

УДК 553.078.2:553.91 (470.22)

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ГРАФИТА КИМАЯКИ (КАРЕЛИЯ, СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

**А. М. Ручьев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Вскрытое старинной горной выработкой рудное тело графитового проявления Кимамяки представляет собой зону интенсивного рассланцевания и карбонизации метавулканитов сортавальской серии нижнего протерозоя. С использованием тектонофизических методов выявлены сдвиговые по своей физической сущности многочисленные парагенезисы субплоскостных структурных элементов (ПССЭ). Их наличие – неопровержимый аргумент деформационной сдвиговой природы рудоконтролирующей структуры. Идентифицированные ПССЭ формировались в различных деформационных режимах и, судя по вариативности величин угла скалывания, в изменчивых термодинамических условиях. Это свидетельствует о длительности и прерывистости развития рудоконтролирующей структуры в изменявшихся во времени тектонических обстановках. Сходство ПССЭ, выявленных на рудопроявлении Кимамяки и в породах раннеорогенного кааламского клинопироксенит-габбронорит-диоритового комплекса (возраст не более 1,9 млрд лет), интродуцировавших отложения сортавальской и ладожской серий нижнего протерозоя, указывает на посткалевийское время заложения рудоконтролирующей структуры и формирование ее в свекофеннский (1,95–1,85 млрд лет назад) и, возможно, постсвекофеннский (1,8–1,7 млрд лет назад) периоды тектоно-метаморфической переработки. Многократная активизация большинства субплоскостных элементов анизотропии горных пород, изменения их минерального состава, прежде всего интенсивная графитизация в зоне сдвиговых дислокаций, свидетельствуют о высокой флюидопроницаемости рудоконтролирующей структуры и ее фидерной роли. Изотопный состав углерода из графитов Приладожья позволяет предполагать его эндогенную природу, мантийный источник и минерагенез графита в результате пиролиза ювенильного водородно-метанового флюида. Особенности строения и развития изученной рудоконтролирующей структуры, ее эпигенетичность по отношению к вмещающим горным породам, соответствующий мантийному изотопный состав углерода графитов указывают, что главными факторами, определявшими дискретную локализацию графита в гетерогенных геологических образованиях Северо-Ладожской структурно-фациальной зоны, были процессы сдвиговой деформации и флюидной карбонизации.

Ключевые слова: деформация; сдвиговая зона; тектонофизический анализ; парагенезис структурных элементов; графит

Для цитирования: Ручьев А. М. Структурные особенности рудопроявления графита Кимамяки (Карелия, Северное Приладожье) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 73–91. doi: 10.17076/geo2134

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение НИР Института геологии КарНЦ РАН по теме № 216 с государственным регистрационным № 1022040400124-6-1.5.5.

## **A. M. Ruchyov. STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE KIMAMYAKI GRAPHITE ORE OCCURRENCE (KARELIA, NORTHERN LADOGA REGION)**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

The ore body of the Kimamyaki graphite occurrence, exposed by an old mine working, is a zone of intense shearing and carbonization of the Lower Proterozoic Sortavala series metavolcanics. Application of tectonophysical methods revealed numerous shear-type parageneses of subplanar structural elements (PSSEs). Their presence convincingly proves that the ore-controlling structure was shaped by deformational shear. The PSSEs were formed under various deformation regimes and, judging by the variability of shear angle values, under variable thermodynamic conditions. This indicates that the ore-controlling structure was developing with interruptions over a prolonged period, with the tectonic settings changing over time. The similarity between the PSSEs at the Kimamyaki ore occurrence and in the early orogenic rocks of the Kaalama clinopyroxenite-gabbro-diorite complex (not older than 1.9 Ga) intruding the Lower Proterozoic Sortavala and Ladoga series deposits suggests the ore-controlling structure was initiated in the post-Kalevi time and formed in the Svecofennian (1.95–1.85 Ga BP) and, possibly, post-Svecofennian (1.8–1.7 Ga BP) periods of tectono-metamorphic reworking. The multiple activation of most subplanar anisotropy elements of the rocks, changes in their mineral composition, and, above all, intense graphitization in the shear dislocation zone indicate a high fluid permeability of the ore-controlling structure and its feeder role. The isotopic composition of carbon from the Ladoga graphites points to its endogenous origin, mantle source and graphite mineralogenesis through pyrolysis of juvenile hydrogen-methane fluid. The structural and developmental features of the ore-controlling structure, its being epigenetic from the host rocks, and the isotopic composition of carbon in the graphites corresponding to that of the mantle suggest that the main factors responsible for the discrete localization of graphite in heterogeneous geological formations of the North Ladoga structural-facies zone were shear deformation and fluid carbonization.

**Keywords:** deformation; shear zone; tectonophysical analysis; paragenesis of structural elements; graphite

**For citation:** Ruchyov A. M. Structural characteristics of the Kimamyaki graphite ore occurrence (Karelia, Northern Ladoga region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 73–91. doi: 10.17076/geo2134

**Funding.** The study was funded from the federal budget under state assignment to the Institute of Geology of the Karelian Research Centre RAS within the research theme #216 (state ID 1022040400124-6-1.5.5).

### **Введение**

Природный графит используется во многих отраслях современной промышленности и является критически важным стратегическим сырьем [Бортников и др., 2016; Распоряжение..., 2022]. Прогнозируемый рост потребления ископаемого графита делает актуальными мероприятия по увеличению его минерально-сырьевой базы. В России в период 2020–2022 гг.

балансовые запасы графита уменьшались и по состоянию на 01.01.2023 г. составляли 101 млн т; забалансовые – 2,8 млн т. При этом только 19,5 % балансовых запасов обеспечивалось наиболее ценными чешуйчатыми рудами. Приращение их запасов возможно при проведении целенаправленных геологоразведочных работ (ГРП) в пяти графиторудных провинциях с ресурсным потенциалом ( $P_1 + P_2$ ) чешуйчатого графита ~ 51,3 млн т [Государственный..., 2024].

В Карело-Кольской провинции, на территории Республики Карелия (РК), известны многочисленные пункты минерализации и рудопроявления графита, сосредоточенные преимущественно в Северном Приладожье. В Лахденпохском муниципальном районе поисково-оценочными работами 1983–1995 годов выявлены: Ихальское месторождение крупно-, среднечешуйчатого графита с запасами категории  $C_2$  2448,1 тыс. т и прогнозными ресурсами ( $P_1+P_2$ ) ~ 3,8 млн т на участке III, а также не менее девяти рудопроявлений (относящиеся к Ихальскому месторождению участки I–VIII и др.) с суммарными ресурсами ( $P_1+P_2$ ) ~ 10,4 млн т [Минерально-сырьевая..., 2006, табл. 2.3.2.5]. ГРП на участках Ихальского месторождения возобновлены в 2014 году.

В Сортавальском муниципальном районе на трех участках Кирьяволахтинской площади (14,64 км<sup>2</sup>) в 2022–2024 годах проводились поисковые работы с целью локализации прогнозных ресурсов ( $P_1+P_2$ ) крупнечешуйчатого графита в количестве не менее 2 млн т [Государственный..., 2024]. В результате лишь на двух участках, Сортавальском и Рюттю, удалось выявить рудные объекты и оценить прогнозные ресурсы графита в количестве: по категории  $P_1$  ~ 0,32 млн т, по категории  $P_2$  ~ 0,50 млн т [Куличенко и др., 2024]. Несоответствие достигнутых результатов запланированным, возможно, стало следствием сложившихся представлений о биогенной природе углеродистого вещества (УВ) и доминировании литологических и стратиграфических факторов контроля его пространственного распределения.

Рассматриваемые далее материалы изучения структуры одного из графиторудных объектов Сортавальского участка свидетельствуют о важной роли тектоноструктурного фактора локализации графита и наиболее вероятном эндогенном источнике углерода.

