

## Структура оперяющей трещиноватости и разрывов Ю-В части Кандалакшского грабена

Гордеев Н.А.<sup>1</sup>, Алексеева М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, gord@ifz.ru*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, maria\_alekseeva999@mail.ru*

**Аннотация.** Новейшая тектоническая история рассматриваемого региона имеет ряд неясных моментов. Так, например, структура трещиноватости Чупинского грабена и сопредельных структур имеет комплексное строение. В одинаковой мере проявлены диагональные и ортогональные системы трещиноватости.

Для выяснения неотектонической истории региона – в период с 2019 по 2021 гг. был собран представительный геологический материал (зеркала скольжения, трещины, жилы и др.), обработаны космические снимки и цифровые модели рельефа. В результате обработки рядом тектонофизических методов (структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим (SimSGM – (Гордеев, 2019; Молчанов 2021), метод катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого, структурно-парагенетический метод Л.М. Расцветаева (Ребецкий, 2017)) различных стресс-индикаторов, измеренных на острове Сидоров, удалось установить, что трещиноватость в области Керетского архипелага развивается с большим количеством сдвигов и растяжений в геодинамическом плане. Мы предполагаем, что из-за наведенных сжатий со стороны Кандалакшского грабена последовало поперечное сдавливание структур Керетского архипелага, что порождает сопутствующее растяжение Чупинского грабена. Блочное строение о.Сидоров говорит о множественных нарушениях, связанных, как с субширотным сжатием, так и с субмеридиональным, это объясняется наличием крестообразного деления острова на четыре крупных блока (Гордеев, Клоков, Стрельников, 2021). Возможно, что на неотектонический этап имело место переиндексирование осей.

**Ключевые слова:** трещиноватость, зеркала скольжения, геодинамический анализ, тектонофизический анализ, Кандалакшский грабен.

## The structure of the feather fracturing and faults of the southeastern part of the Kandalaksha graben

Gordeev N.A.<sup>1</sup>, Alekseeva M.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, gord@ifz.ru*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, maria\_alekseeva999@mail.ru*

**Abstract.** The neotectonic history of the region under consideration has a number of unclear moments. Thus, for example, the fracture structure of the Chupa graben and adjacent structures has a complex structure. Diagonal and orthogonal fracture systems are equally pronounced. However, the manifestation of separate groups of fracturing is typical for the southern coast of the White Sea. What is the reason for such an extensive manifestation remains to be seen. To clarify the neotectonic history of the region, in the period from 2019 to 2021 some representative geological material was collected (glide planes, cracks, veins, etc.), satellite images and digital elevation models have been processed. As a result of processing by a number of tectonophysical methods (structural-geomorphological method of L.A. Sim (SimSGM - (Molchanov, 2021), cataclastic analysis method of Yu.L. Rebetsky, structural-paragenetic method of L.M. Rastsvetaev (Rebetsky, 2017)) of various stress indicators measured on Sidorov Island. It was found that fracturing in the area of the Keret archipelago develops with a large number of shifts and extensions in geodynamic terms. We assume that due to induced compression from the Kandalaksha graben, transverse compression of the Keret structures followed. It generates the companion process of the Chupa graben extension. The block structure of Sidorov Island indicates multiple disturbances associated with both sublatitudinal and submeridional compression. This is due to the presence of a cruciform division of the island into four large blocks (Gordeev, Klokov, Strelnikov, 2021). It is possible that re-indexing of the axes took place at the neotectonic stage.

**Keywords:** fracturing, glide planes, geodynamic analysis, tectonophysical analysis, Kandalaksha graben.

### Введение

Район исследования расположен недалеко от поселка городского типа Чупа. На востоке Карелии, южном побережье Белого моря.

В период с 2019 по 2021 гг. группой ИФЗ РАН проведены полевые работы на территории Керетского архипелага и в районе Хетоламбинского массива. Собран представительный тектонофизический и геологический материалы, насчитывающие около 1500 различных замеров пространственной ориентировки зеркал скольжения, трещин, жил и др.

Предпринята попытка предварительной интерпретации полученных результатов с целью установить общее поле напряжения, которое привело к формированию видимой трещиноватости.

Исследуемая территория находится в пределах метаморфического комплекса, состоящего из Лоухского и Хетоламбинского подкомплексов, простирающихся в С-З направлении. Породы представлены биотитовыми гнейсами, гранито-гнейсами, редкими амфиболитами Беломорской серии, архейской группы. Небольшие структуры сложены плагио-микроклиновыми гранитами, частью плагиоклазовыми гранитами и гранодиоритами, габбро-анортозитами, габбро-норитами, габбро, габбро-амфиболитами и амфиболитами.

