрытого обвалившимися остатками камня и элементами почвенно-растительного слоя, не позволяют полноценно провести замеры элементов залегания трещин. Поэтому при полевых работах выполнены единичные замеры

ориентировки разлома и основных систем трещин в двух-трех точках с минимальными перемещениями по скальному уступу. Использование подходов, заложенных в цифровую модель обнажения, позволяет проводить такую работу без угрозы жизни геолога.



Рис. 7. Модель обнажения № 68. Здесь и на рис. 9–11, 13, 15, 16 длина шкалы – 15 метров

Fig. 7. Model of outcrop No. 68. Scale in the lower right corner – 15 meters length



Рис. 8. Увеличенное изображение модели (участок выделен красным квадратом на рис. 7). Здесь и на рис. 14 длина шкалы – 2 метра

Fig. 8. Enlarged image of the model. In Fig. 7 the plot is shown by a red square. The length of the scale is 2 meters



Рис. 9. Результат выделения плоскостей трещин на поверхности обнажения в программе CloudCompare с плагином Compas

Fig. 9. The result of the extraction of fracture planes on the exposed surface in CloudCompare with the Compas plugin

Ниже приводятся диаграммы пространственной ориентировки разлома и трещин по полевым замерам компасом в т. № 68 и пространственной ориентировки трещин, полученные по результатам фотограмметрической съемки в той же точке (рис. 12).

Как при ручной, так и при фотограмметрической съемке зафиксировано отчетливое северо-

ро-западное простирание крутопадающих тектонических нарушений.

**Обнажение № 117** обозначено в правом верхнем углу рис. 5, фотография обнажения показана на рис. 13. Гранат-биотитовые гнейсы ихальского амфиболит-гранитогнейсового подкомплекса лахденпохского метаморфического комплекса обнажены при проведении



Рис. 10. Выделенные плоскости трещин с параметрами залегания  
 Fig. 10. Highlighted fracture planes with orientation parameters



Рис. 11. Трещины в массиве на обнажении № 68  
 Fig. 11. Fractures in the massif at outcrop No. 68