### **Объект исследований и его геологическая позиция**

В Северном Приладожье естественные обнажения пород с большим содержанием графита редки [Бискэ, 1987, с. 22], поэтому при изучении рудных тел целесообразно использовать известные старинные горные выработки. Одна из них – расположенная в границах Сортавальского поискового участка у подножия крутого юго-западного склона возвышенности Кимамяки одноименная каменоломня (рис. 1), в которой с 1834 года было добыто около 450 т графитового сырья [Борисов, 2009]. Объект тектонофизических исследований –

зона интенсивно рассланцованных карбонизированных пород, часть которых, вероятно наиболее богатая графитом, была извлечена из карьера (длина ~ 20–25 м, ширина ~ 6–7 м, глубина врезки ~ 4–5 м) северо-западного направления (~330°) с GPS(WGS-84)-координатами ( $\pm 6$  м) юго-восточной оконечности 61°45'52.8" с. ш. 30°31'59.9" в. д. (рис. 1). В ходе ГРП 2022–2024 гг. на этом проявлении графита продолжение вскрытого карьером рудного тела в глубину и по простиранию подтверждено бурением [Куличенко и др., 2024].

Геологическая позиция графитового проявления Кимамяки определяется его положением в Сортавальской подзоне Северо-Ладожской структурно-формационной зоны (СФЗ), между Йокирантским (на западе) и Сортавальским (на востоке) выступами архейского фундамента, в северной оконечности разделяющей их и прослеживающейся в юго-восточном направлении полосы супракрустальных пород нерасчлененных питкьярантской и кирьяволахтинской свит сортавальской серии: амфибол-биотитовых сланцев по базальтам и их туфам, углеродсодержащих биотитовых филлитовидных сланцев, линз мраморов, прослоев метаморфизованных трахиандезитов, актинолитовых сланцев по коматиитам (рис. 1). Предполагается, что отложения кирьяволахтинской свиты сформировались при континентальном рифтогенезе [Государственная..., 2013].

Судя по обнажениям на юго-западном склоне возвышенности Кимамяки, вмещающими для рудного тела служат массивные макроскопически безграфитовые метабазаальты, само же оно сложено изменчивыми по минеральному составу преимущественно хлорит-мусковитовыми, хлорит-биотит-мусковитовыми сланцами с высоким содержанием УВ, кварца и участковой сульфидной, а также карбонатной (сегрегации, жилки) минерализацией.

### **Фактический материал, методика и результаты его обработки**

При полевых исследованиях графитового проявления Кимамяки с целью получения информации о внутреннем строении зоны карбонизации горных пород в карьере выполнены замеры элементов залегания сланцеватости, кливажа, жильных минеральных обособлений (рис. 2, а). Их пространственная ориентировка определена с помощью горного компаса ГК-2 измерениями на отпрепарированных поверхностях или рассчитана по угловым координатам не менее двух линий пересечения рельефа обнажения структурной плоскостью.

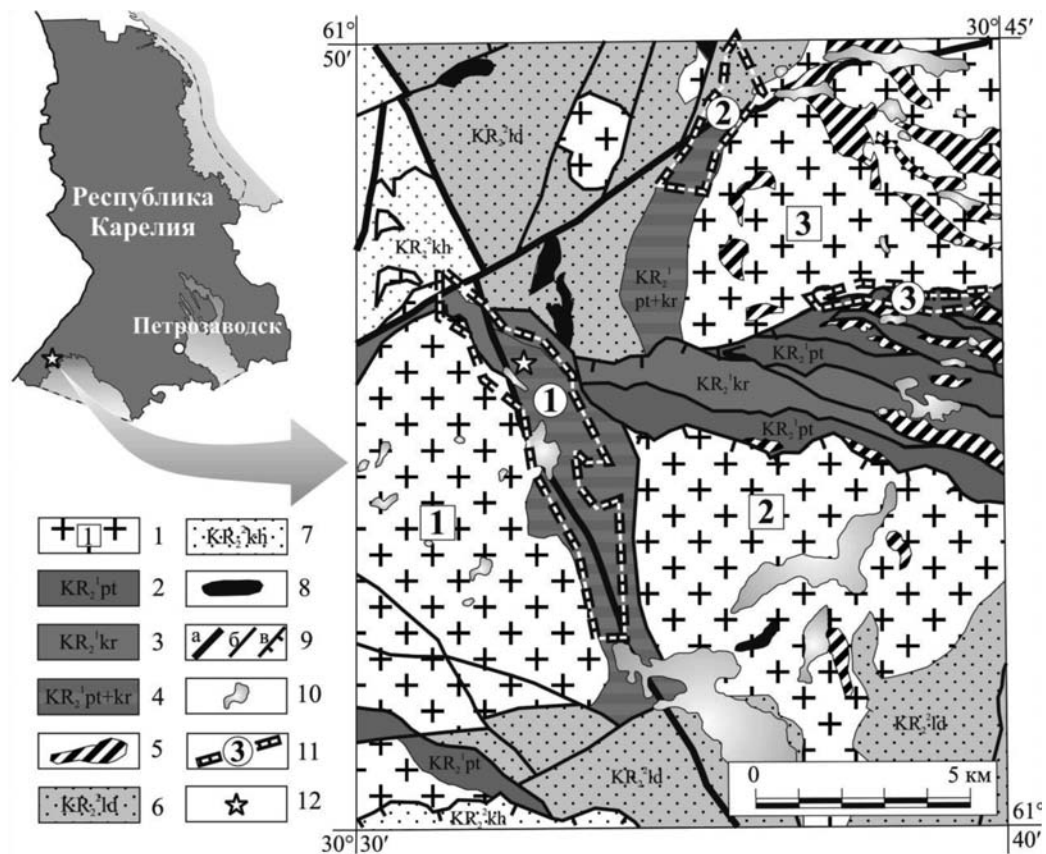


Рис. 1. Геологическая схема окрестностей графитового проявления Кимамяки и участков ГРП 2022–2024 годов (по: [Государственная..., 2013] с упрощением):

1 – блоки архейского гранитоидного фундамента: Йокирантский (1), Сортавальский (2), Кирьявалахтинский (3); людиковский структурный ярус: 2 – питкярантская свита (метаморфизованные базальты и их туфы, скарны, мраморы, песчаники); 3 – кирьявалахтинская свита (метаморфизованные базальты, трахиандезиты, биотит-амфиболовые, биотитовые углеродсодержащие, актинолитовые по коматиитам сланцы, мраморы); 4 – питкярантская и кирьявалахтинская свиты нерасчлененные; 5 – силлово-дайковый комплекс (метаморфизованные габбродолериты, габбро, долериты, коматииты); калевийский структурный ярус: 6 – ладожская серия (метаморфизованные переслаивающиеся алевролиты и песчаники, гравелиты); 7 – кархуланмякская толща (ритмичное переслаивание биотитовых, гранат-биотитовых гнейсов и метапесчаников); 8 – габбронориты, габбродиориты кааламского комплекса; 9 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б), надвиги (в); 10 – озера; 11 – границы и номера поисково-оценочных участков: Сортавальский (1), Рюттю (2), Кирьявалахтинский (3); 12 – местоположение каменоломни Кимамяки

Fig. 1. Geological map of the vicinity of the Kimamäki graphite occurrence and geological survey sites in 2022–2024 (according to: [Stepanov et al., 2013] with simplicity):

1 – blocks of the Archean granitoid basement: Iokiranta (1), Sortavala (2), Kirjvalakhtinsky (3); Ludicovian structural stage: 2 – Pitkyaranta suite (metamorphosed basalts and their tufts, skarns, marbles, sandstones); 3 – Kirjvalakhtinskaya suite (metamorphosed basalts, trachyandesites, biotite-amphibole, biotite graphite-bearing, actinolite schists after komatiites, marbles); 4 – undifferentiated Pitkyaranta and Kirjvalakhtinskaya suites; 5 – sill-dyke complex (metamorphosed gabbro-dolerites, gabbro, dolerites, komatiites); Kalevian structural stage: 6 – Ladoga series (metamorphosed alternating siltstones and sandstones, gravelites); 7 – Karhulanmäk sequence (rhythmic alternation of biotite, garnet-biotite gneisses and metasandstones); 8 – gabbro-norites, gabbro-diorites of the Kaalama complex; 9 – faults: major (a), minor (b), thrusts (c); 10 – lakes; 11 – boundaries and numbers of exploration and evaluation areas: Sortavala (1), Ryttyu (2), Kirjvalakhtinsky (3); 12 – location of the Kimamäki quarry