Район разбит крупными предполагаемыми разрывами с субширотной и С-З ориентировками (ГТК, 1959) (рис. 1) которые представляют собой виргирующее окончание от растущего Чупинского грабена, по представлению авторов.

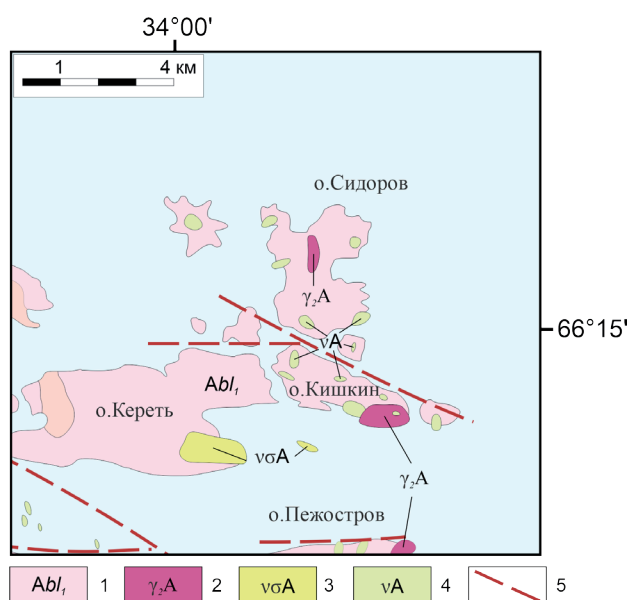


Рис. 1. Геологическая карта Керетского архипелага (по ГТК, 1959) с упрощениями.

1 – Архейская группа, Беломорская серия, нижняя (Керетьская) толща. Биотитовые гнейсы и гранито-гнейсы, редко амфиболиты; 2 – плагио-микроклиновые граниты, частью плагиоклазовые граниты и гранодиориты; 3 – габбро-анортозиты, амфиболиты; 4 – габбро-нориты, габбро, габбро-амфиболиты, амфиболиты; 5 – предполагаемые разломы.

Fig. 1. Geological map of the Keret archipelago (after State Geological Map, 1959) with simplifications. 1 – Archaean group, Belomorian series, lower (Keret) sequence. Biotite gneisses and granite-gneisses, rarely amphibolites; 2 – plagioclase granites, partly plagioclase granites and granodiorites; 3 – gabbro-anorthosites, amphibolites; 4 – gabbro-norites, gabbro, gabbro-amphibolites, amphibolites; 5 – supposed faults.

### Методика и данные

Исходными данными для исследования являются замеры пространственной ориентировки геологических индикаторов деформаций (зеркала скольжения, отрывы, жилы, дайки, зоны дробления и трещины, полученные с помощью геологического компаса непосредственно при полевом изучении различных обнажений. Пространственная ориентировка геологических индикаторов деформаций описывается элементами залегания (азимут падения и угол падения), по которым однозначно определяется их положение в пространстве. Наиболее информативными индикаторами стресса можно считать зеркала скольжения – гладкие (приглаженные) поверхности, возникшие при трении скользящих по разрыву пород (Корсаков, 2009). Гладкая, иногда блестящая поверхность образуется за счет того, что поверхность сместителя покрывается тонким налетом мягких минералов, которые образуются при трении за счет процессов фрикционного разогрева (Соболев и др., 2015). Борозды скольжения образуются в том случае, когда на поверхность сместителя попадают зерна твердых минералов, которые при перемещении оставляют на поверхности царапины.

В 2019 и 2021 годах в ходе комплексной экспедиции сотрудников ИФЗ РАН, была изучена часть территории южного берега Кандалакшского залива, а именно в район поселка Чупа, Малинов-вая Варакка и на Керетский архипелаг, подробно изучен остров Сидоров, а также о-ва Пежостров, Кереть, Кишкин.

Изучение тектонических напряжений проводилось с помощью метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого (Ребецкий и др., 2017). Для расчета использовалась программа STRESSgeol. Метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений и форма эллипсоида деформаций.

Структурно-парагенетический метод применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) (Расцветаев, 1987). Малые разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, жилы и другие, используемые в данном методе геологические стресс-индикаторы, несут информацию о разных этапах деформирования. В результате внесения пространственных ориентировок дизъюнктивов на стереограмму оператором выделяются геомеханические семейства дизъюнктивов, которые сформировались (или активизировались) и удовлетворяют единому тектоническому событию. Разделение на разные этапы производится по выделению разных семейств, каждое из которых может быть сформировано только в одном тектоническом событии. Для данного метода реконструкция положения главных осей напряжения возможна лишь в горизонтальной плоскости, без учета вертикальной составляющей.