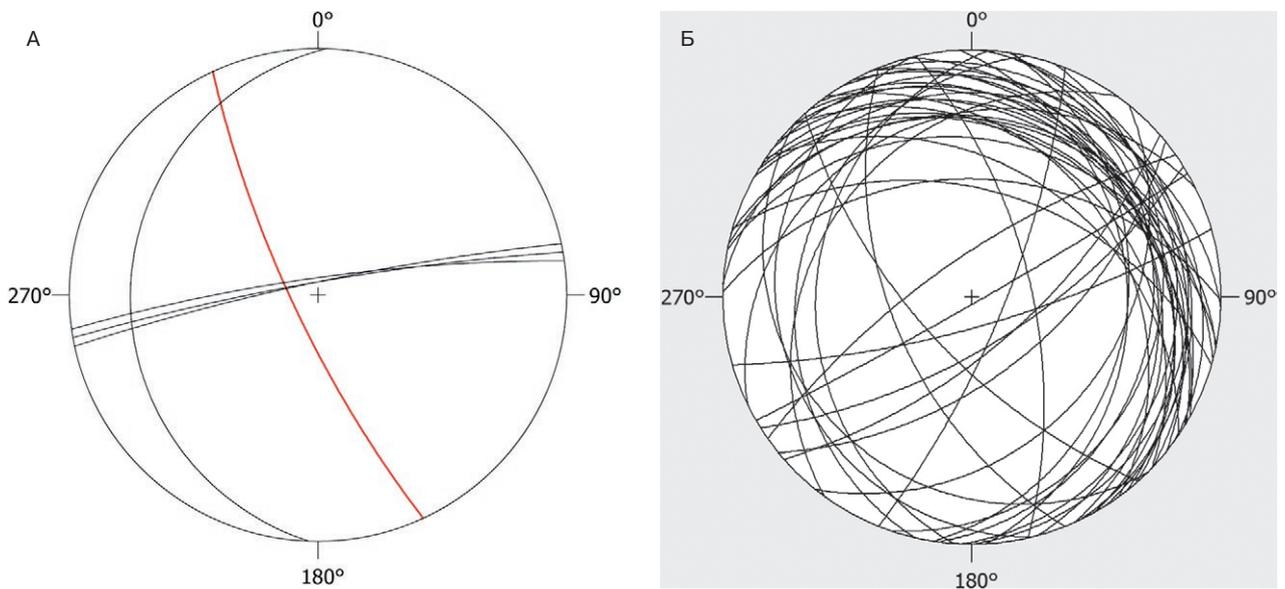


Рис. 12. А – диаграмма ориентировки разлома и трещин в т. № 68 (плохо обнаженный скальный уступ по дороге на пос. Алхо), красная линия – простирание разлома, ручные замеры (5 замеров ориентировки основных систем); Б – диаграмма ориентировки трещин в той же точке по результатам фотограмметрической съемки (46 обработанных плоскостей). Здесь и на рис. 17 диаграммы построены в Stereo 32, равноугольная проекция, верхняя полусфера

Fig. 12. А – orientation diagram of the fault and fractures at p. No. 68 (poorly exposed rocky bench along the road to the v. Alkho), the red line – fault extension, manual measurements (5 measurements of the orientation of the main systems); Б – orientation diagram of fractures at the same point according to the results of photogrammetric surveying (the number of processed planes is 46). (Diagrams are built in Stereo 32, equal-angle projection, upper hemisphere)



Рис. 13. Обнажение № 117

Fig. 13. Outcrop No. 117



Рис. 14. Укрупненный фрагмент обнажения № 117 (участок выделен на рис. 13 красным прямоугольником)

Fig. 14. An enlarged outcrop fragment representing the area shown by red rectangle in Fig. 13. Scale length is 2 meters

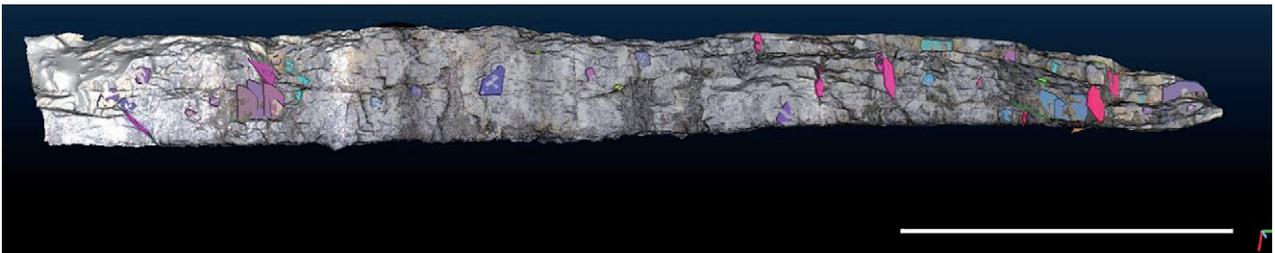


Рис. 15. Основные плоскости трещин, выделенные на обнажении № 117

Fig. 15. The main fracture planes extracted from outcrop No. 117

работ по строительству дороги Приозерск – Сортавала. Массовых взрывов не было, поэтому стенки сохранили свою форму и трещины в стенке сохранили свою исходную ориентировку, что довольно хорошо видно при близком рассмотрении части обнажения (рис. 14). Взрывных трещин практически нет, а те, которые можно наблюдать, расположены вблизи

взрывных скважин с мелкой сеточкой трещин небольшого размера, до 5–10 см.

Процедура выделения трещин по модели в данной точке (рис. 15, 16) аналогична описанной для т. № 68.