При обработке фактического материала использован метод выделения парагенезисов сдвиговых структурных элементов (ПССЭ), их идентификации и решения обратной тектонофизической задачи подбором адекватного модельного парагенезиса [Ручьев, 2012б

и ссылки в ней]. Этот метод, как и его прототип, метод усредненных характеристик [Гинтов, Исай, 1988] или структурных парагенезисов [Гинтов, 2005], основан на представлениях о пространственной ориентировке элементов идеализированного сдвигового структурного

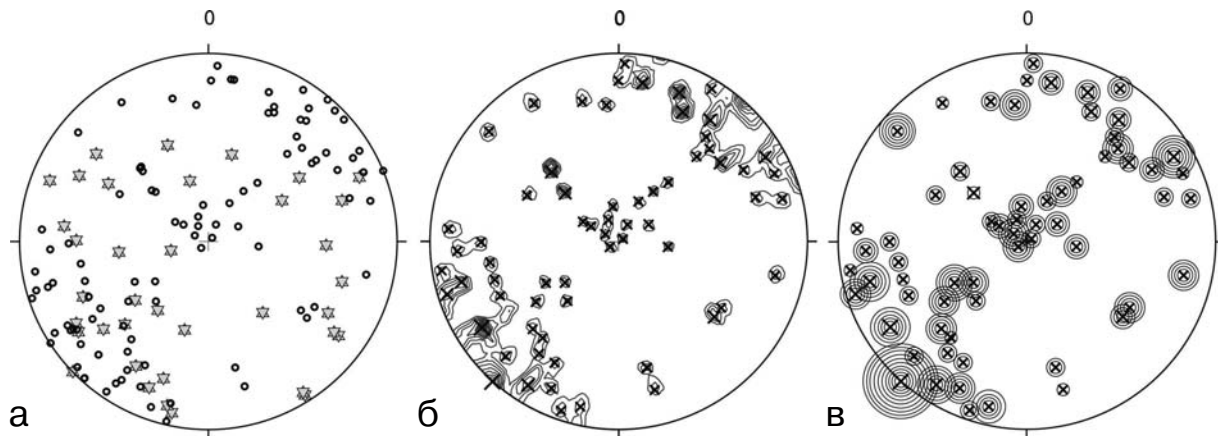


Рис. 2. Пространственная ориентировка структурных элементов горных пород в карьере графитового проявления Кимамяки:

а – гномостереографические проекции 99 плоскостей сланцеватости и кливажа графитизированных пород (кружки), а также 39 плоскостей главного смещения (L) в зонах сдвиговой деформации интрузивных пород Кааламского клинопироксенит-габбронорит-диоритового комплекса (звездочки); б –  $\pi S$ -диаграмма 99 плоскостей сланцеватости и кливажа пород, изолинии значений функции распределения – 2,6-5,2-...-26, косые кресты – статистические максимумы (табл. 1); в – гномостереографические проекции статистических плоскостей (косые кресты), число концентрических кругов вокруг них равно числу сдвиговых парагенезисов, в которых участвуют плоскости, и на единицу больше числа фаз тектонической активизации этих плоскостей; здесь и на рис. 3 и 4: равноугольная стереографическая проекция, верхняя полусфера

Fig. 2. Spatial orientation of structural elements of rocks in the quarry of the Kimamäki graphite occurrence:

а – gnomostereographic projections of 99 foliation and cleavage planes of graphitized rocks (circles), as well as 39 planes of main displacement (L) in the shear deformation zones of intrusive rocks of the Kaalama clinopyroxenite-gabbro-norite-diorite complex (asterisks); б –  $\pi S$ -diagram of 99 foliation and cleavage planes of rocks, isolines of the distribution function values – 2.6-5.2-...-26, oblique crosses – statistical maxima (Table 1); в – gnomostereographic projections of statistical planes (oblique crosses), the number of concentric circles around them is equal to the number of shear parageneses in which the planes participate, and is one unit greater than the number of phases of tectonic activation of these planes; here and in Fig. 3 and 4: isogonal stereographic projection, upper hemisphere

парагенезиса (ИССП), описываемых тектоно-физической моделью средней части зоны скалывания: антитетические ( $R'$ ) и синтетические ( $R$ ) сколы Риделя ориентированы под углом скалывания ( $\alpha_0$ ) к оси максимального главного напряжения  $\sigma_1$ , расположены с разных сторон от этой оси и под углом соответственно  $\pi/4 + \alpha_0$  и  $\pi/4 - \alpha_0$  к плоскости генерального смещения, отклоняясь от нее при правом сдвиге вправо, при левом – влево; синтетические  $R$ -сколы ориентированы под углом  $\alpha_0$  к оси минимального главного нормального напряжения  $\sigma_3$  и под углом  $\pi/4 - \alpha_0$  к плоскости генерального смещения, располагаются зеркально-симметрично к плоскости  $R$ -сколов; Т – трещины отрыва – перпендикулярны оси  $\sigma_3$  и компланарны оси  $\sigma_1$ , ориентированы под углом  $\pi/4$  к плоскости генерального смещения, отклоняясь от нее при правом сдвиге вправо, при левом – влево; синтетические  $L$ -сколы параллельны плоскости генерального смещения в зоне скалывания; плоскостные элементы структурного парагенезиса пересекаются по линиям, параллельным оси  $\sigma_2$ ;  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

Применимость модели к докембрийским образованиям, известным на территории РК, подтверждена результатами изучения структурно-текстурных особенностей тектонически деформированных разнообразных горных пород. Установлено, что специфика их субплоскостной анизотропии обусловлена наличием многочисленных групп (систем) закономерно взаимоориентированных трех-пяти структурных элементов (дифференционной полосчатости, сланцеватости, кливажа), статистические угловые соотношения которых обычно с точностью до градуса соответствуют угловым соотношениям плоскостей ИССП [Ручьев, 2009–2012а, б, 2022 и др.]. Следовательно, тектонофизическая модель средней части зоны скалывания адекватно отражает объективные особенности пространственной ориентировки субплоскостных структурных элементов в их природных системах и дает возможность обоснованно выделять парагенезисы.

Метод универсально применим для изучения структуры всех морфотипов сдвиговых дислокаций. Он позволяет выявлять ПССЭ,

идентифицировать их, вычислять угол скалывания горных пород в природных условиях тектонической деформации, реконструировать пространственную ориентировку потенциальных (не наблюдавшихся) структурных элементов и осей главных нормальных напряжений. Используя массивы данных о ПССЭ, можно сравнивать условия структурообразования в различных геологических объектах [Ручьев, 2011, 2022].

При построении диаграмм, статистическом геометрическом анализе пространственной ориентировки структурных элементов горных пород, моделировании парагенезисов использовалась компьютерная программа StereoNet Version 2.02 (автор – J. P. Duyster, 1997). По  $\pi\Sigma$ -диаграмме (рис. 2, б), построенной в режиме максимальной детальности (cosine exponent – 1000, Grid Resolution – 30), определена ориентировка статистических плоскостей (табл. 1).

Для определения деформационных режимов, соответствовавших условиям образования ПССЭ, применялись диаграммы, отражающие связь морфолого-кинематических характеристик дизъюнктивных нарушений с величиной наклонов осей главных нормальных напряжений к горизонту [Гинтов, 2005, рис. 1.68].