Анализ ориентировок плоскостей трещиноватости производился в программе Stereonet. В качестве входных данных использовались ориентировки полюсов плоскостей трещиноватости – азимут и угол падения. Выходными данными являются максимумы плотности полюсов и розы диаграммы распределения ориентировок трещин (все данные взяты по полюсам трещин). Эти данные позволяют проводить качественный анализ распределения трещиноватости и выявления трендов ее развития для установления парагенетических связей с региональными структурами.

### **Результаты**

Всего на острове изучено 5 крупных обнаженных полигонов 150\*150 м (рис. 2, а-д). В пределах этих полигонов выявлены структуры сдвигового (рис. 2, треугольники желтые, зеленые) и сбросового (рис. 2, синий квадрат) характеров. На эту же территорию проведено дешифрирование космо-снимка (рис. 2), результаты анализа суммарных (по длине в пропорциях снимка (пиксели)) вкладов по разрывам, трещинам и линеаментам (рис. 3). Большинство из дешифрированных объектов подтверждено в полевых условиях.

Многие из найденных разрывов сопровождаются зонами активной трещиноватости и формированием зеркал скольжения сдвигового типа. Часто зеркала встречаются по минеральным корочкам, нередко это эпидот, который пронизывает гнейсы жилами, мощностью от первых мм до первых см. Попадает в виде заполнителя трещин, по которым происходили повторные смещения уже после заполнения. Выделяются зеркала скольжения неминерализованные, где остаются только механические знаки смещения блоков.

Измеренные стресс-индикаторы (зеркала скольжения, трещины) были проанализированы в stereonet (рис. 4). Заметно, что по крупному разрыву север-западной ориентировки свойственно (рис. 3, 4 а) интенсивное растрескивание плоскостями СВВ простирания, при разносторонней фоновой трещиноватости. Чего нельзя сказать о точках (рис. 3, 4 б, в, г), здесь наблюдается субширотно-субвертикальный максимум трещин, что подтверждается и дешифрированием космоснимка, чуть менее выражена трещиноватость СЗ простирания. В точке (д) выражена обширная трещиноватость и в ортогональной и в диагональной системах.

Реконструкции МКА и структурно-парагенетическим (СП) методами в целом похожи, но стоит подробнее остановиться на результатах второго метода (СП) (рис. 2). Все реконструкции привязаны к реактивизированным нарушениям. Потому что наблюдаются сдвиговые нарушения, как по жилам, так и по повторным штриховкам зеркал скольжения (когда по одной плоскости видны секущие друг друга штриховки). Сохранность повторной штриховки выше, чем первичной, что обуславливает явление реактивизации. Разрывы СВ-ЮЗ простирания образовались в условиях сжатия СВ-ЮЗ простирания (данный вывод несет обобщенный характер, в частности углы сжатий ориенти-

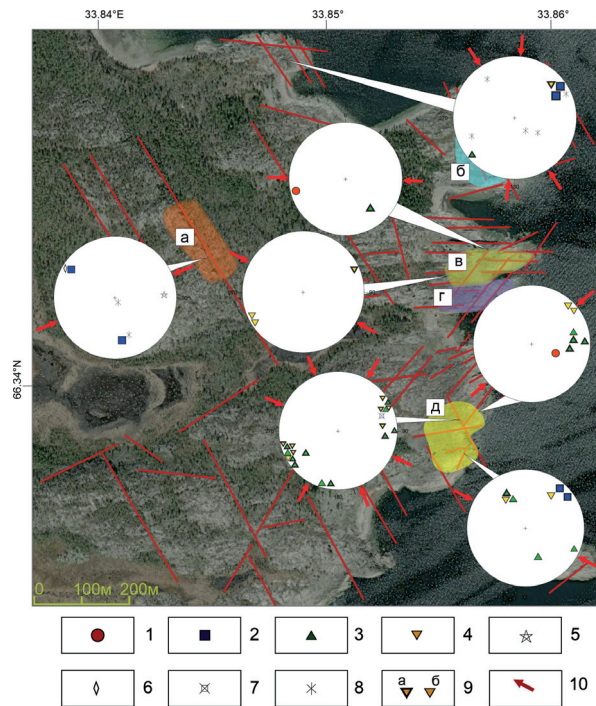


Рис. 2. Результаты реконструкции на район Керетского архипелага структурно-парагенетическим методом. 1-6 – полюса плоскостей зеркал скольжения: 1 – взбросовой кинематики, 2 – сбросовой кинематики, 3 – праводвиговой кинематики, 4 – леводвиговой кинематики, 5 – неопределенной кинематики с вертикальным смещением; 6 – неопределенной кинематики с горизонтальным смещением; 7 – отрывные структуры; 8 – жилы; 9 – степень достоверности замера зеркала скольжения: а – высокая, б – низкая; 10 – ориентировка оси максимального сжатия, реконструированная структурно-парагенетическим методом; красные линии – разломы и трещины о.Сидоров (по результатам дешифрирования); а-д – измерения трещиноватости в обнажениях.