На рис. 17 приводятся диаграммы пространственной ориентировки плоскости зеркал скольжения и трещин, замеренных в полевых



Рис. 16. Плоскости трещин (т. № 117). Обнажение скрыто  
 Fig. 16. Fracture planes. The outcrop is hidden

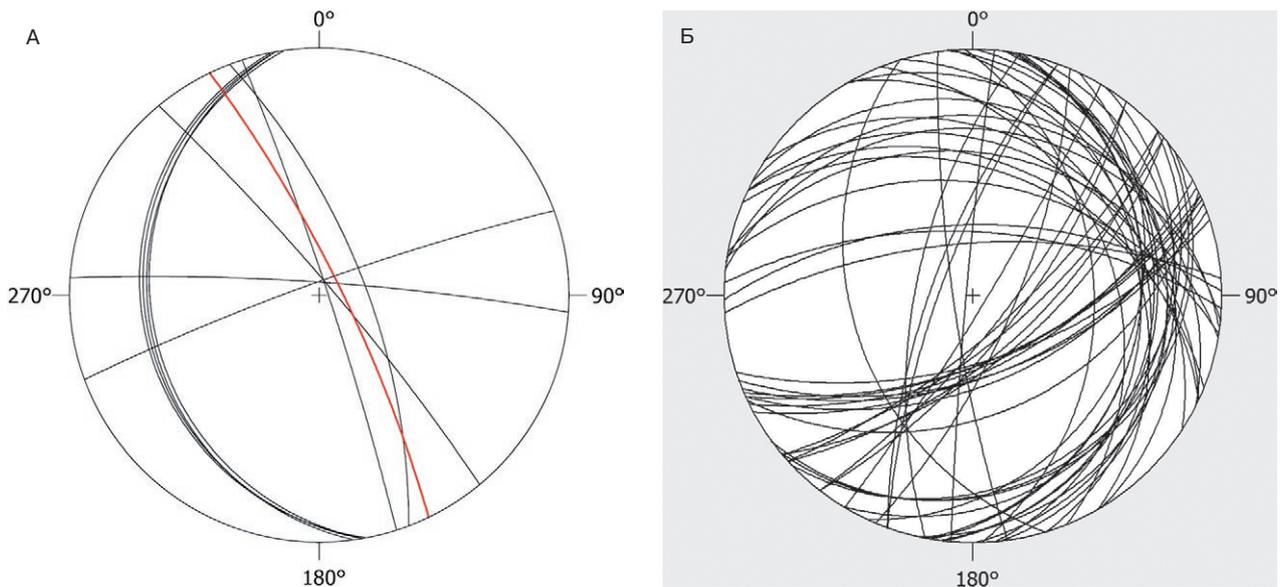


Рис. 17. А – диаграмма ориентировки плоскости зеркала скольжения и трещин в т. № 117, красная линия – плоскость зеркала скольжения, ручные замеры (11 замеров ориентировки основных систем); Б – диаграмма ориентировки трещин в той же точке по результатам фотограмметрической съемки (53 обработанные плоскости)

Fig. 17. А – orientation diagram of the slickenside plane and fractures, at point No. 117, the red line is the plane of the slickenside, manual measurements (11 measurements of the main systems orientation); Б – orientation diagram of the fractures at the same point according to the results of photogrammetric surveying (the number of processed planes is 53)

условиях, и пространственной ориентировки трещин, полученных по результатам фотограмметрической съемки в той же точке.

В данной точке при ручной съемке также фиксируется преобладание северо-западного простирания тектонических нарушений, в то время как при фотограмметрической съемке основные простирания крутопадающих тектонических нарушений варьируют от субширотного до северо-западного.

Высота обнажения, превышающая в некоторых местах 4 метра, ограничивает возможности проведения замеров элементов залегания трещин ручным способом, с помощью геологического компаса. Использование цифровой модели обнажения повышает возмож-

ности для получения хорошего результата многократно.

### Заключение

Использование цифровых моделей земной поверхности дает дополнительные возможности для изучения строения геологического обнажения. Помимо того что модель может быть использована многократно для решения разного рода структурных задач, такой подход рационализирует работу геолога, позволяя в полевых условиях уделять внимание операциям, которые невозможно выполнить в камеральных условиях, – отбор проб, изучение особенностей строения, выделение мелких деталей. Проце-

дура описания обнажения в целом значительно упрощается за счет создания ее реалистичной цифровой модели. Возможность регистрации моделей в различных координатах позволяет очень точно размещать их на картах Google Earth, объединяя множество таких обнажений в единую сеть, а также работать со структурными элементами горных пород и пространственной ориентировкой трещин в единой системе координат.