Информация, необходимая и достаточная для описания ПССЭ, дается в виде формул. Формула парагенезиса, например  $348\angle 59,9/\text{ЮЗ} < 345,1\angle 4,9\{R'RL\}33-2$ , характеризует: 1) элементы залегания плоскости главного смещения L (реконструируемые выделяются курсивом) – азимут линии ее простирания, угол и направление падения –  $348\angle 59,9/\text{ЮЗ}$ ; 2) характер сдвига: < – левый, > – правый; 3) азимут и угол падения линии пересечения парагенетичных плоскостных структурных элементов, являющейся также линией действия промежуточного напряжения  $\sigma_2$  –  $345,1\angle 4,9$ ;

Таблица 1. Пространственная ориентировка статистических плоскостей

Table 1. Spatial orientation of statistical planes

№ No.	Элементы залегания статистической плоскости* Elements of the statistical plane*	F	№ No.	Элементы залегания статистической плоскости Elements of the statistical plane	F	№ No.	Элементы залегания статистической плоскости Elements of the statistical plane	F
1	<b><u>327,7<math>\angle</math>81/ЮЗ</u></b>	26,2	24	34,6 $\angle$ 84,1/СЗ	8,2	47	81,2 $\angle$ 21,31/СЗ	7,5
2	<b><u>311,9<math>\angle</math>89,9/ЮЗ</u></b>	22,0	25	350,8 $\angle$ 68,9/ЮЗ	8,1	48	297,5 $\angle$ 72/ЮЗ	7,5
3	<b><u>296,4<math>\angle</math>75,2/СВ</u></b>	19,0	26	330,1 $\angle$ 47,6/ЮЗ	8,1	49	314,4 $\angle$ 80,9/ЮЗ	7,5
4	<b><u>292,2<math>\angle</math>81,1/СВ</u></b>	17,8	27	305,1 $\angle$ 72/ЮЗ	7,9	50	323,7 $\angle$ 56,9/ЮЗ	7,3
5	<b><u>46,6<math>\angle</math>54,3/СЗ</u></b>	17,7	28	327,3 $\angle$ 6,1/ЮЗ	7,8	51	30,5 $\angle$ 9/СЗ	7,3
6	<b><u>278,8<math>\angle</math>81/СВ</u></b>	14,5	29	301,4 $\angle$ 87,1/СВ	7,8	52	350,6 $\angle$ 86,9/ЮЗ	7,2
7	<b><u>307<math>\angle</math>78/СВ</u></b>	13,3	30	270,1 $\angle$ 81,1/СВ	7,8	53	29,9 $\angle$ 18,8/СЗ	7,2
8	<b><u>302,1<math>\angle</math>83,9/ЮЗ</u></b>	13,3	31	282,8 $\angle$ 84/ЮЗ	7,8	54	328 $\angle$ 6/ЮЗ	7,0
9	<b><u>42,8<math>\angle</math>41,7/СЗ</u></b>	13,3	32	77 $\angle$ 69/ЮВ	7,8	55	310,2 $\angle$ 45/ЮЗ	7,0
10	<b><u>322,2<math>\angle</math>68,8/СВ</u></b>	12,6	33	65,7 $\angle$ 14,4/СЗ	7,7	56	312,6 $\angle$ 63,2/СВ	6,9
11	<b><u>345,5<math>\angle</math>81,2/ЮЗ</u></b>	12	34	308,1 $\angle$ 66/ЮЗ	7,7	57	272,2 $\angle$ 86,9/СЗ	6,8
12	<b><u>330<math>\angle</math>84/СВ</u></b>	12	35	335,2 $\angle$ 69/ЮЗ	7,7	58	58,8 $\angle$ 81,4/СЗ	6,8
13	<b><u>342,8<math>\angle</math>87/ЮЗ</u></b>	11,6	36	76,1 $\angle$ 78,1/ЮВ	7,7	59	342 $\angle$ 74,9/СВ	6,7
14	<b><u>38,1<math>\angle</math>65,9/ЮВ</u></b>	9,6	37	77,2 $\angle$ 68,9/ЮВ	7,7	60	330 $\angle$ 74,9/СВ	6,7
15	310 $\angle$ 71,9/СВ	9,2	38	32,8 $\angle$ 66/ЮВ	7,7	61	359,9 $\angle$ 71,9/ЮЗ	6,7
16	305 $\angle$ 36,1/СВ	9,0	39	342,9 $\angle$ 68,8/СВ	7,7	62	322,3 $\angle$ 39,2/ЮЗ	6,6
17	6 $\angle$ 29,8/ЮВ	8,9	40	288,6 $\angle$ 86,9/ЮЗ	7,6	63	345,3 $\angle$ 83,9/СВ	6,6
18	12,2 $\angle$ 80,8/ЮВ	8,9	41	309,9 $\angle$ 44,9/СВ	7,6	64	27,1 $\angle$ 56,8/СЗ	6,5
19	336,4 $\angle$ 84,2/СВ	8,7	42	356,7 $\angle$ 80,9/ЮЗ	7,5	65	296,7 $\angle$ 26,9/СВ	6,5
20	85,1 $\angle$ 72,1/СЗ	8,7	43	4,3 $\angle$ 84/СЗ	7,5	66	314,3 $\angle$ 65,9/ЮЗ	6,2
21	294,4 $\angle$ 81,2/ЮЗ	8,6	44	29,6 $\angle$ 24,1/СЗ	7,5	67	298,6 $\angle$ 11,7/СВ	6,0
22	330,6 $\angle$ 34/СВ	8,4	45	314,4 $\angle$ 69,4/СВ	7,5	68	330,3 $\angle$ 21,1/СВ	5,7
23	40,6 $\angle$ 84,1/СЗ	8,2	46	75,6 $\angle$ 75/СЗ	7,5			

Примечание. \*Азимут простирания, угол и направление падения; F – числовое значение функции пространственного распределения. Здесь и в табл. 2 полужирным шрифтом и подчеркиванием выделены плоскости с наибольшими значениями F. Note. \*Azimuth of strike, angle and direction of dip; F is the numerical value of the spatial distribution function. Here and in Table 2 planes with the highest F values are given in bold and underlined.

4) тип парагенезиса – совокупность составляющих его элементов, символы которых заключены в фигурные скобки, – {R'RL}; 5) величину  $\alpha_0$  (цифра после фигурных скобок); 6) условный номер деформационного режима (цифра после дефиса): 1 – взбросовый, 2 – сбросовый, 3 – сдвиговый, 4 – взбросово-сдвиговый, 5 – сбросово-сдвиговый, 6 – взбросово-сбросовый, 7 – октаэдрический. Формула парагенезиса позволяет при необходимости реконструировать пространственную ориентировку всех структурных элементов и осей главных нормальных напряжений.

С учетом простирания плоскости главного смещения (L) дислокации подразделяются на четыре условные группы: северо-западные (СЗ 293°–337°), субмеридиональные (СЗ 338° – СВ 22°), северо-восточные (СВ 23°–67°) и субширотные (СЗ 270°–292°, СВ 68°–90°).

Анализ  $\pi\Sigma$ -диаграммы (рис. 2, б) позволяет выделить не менее 59 систем закономерно взаимоориентированных статистических плоскостей, представляющих собой ПССЭ. Их идентификация только на основе наблюдений в карьере затруднительна из-за специфических особенностей пород. Поэтому при решении задач идентификации использовались данные о ПССЭ и L-плоскостях в интрузивных телах кааламского клинопироксенит-габбронорит-диоритового комплекса (рис. 2, а). Наблюдавшиеся в магматических породах сдвиговые зоны северо-западного, северо-восточного, субмеридионального и субширотного простирания выражены отчетливо [Ладожская..., 2020, рис. 3.9]. Это позволяет уверенно определять пространственную ориентировку плоскостей главного смещения, играющих ключевую роль в процессе идентификации. При сопоставлении структурных диаграмм выявлено сходство многих ПССЭ сравниваемых геологических объектов. Кроме того, установлено, что с парами парагенетичных структурных элементов рудоконтролирующей сдвиговой зоны графитового проявления Кимамяки весьма сходны по ориентировке и угловым соотношениям пары статистических плоскостей, выявленных на других объектах. В качестве примера выполненных сравнений приводятся диаграммы ПССЭ, L-сколы в которых представлены главными статистическими плоскостями 327,7 $\angle$ 81/ЮЗ, 311,9 $\angle$ 89,9/ЮЗ (табл. 1, № 1, 2), а также диаграммы их аналогов в интрузивных телах на участках Сурисуо и Араминлампи, территориально наиболее близком к урочищу Кимамяки-Путролампи (рис. 3).