Fig. 2. Results of reconstruction for the area of the Keret archipelago by the structural-para-genetic method. 1-6 – poles of glide planes: 1 – reverse kinematics, 2 – fault kinematics, 3 – right shear kinematics, 4 – left shear kinematics, 5 – indefinite kinematics with vertical displacement; 6 – indefinite kinematics with horizontal displacement; 7 – detachable structures; 8 – veins; 9 – degree of measurement reliability of a glide plane: a – high, b – low; 10 – orientation of the axis of maximum compression, reconstructed by the structural-para-genetic method; red lines – faults and cracks of Sidorov Island (according to the results of interpretation); a-e (a, б, в, г, д) – measurements of cracks in situ.

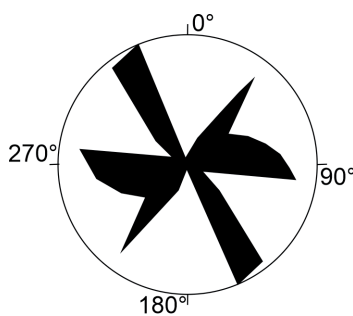


Рис. 3. Роза-диаграмма разрывных нарушений и трещин, дешифрированных по космоснимку о.Сидоров.

Fig. 3. Rose-diagram of faults and cracks deciphered from the satellite image of Sidorov Island.

рованы в диапазоне 15–60 ° к плоскости разрывов), для разрывов СЗ-ЮВ простирания – субпараллельные сжатия (СЗ-ЮВ простирания, где в частности угол варьирует в том же диапазоне 15–60 °). Та же зависимость свойственна и для ортогональной системы разрывов.

Выявленные закономерности распределения крупных разрывов, зон трещиноватости и тектонофизических реконструкций подводит к тому, что для всего неотектонического этапа свойственно глобальное субширотное сжатие, по которому сформировался тренд на диагональную систему сдвигов, и секущие их субширотные сдвиги. Значительно расширены представления, полученные по результатам полевых исследований 2019 года (Гордеев, 2021).



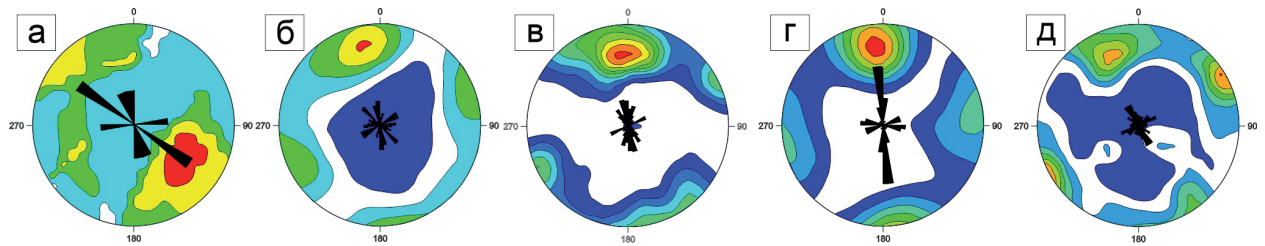


Рис. 4. Стереогаммы распределения плотностей полюсов измеренных геологических стресс-индикаторов в обнажениях.

Fig. 4. Stereograms of the density of the poles of measured geological stress indicators in situ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

### Литература

1. Гордеев Н.А., Клоков И.А., Стрельников А.А. Результаты обработки геологических стресс-индикаторов для доголоценовых землетрясений Кандалакшского района // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 124–129.
2. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.
3. Государственная геологическая карта: Q-36-XV. Геологическая карта СССР. Карельская серия, масштаб: 1:200000, серия: Карельская, составлена: Северо-Западное геологическое управление, 1959 г., редактор(ы): Шуркин К.А.
4. Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 301–304.
5. Корсаков А.К. Структурная геология. М. Изд-во: КДУ. 2009. 328 с.
6. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М. Изд-во: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.
7. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М. Изд-во: ГЕОС. 2017. 225 с.
8. Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Иванова Л.А. Исследование нанокристаллов и механизм образования зеркала скольжения // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 3–14.