Опыт предыдущих исследователей и результаты работы на изученных обнажениях показывают неплохую сходимость результатов, полученных традиционными методами с использованием геологического компаса и методами, которые предлагают исследователю современные программы по обработке цифровых моделей.

*Методы цифрового моделирования использовались для обработки материалов съемки геологических обнажений в Лахденпохском районе Республики Карелия в процессе выполнения работ в теме № 210 по государственному заданию в соответствии с проектом № АААА-А18-118020290175-2.*

## Литература

- Степанов К. И., Санин Д. М., Санина Г. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000. Изд. второе. Карельская серия. Листы Р-35-XXIV, Р-36-XXIX, Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 231 с.
- Фролов А. Виды лазерных сканеров. Принципы измерения // НГКИ. 3D Инженерные изыскания [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ngce.ru/pg\\_publications11.html](http://www.ngce.ru/pg_publications11.html) (дата обращения: 23.04.2020).
- Хазов Р. А., Шаров Н. В., Исанина Э. В. Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 55–74.
- 3gsm software&measurements [Электронный ресурс]. URL: <https://3gsm.at/produkte/> (дата обращения: 23.04.2020).
- Bellian J. A., Kerans C., Jennette D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling // J. Sediment. Res. 2005. No. 75. P. 166–176.
- Cabrelles M., Seguí A. E., Navarro S., Galcerá S., Portalés C., Lerma J. L. 3D photorealistic modelling of stone monuments by dense image matching // Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symp., Newcastle upon Tyne, UK. 2010. P. 121–124.
- Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user oriented HBIM // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XLI-B5, XXIII ISPRS Congress (Prague, Czech Republic, July 12–19, 2016). 2016. P. 633–640.
- Corradetti A., Tavani S., Parente M., Iannace A., Vinci F., Pirmez C., Torrieri S., Giorgioni M., Pignalosa A., Mazzoli S. Distribution and arrest of vertical through-going joints in a reservoir-scale carbonate platform (Sorrento Peninsula, Italy): insight from integrating field survey and digital outcrop model // J. Struct. Geol. Vol. 108. 2018. P. 121–136. doi: 10.1016/j.jsg.2017.09.009
- García-Sellés D., Granado P., Muñoz J. A., Gratacos O., Carrera N., Arbues P. Capture and geological data extraction: tools for a better analysis and digital outcrop modelling // Vertical Geol. Conf., Switzerland, 5–7 February, 2014. University of Lausanne, 2014.
- Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle K. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008. P. 213–219.
- Hodgetts D. Comparison of digital outcrop and conventional data collection approaches for the characterization of naturally fractured reservoir analogues. // Geol. Soc. Spec. Publ. 2014. Vol. 374, no. 1. P. 51–77. doi: 10.1144/SP374.13EID:2-s2.0-84920469719
- Integrating digital and traditional field techniques using virtual reality geological studio (VRGS) 69<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2007: Securing The Future. Incorporating SPE EUROPEC 2007, 2007 // Conference paper EID: 2-s2.0-55849127395.
- Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys // Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W16, 2011. ISPRS Trento 2011 Workshop, 2–4 March 2011, Trento, Italy.
- Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling – adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. No. 76. P. 89–102.
- Nuttens T., Maeyer P., Wulf A., Goossens R., Stal C. Comparison of 3D accuracy of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry: an archeological case study // Remote Sensing and Geoinformation. EARSeL, 2011.
- Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J. A., Mazzoli S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in google earth via openplot and photscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran) // Comput. Geosci. Vol. 63. 2014. P. 44–53. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.013
- Ullman S. The interpretation of structure from motion // Proceed. Royal Society of London. 1979. B-203, P. 405–426.