Идентифицированные ПССЭ рудоконтролирующей структуры графитового проявления Кимамяки сгруппированы с учетом ориентировки горизонтальных составляющих максимального главного напряжения  $\sigma_1$  (предполагаемые направления вертикальной составляющей стресса – снизу-вверх) и простирания L-плоскостей (табл. 2).

## Обсуждение результатов

Признаки и наличие сдвиговых дислокаций в геологических объектах Северного Приладожья отмечались неоднократно [Судовиков, 1954; Казаков и др., 1977; Морозов, 1999; Геология..., 2000 и др.]. Показано, что сдвиговыми зонами контролировалась благороднометалльная минерализация разнообразных горных пород [Ivashchenko et al., 2002, 2016; Иващенко и др., 2004]. Однако важная минерогеническая роль сдвиговой деформации и инициируемых ею эндогенных процессов в полной мере еще не выяснена и должным образом не оценена.

Исследованием внутреннего строения вскрытой карьером Кимамяки зоны интенсивного расщелачивания и карбонизации пород установлено, что ее структура – результат развития многочисленных ПССЭ. Их наличие само по себе, независимо от возможности идентификации, – неопровержимый аргумент деформационной сдвиговой природы рудоконтролирующей структуры.

Выполненная идентификация ПССЭ (табл. 2) позволяет судить об условиях их формирования, направлениях смещения по сдвиговым (сколовым) структурным элементам, а также дает и другую полезную информацию. Имеющийся фактический материал недостаточен для выяснения последовательности развития парагенезисов, но в совокупности с опубликованными тектоноструктурными сведениями он позволяет обратить внимание на следующее.

Плоскости главного смещения в идентифицированных ПССЭ рудоконтролирующей сдвиговой зоны Кимамяки (табл. 2) по своей пространственной ориентировке могут соответствовать разновозрастным дислокациям, выявленным в Северном Приладожье в ходе предшествовавших исследований. Однако сопоставлениям и выяснению возрастных соотношений L-плоскостей препятствуют, во-первых, отсутствие статистических данных о пространственной ориентировке регионально развитых структур, во-вторых, разногласия в оценках последовательности их формирования.

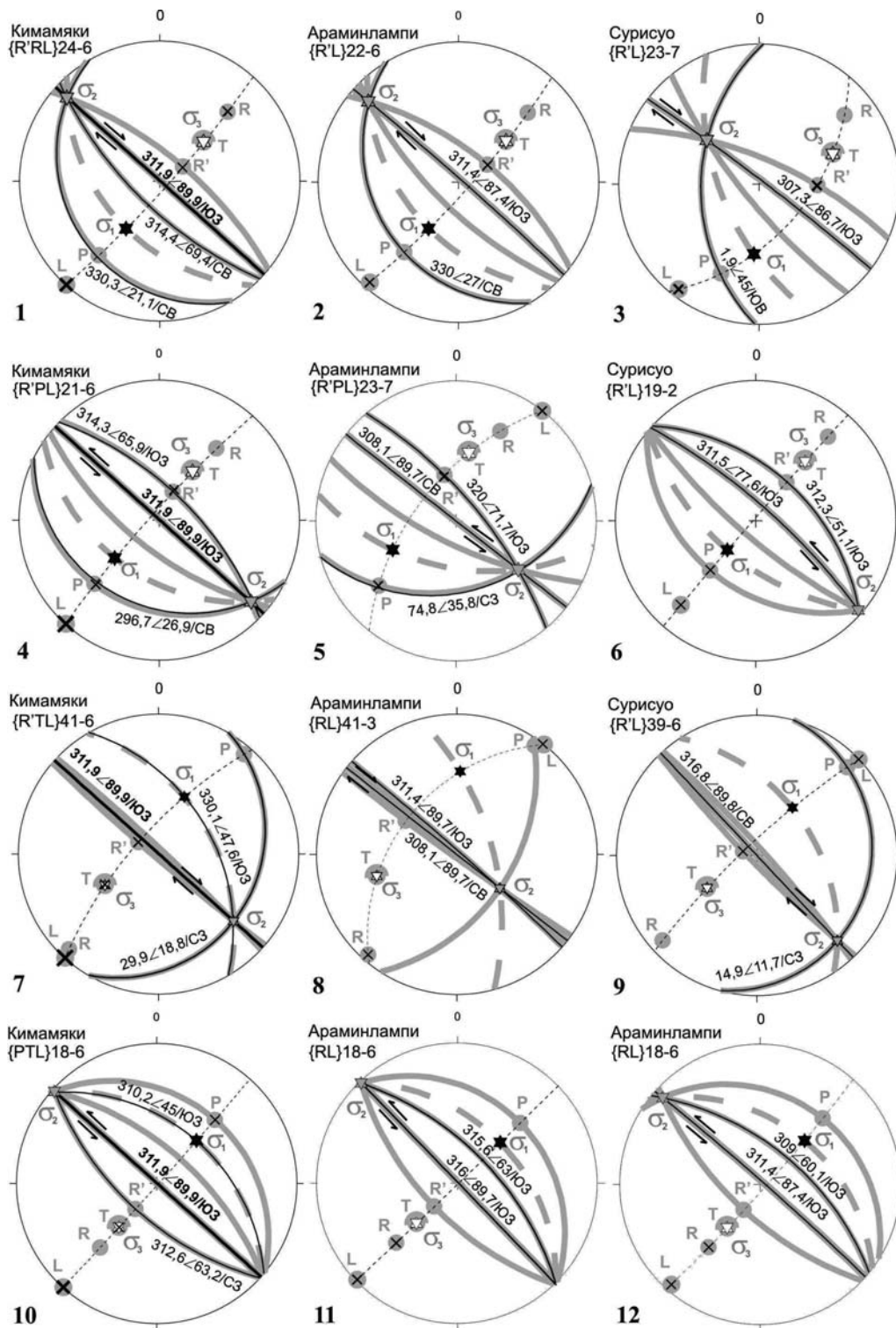


Рис. 3. Примеры сходства ПССЭ в графитовых рудах проявления Кимамяки и в малых интрузивах кааламского комплекса. Серым цветом показаны элементы моделируемого парагенезиса; L, R, R', P – сдвиговые (сколовые) плоскости, T – плоскость отрыва;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – оси главных нормальных напряжений сжатия ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ); в надписях над диаграммами: название объекта, тип ПССЭ (в фигурных скобках), затем величина  $\alpha_0$  и номер деформационного режима

Fig. 3. Examples of similarity of the PSSE in graphite ores of the Kimamäki occurrence and in small intrusions of the Kaalama complex. Elements of the modeled paragenesis are given in gray; L, R, R', P are shear planes, T is a plane of rupture;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  are axes of principal normal compressive strain ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ); in the inscriptions above the diagrams: name of the object, type of PSSE (in curly brackets), then the value of  $\alpha_0$  and the number of the deformation mode



Таблица 2. Идентифицированные ПССЭ

Table 2. Identified PSSEs

№ No.	Формула ПССЭ Formula of PSSE	№ No.	Формула ПССЭ Formula of PSSE
	Стресс с ЮЗ на СВ, субмеридиональные L Stress from SW to NE, submeridional L		Стресс с СВ на ЮЗ, СВ простирание L Stress from NE to SW, NE strike L
1	<b>345,5</b> $\angle$ <b>81,2</b> / <b>ЮЗ</b> > 341,5 $\angle$ 24,1{ <b>R'PL</b> } <b>39</b> -1	32	<b>42,8</b> $\angle$ <b>41,7</b> / <b>СЗ</b> > 278,7 $\angle$ 36,4{ <b>R'TL</b> } <b>30</b> -5
2	359,9 $\angle$ 71,9/ <b>ЮЗ</b> > 333,7 $\angle$ 53,5{ <b>PTL</b> } <b>28</b> -3		Стресс с СВ на ЮЗ, субмеридиональные L Stress from NE to SW, submeridional L
3	350,8 $\angle$ 68,9/ <b>ЮЗ</b> > 342 $\angle$ 21,6{ <b>R'PL</b> } <b>25</b> -1	33	345,3 $\angle$ 83,9/ <b>СВ</b> > 152,9 $\angle$ 63,5{ <b>R'PL</b> } <b>10</b> -3
4	<b>342,8</b> $\angle$ <b>87</b> / <b>ЮЗ</b> > 311,9 $\angle$ 84,2{ <b>R'PL</b> } <b>14</b> -3		Стресс с СВ на ЮЗ, субширотные L Stress from NE to SW, sublatitudinal L
	Стресс с ЮЗ на СВ, СЗ простирание L Stress from SW to NE, NW strike L	34	<b>292,2</b> $\angle$ <b>81,10</b> / <b>СВ</b> > 294,1 $\angle$ 11,9{ <b>R'PL</b> } <b>18</b> -6
5	<b>311,9</b> $\angle$ <b>89,9</b> / <b>ЮЗ</b> > 311,9 $\angle$ 18,5{ <b>R'TL</b> } <b>41</b> -6		Стресс с В на З, СЗ простирание L Stress from E to W, NW strike L
6	326,9 $\angle$ 52,3/ <b>ЮЗ</b> > 306,8 $\angle$ 24{ <b>RPT</b> } <b>40</b> -1	35	321,8 $\angle$ 66,1/ <b>ЮЗ</b> < 317,8 $\angle$ 9{ <b>R'PT</b> } <b>34</b> -2
7	325,3 $\angle$ 48,2/ <b>ЮЗ</b> > 317,5 $\angle$ 8,6{ <b>R'PT</b> } <b>37</b> -1	36	335,2 $\angle$ 69/ <b>ЮЗ</b> < 322,3 $\angle$ 30,2{ <b>RTL</b> } <b>31</b> -2
8	330 $\angle$ 74,9/ <b>ЮЗ</b> < 148,6 $\angle$ 4,9{ <b>R'RL</b> } <b>21</b> -2	37	298,6 $\angle$ 11,7/ <b>СВ</b> > 337,2 $\angle$ 7,4{ <b>R'PL</b> } <b>30</b> -2
9	<b>311,9</b> $\angle$ <b>89,9</b> / <b>ЮЗ</b> < 131,9 $\angle$ 1,1{ <b>PTL</b> } <b>18</b> -6	38	<b>327,7</b> $\angle$ <b>81</b> / <b>ЮЗ</b> < 237,7 $\angle$ 81{ <b>PTL</b> } <b>27</b> -3
	Стресс с ЮЗ на СВ, субширотные L Stress from SW to NE, sublatitudinal L	39	<b>330</b> $\angle$ <b>84</b> / <b>СВ</b> < 349,8 $\angle$ 72,7{ <b>R'RL</b> } <b>22</b> -3
10	288,6 $\angle$ 86,9/ <b>ЮЗ</b> < 115,4 $\angle$ 65,3{ <b>R'PL</b> } <b>31</b> -3	40	308,9 $\angle$ 61,4/ <b>ЮЗ</b> < 300,4 $\angle$ 15,1{ <b>RPT</b> } <b>22</b> -1
11	282,8 $\angle$ 84/ <b>ЮЗ</b> < 115,8 $\angle$ 65{ <b>R'PL</b> } <b>24</b> -3	41	314,3 $\angle$ 65,9/ <b>ЮЗ</b> < 285,2 $\angle$ 47,4{ <b>R'RL</b> } <b>19</b> -5
12	<b>292,2</b> $\angle$ <b>81,1</b> / <b>СВ</b> < 4,7 $\angle$ 80,7{ <b>R'RL</b> } <b>24</b> -3	42	<b>327,7</b> $\angle$ <b>81</b> / <b>ЮЗ</b> < 244,1 $\angle$ 80,9{ <b>PTL</b> } <b>17</b> -3
	Стресс с ЮВ на СЗ, СЗ простирание L Stress from SE to NW, NW strike L	43	315,2 $\angle$ 76,9/ <b>ЮЗ</b> < 280,6 $\angle$ 67,7{ <b>RPT</b> } <b>17</b> -3
13	298,6 $\angle$ 11,7/ <b>СВ</b> > 14,1 $\angle$ 11,3{ <b>R'PL</b> } <b>33</b> -6	44	<b>311,9</b> $\angle$ <b>89,9</b> / <b>ЮЗ</b> < 311,5 $\angle$ 74,4{ <b>R'RPL</b> } <b>11</b> -3
14	330,1 $\angle$ 47,6/ <b>ЮЗ</b> < 312,3 $\angle$ 18,5{ <b>PTL</b> } <b>4</b> -2	45	<b>330</b> $\angle$ <b>84</b> / <b>СВ</b> < 13 $\angle$ 81,2{ <b>R'RL</b> } <b>7</b> -3
	Стресс с ЮВ на СЗ, СВ простирание L Stress from SE to NW, NE strike L		Стресс с В на З, СВ простирание L Stress from E to W, NE strike of L
15	29,9 $\angle$ 18,8/ <b>СЗ</b> > 212,2 $\angle$ 0,8{ <b>R'PL</b> } <b>40</b> -1	46	<b>46,6</b> $\angle$ <b>54,3</b> / <b>СЗ</b> > 324,5 $\angle$ 54{ <b>R'PL</b> } <b>30</b> -3
	Стресс с ЮВ на СЗ, субширотные L Stress from SE to NW, sublatitudinal L		Стресс с В на З, субмеридиональные L Stress from E to W, submeridional L
16	85,1 $\angle$ 72,1/ <b>СЗ</b> > 284,9 $\angle$ 46,6{ <b>R'RL</b> } <b>7</b> -5	47	11,5 $\angle$ 74,5/ <b>ЮВ</b> < 12,5 $\angle$ 3,7{ <b>R'PT</b> } <b>39</b> -1
17	76,1 $\angle$ 78,1/ <b>ЮВ</b> > 215,9 $\angle$ 71,9{ <b>R'RL</b> } <b>4</b> -3		Стресс с З на В, СЗ простирание L Stress from W to E, NW strike L
	Стресс с СЗ на ЮВ, СЗ простирание L Stress from NW to SE, NW strike L	48	<b>302,1</b> $\angle$ <b>83,9</b> / <b>ЮЗ</b> < 136,22 $\angle$ 66,2{ <b>R'RTL</b> } <b>37</b> -3
18	322,3 $\angle$ 39,2/ <b>ЮЗ</b> > 182 $\angle$ 87,5{ <b>R'RL</b> } <b>7</b> -2		Стресс с З на В, СВ простирание L Stress from W to E, NE strike of L
	Стресс с СЗ на ЮВ, субмеридиональные L Stress from NW to SE, submeridional L	49	<b>38,1</b> $\angle$ <b>65,9</b> / <b>ЮВ</b> > 114,8 $\angle$ 65,3{ <b>R'PL</b> } <b>40</b> -3
19	353 $\angle$ 78,3/ <b>СВ</b> < 56,4 $\angle$ 77{ <b>R'PT</b> } <b>28</b> -3	50	58,8 $\angle$ 81,4/ <b>СЗ</b> > 36,7 $\angle$ 68,1{ <b>R'RL</b> } <b>28</b> -3
20	342 $\angle$ 74,9/ <b>СВ</b> < 132,5 $\angle$ 61,3{ <b>RTL</b> } <b>11</b> -3		Стресс с С на Ю, СЗ простирание L Stress from N to S, NW strike L
	Стресс с СВ на ЮЗ, СЗ простирание L Stress from NE to SW, NW strike L	51	314,3 $\angle$ 65,9/ <b>ЮЗ</b> > 234 $\angle$ 65,6{ <b>R'PL</b> } <b>39</b> -3
21	330 $\angle$ 74,9 <b>СВ</b> < 330,1 $\angle$ 0,2{ <b>R'PL</b> } <b>36</b> -3	52	<b>302,1</b> $\angle$ <b>83,9</b> / <b>ЮЗ</b> > 132 $\angle$ 58,2{ <b>RTL</b> } <b>33</b> -3
22	311,3 $\angle$ 81,1/ <b>СВ</b> < 312,1 $\angle$ 5{ <b>RPT</b> } <b>36</b> -1	53	<b>327,7</b> $\angle$ <b>81</b> / <b>ЮЗ</b> > 256,2 $\angle$ 80,5{ <b>R'RL</b> } <b>27</b> -3
23	<b>311,9</b> $\angle$ <b>89,9</b> / <b>ЮЗ</b> > 131,9 $\angle$ 6,7{ <b>R'RL</b> } <b>24</b> -6	54	294,4 $\angle$ 81,2/ <b>ЮЗ</b> > 223,9 $\angle$ 80,7{ <b>R'RL</b> } <b>25</b> -3
24	314,3 $\angle$ 65,9/ <b>ЮЗ</b> > 138,6 $\angle$ 9,5{ <b>PTL</b> } <b>24</b> -1	55	335,2 $\angle$ 69/ <b>ЮЗ</b> > 234,5 $\angle$ 69,6{ <b>R'RL</b> } <b>21</b> -3
25	<b>322,2</b> $\angle$ <b>68,9</b> / <b>СВ</b> < 327,6 $\angle$ 14,3{ <b>R'RTL</b> } <b>21</b> -1	56	330,1 $\angle$ 47,6/ <b>ЮЗ</b> > 164 $\angle$ 14,7{ <b>R'RL</b> } <b>4</b> -2
26	<b>311,9</b> $\angle$ <b>89,9</b> / <b>ЮЗ</b> < 311,9 $\angle$ 7,4{ <b>R'PL</b> } <b>21</b> -6		Стресс с Ю на С, СЗ простирание L Stress from S to N, NW strike L
27	318,8 $\angle$ 83,4/ <b>ЮЗ</b> < 317,8 $\angle$ 8,8{ <b>R'RP</b> } <b>18</b> -6	57	<b>296,4</b> $\angle$ <b>75,2</b> / <b>СВ</b> > 300,5 $\angle$ 15,2{ <b>R'RL</b> } <b>24</b> -2
28	330,3 $\angle$ 21,1/ <b>СВ</b> > 330,5 $\angle$ 0,1{ <b>R'PL</b> } <b>18</b> -2		Стресс с Ю на С, СВ простирание L Stress from S to N, NE strike L
29	330 $\angle$ 48,1/ <b>СВ</b> < 330,1 $\angle$ 0,2{ <b>RPT</b> } <b>18</b> -1	58	27,1 $\angle$ 56,8/ <b>СЗ</b> < 347,5 $\angle$ 44,2{ <b>RTL</b> } <b>8</b> -5
30	329,9 $\angle$ 48,4/ <b>СВ</b> < 330 $\angle$ 0,2{ <b>R'PT</b> } <b>10</b> -1		Стресс с Ю на С, субширотные L Stress from S to N, sublatitudinal L
31	330,1 $\angle$ 47,6/ <b>ЮЗ</b> > 150,2 $\angle$ 0,1{ <b>R'PL</b> } <b>3</b> -2	59	77 $\angle$ 69/ <b>ЮВ</b> < 89,8 $\angle$ 30{ <b>R'PL</b> } <b>17</b> -1