Поступила в редакцию 04.05.2020

## References

Frolov A. Vidy lasernykh skanerov. Printsypy izmereniya [Types of laser scanners. Measurement principles]. NGKI. 3D Engineering Surveys. URL: [http://www.ngce.ru/pg\\_publications11.html](http://www.ngce.ru/pg_publications11.html) (accessed: 23.04.2020).

Khazov R. A., Sharov N. V., Isanina E. V. Glubinnoe stroenie i metallogeniya Priladozh'ya [Deep structure and metallogeny of Ladoga]. *Geol. i poleznye iskopayemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. Vol. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 55–74.

Stepanov K. I., Sanin D. M., Sanina G. N. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000 [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000]. 2<sup>nd</sup> Ed., Karelian Series, Sheets P-35-XXIV, P-36-XIX, Explanatory Note]. Moscow: MF VSEGEI, 2013. 231 p.

3gsm software&measurements. URL: <https://3gsm.at/produkte/> (accessed: 23.04.2020).

Bellian J. A., Kerans C., Jennette D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *J. Sediment. Res.* 2005. No. 75. P. 166–176.

Cabrelles M., Seguí A. E., Navarro S., Galcerá S., Portalés C., Lerma J. L. 3D photorealistic modelling of stone monuments by dense image matching. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symp., Newcastle upon Tyne, UK. 2010. P. 121–124.

Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user oriented HBIM. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLI-B5, XXIII ISPRS Congress (Prague, Czech Republic, July 12–19, 2016). 2016. P. 633–640.

Corradetti A., Tavani S., Parente M., Iannace A., Vinci F., Pirmez C., Torrieri S., Giorgioni M., Pignatola A., Mazzoli S. Distribution and arrest of vertical throughgoing joints in a reservoir-scale carbonate platform (Sorrento Peninsula, Italy): insight from integrating field survey and digital outcrop model. *J. Struct. Geol.* Vol. 108. 2018. P. 121–136. doi: 10.1016/j.jsg.2017.09.009

García-Sellés D., Granado P., Muñoz J. A., Gratacos O., Carrera N., Arbues P. Capture and geological data extraction: tools for a better analysis and digital

outcrop modeling. *Vertical Geol. Conf., Switzerland, 5–7 February, 2014*. University of Lausanne, 2014.

Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle K. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008. P. 213–219.

Hodgetts D. Comparison of digital outcrop and conventional data collection approaches for the characterization of naturally fractured reservoir analogues. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 2014. Vol. 374, no. 1. P. 51–77. doi: 10.1144/SP374.13EID:2-s2.0-84920469719

Integrating digital and traditional field techniques using virtual reality geological studio (VRGS) 69<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2007: Securing The Future. Incorporating SPE EUROPEC 2007, 2007. *Conference paper EID: 2-s2.0-55849127395*.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVIII-5/W16, 2011. ISPRS Trento 2011 Workshop, 2–4 March 2011, Trento, Italy.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling – adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. No. 76. P. 89–102.

Nuttens T., Maeyer P., Wulf A., Goossens R., Stal C. Comparison of 3D accuracy of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry: an archeological case study. *Remote Sensing and Geoinformation*. EARSeL, 2011.

Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J. A., Mazzoli S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in google earth via openplot and photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Comput. Geosci.* Vol. 63. 2014. P. 44–53. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.013

Ullman S. The interpretation of structure from motion. *Proceed. Royal Society of London*. 1979. B-203, P. 405–426.

Received May 04, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Шеков Виталий Александрович

заместитель директора по НИР, к. т. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: shekov@krc.karelia.ru  
тел.: +79217260273

## CONTRIBUTORS:

### Shekov, Vitaly

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: shekov@krc.karelia.ru  
tel.: +79217260273

**Иванов Андрей Алексеевич**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ivanov@krc.karelia.ru  
тел.: +79114015513

**Крылова Светлана Андреевна**

инженер-геолог  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: konfetka007@yandex.ru

**Ivanov, Andrey**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ivanov@krc.karelia.ru  
tel.: +79114015513

**Krylova, Svetlana**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: konfetka007@yandex.ru