Примечание. L – плоскости главного сдвига; моделируемые L выделены курсивом.

Note. L – planes of principal shear; modeled L are given in italics.

После сообщения о полифазности тектонических деформаций [Судовиков, 1954] предложено несколько вариантов структурно-возрастных шкал [Судовиков и др., 1970; Казаков, 1976; Казаков и др., 1977; Морозов, Гафт, 1985; Геология..., 2000; Государственная..., 2013; Ладожская..., 2020 и др.], основанных на наблюдениях в южной части Сортавальской и, главным образом, в Питкярантской подзонах Северо-Ладожской СФЗ.

В обобщающей схеме [Судовиков и др., 1970] охарактеризованы три главных этапа деформаций, продуцировавших дизъюнктивные и пликативные структуры различного простирания. К первому (раннему) отнесены субмеридиональные дислокации, наложенные на пологую сланцеватость (полосчатость) архейских гранито-гнейсов выступов фундамента, в частности Сортавальского, и амфиболовых сланцев сортавальской серии; ко второму этапу – структуры северо-западного простирания, к третьему – северо-восточного. Образование надвигов на южном крыле Сортавальско-Питкярантского поднятия рассматривалось в рамках второго этапа деформаций. Отмечалось [там же, с. 94], что с достаточной уверенностью структуры первого и второго этапов разделяются лишь на участке Ляскеля-Импиниеми, а также упоминалось о локально проявленном наложении зон интенсивного северо-западного рассланцевания на структуры северо-восточного простирания.

Для геологических образований территории между озерами Большое Янисъярви и Ладожское разработаны схемы, включающие пять [Казаков, 1976] и шесть [Казаков и др., 1977] деформационных этапов. По ранней версии [Казаков, 1976], к первому этапу отнесены складки ламинарного течения и субплоскостные структурные элементы, первоначальная пространственная ориентировка которых не установлена. Судя по более позднему описанию [Казаков и др., 1977, с. 85], складки первого этапа – северо-западные и близкие к ним, по ориентировке субширотные. Второму этапу соответствуют открытые симметричные прямые субширотные складки. Наиболее отчетливо и широко проявленные субмеридиональные зоны рассланцевания и складки ламинарного течения – производные третьего по очередности деформационного этапа. На четвертом этапе образовались субширотные структуры, на пятом – северо-западные и субмеридиональные ( $320\text{--}340^\circ$  [Казаков, 1976] или  $340^\circ \pm 10^\circ$  [Казаков и др., 1977]), на шестом – субширотные. Отсутствует какая-либо информация о дислокациях северо-

восточного простирания, хотя на демонстрируемых схемах [Казаков, 1976, рис. 98; Казаков и др., 1977, рис. 28] много условных знаков, указывающих именно на такую ориентировку тектонических структур.

Авторы более поздней структурно-возрастной шкалы [Морозов, Гафт, 1985] отмечают ее сходство с предложенными ранее [Казаков, 1976; Казаков и др., 1977]. По их схеме первому этапу деформаций отвечают пологие разрывы, изоклиналиные лежащие складки предположительно субширотной ориентировки; второму – прямые субмеридиональные складки; третьему – субширотные складки и разрывы; четвертому – прямые складки северо-восточной ориентировки; пятому – пространственно дискретные зоны кливажа северо-западного простирания.

Регионально развитые субмеридиональные, или субмеридиональные и северо-западные ранние дислокации [Судовиков и др., 1970] в поздних схемах отнесены к третьему [Казаков, 1976; Казаков и др., 1977] и второму [Морозов, Гафт, 1985] этапам деформации.

Наличие в Приладожье гетерохронных различно пространственно ориентированных дислокаций горных пород – признак изменявшихся условий тектоногенеза. С этими изменениями в кимамякской рудоконтролирующей зоне связано новообразование ПССЭ, которые, как установлено, формировались в разных деформационных режимах (табл. 2, рис. 4).

В условиях взбросового режима (рис. 4, а) при диагональных по отношению к географической координатной сети горизонтальных составляющих  $\sigma_1$  (~77 % ПССЭ) функционировали субмеридиональные L-плоскости главного смещения с элементами залегания  $345,5\angle 81,2/\text{ЮВ}$ ,  $350,8\angle 68,9/\text{ЮЗ}$  (табл. 2, ПССЭ № 1, 3), L-плоскости северо-западного простирания (табл. 2, ПССЭ № 6, 7, 22, 24, 25, 29, 30) и L-плоскость северо-восточного простирания (табл. 2, ПССЭ № 15); при ортогональных горизонтальных составляющих  $\sigma_1$  – северо-западная, субмеридиональная и субширотная L-плоскости (табл. 2, ПССЭ № 40, 47, 59 соответственно).

Взбросово-сбросовому режиму (рис. 4, б) и диагональной ориентировке осей  $\sigma_1$  соответствуют парагенезисы с северо-западным простиранием плоскостей главного сдвига (табл. 2, ПССЭ № 5, 9, 13, 23, 26, 27), в четырех из которых фигурирует вторая по значимости L-плоскость  $311,9\angle 89,9/\text{ЮЗ}$ , и парагенезис (табл. 2, ПССЭ № 34) с четвертой по значимости субширотной L-плоскостью  $292,2\angle 81,1/\text{СВ}$ .

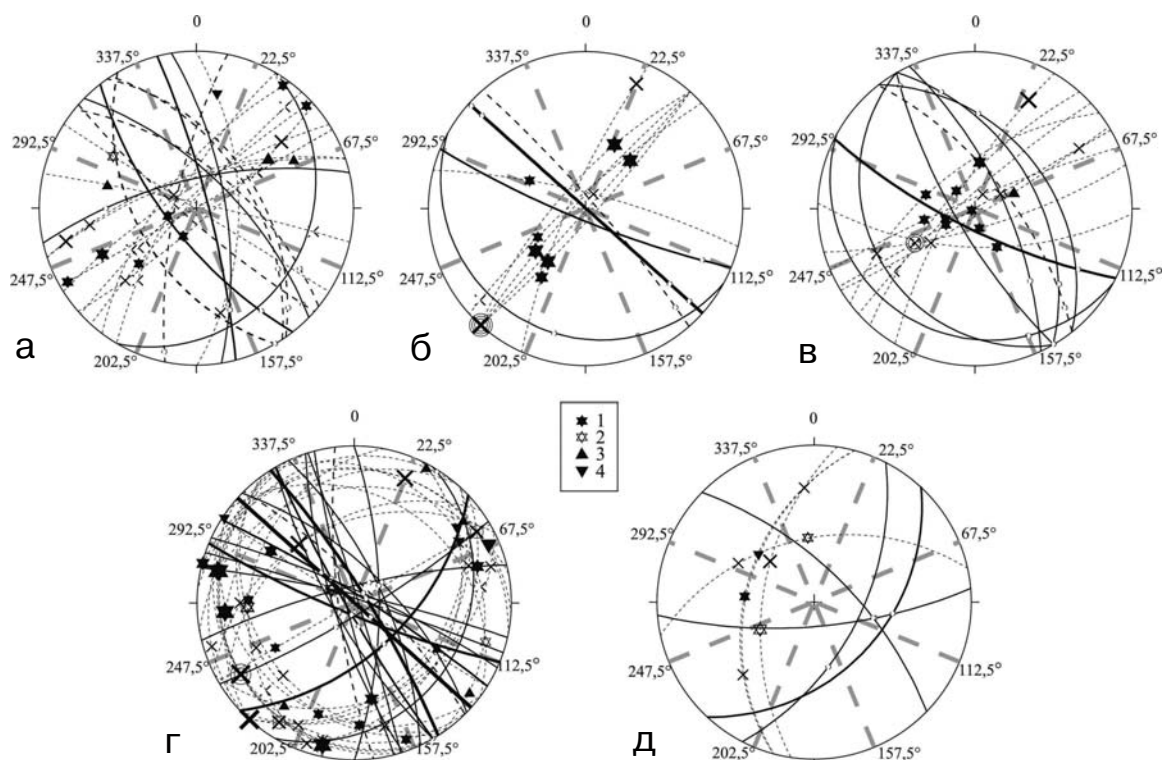


Рис. 4. Пространственная ориентировка плоскостей главного сдвига и линий  $\sigma_1$  в различных деформационных режимах:

а – взбросовом, б – взбросово-сбросовом, в – сбросовом, г – сдвиговом, д – сбросово-сдвиговом. Условные обозначения: L-плоскости – косые кресты и сплошные линии, моделируемые – длинный пунктир; количество кружков вокруг крестов равно числу активизаций в качестве плоскости главного сдвига; короткий пунктир – пояса гномостереографических проекций парагенетичных плоскостей; линии  $\sigma_1$  показаны значками (см. в прямоугольной рамке), указывающими на простирающие соответствующей L-плоскости: 1 – северо-западное, 2 – северо-восточное, 3 – субмеридиональное, 4 – субширотное); размер значка пропорционален значению F в табл. 1

Fig. 4. Spatial orientation of the main shear planes and  $\sigma_1$  lines in different deformation regimes:

а – reverse fault, б – reverse fault-fault, в – normal fault, г – strike-slip, д – normal fault-fault. Legend: L-planes – oblique crosses and solid lines, modeled – long dotted line; the number of circles around the crosses is equal to the number of activations as the main shear plane; short dotted line – belts of gnomostereographic projections of paragenetic planes;  $\sigma_1$  lines are shown by icons (see in rectangular frame) indicating the strike of the corresponding L-plane: 1 – northwest, 2 – northeast, 3 – submeridional, 4 – sublatitudinal); the size of the icon is proportional to the F value in Table 1

Для сбросового деформационного режима (рис. 4, в) характерны парагенезисы с L-плоскостями только северо-западного простираения и при диагональных направлениях горизонтальной составляющей  $\sigma_1$  (табл. 2, ПССЭ № 8, 14, 18, 28, 31), и при ортогональных (табл. 2, ПССЭ № 35–37, 56, 57).

В сдвиговом режиме (рис. 4, г) при диагональных горизонтальных составляющих  $\sigma_1$  образовались ПССЭ с субмеридиональным (табл. 2, ПССЭ № 2, 4, 19, 20, 33), субширотным (табл. 2, ПССЭ № 10–12, 17) и северо-западным (табл. 2, ПССЭ № 21) простираением L-плоскостей. При ортогональных направлениях  $\sigma_1$  сформировалась большая часть ПССЭ (60 %), среди которых 13 парагенезисов с северо-западным простираением L-плоскостей (табл. 2, ПССЭ № 38, 39, 42–45, 48, 51–55)

и 3 – с северо-восточным (табл. 2, ПССЭ № 46, 49, 50). Главное смещение горных пород нередко происходило по наиболее значимым плоскостям (табл. 1, № 1, 2, 4, 8, 12–14).

Сбросово-сдвиговому режиму (рис. 4, д) при диагональных направлениях  $\sigma_1$  соответствуют парагенезисы с L-плоскостями субширотного (табл. 2, ПССЭ № 16) и северо-восточного  $42,8 \angle 41,7 / \text{СЗ}$  (табл. 2, ПССЭ № 32) простираения, при ортогональных направлениях  $\sigma_1$  – парагенезисы с L-плоскостями северо-западного и северо-восточного простираения (табл. 2, ПССЭ № 41 и 58 соответственно).

Вышеизложенные сведения позволяют предположить, что ранним субмеридиональным и северо-западным структурам, характерным для Северо-Ладужской СФЗ в целом, в кимамякской рудоконтролирующей зоне наи-

более соответствуют L-плоскости, образовавшиеся и функционировавшие в деформационных режимах с доминировавшей вертикальной составляющей смещения блоков горных пород (рис. 4, а–в). В условиях взбросового, взбросово-сбросового режимов также сформировались слабовыраженные северо-восточные и субширотные L-плоскости (рис. 4, а, б). Регионально проявленным северо-восточным дислокациям позднего тектонического этапа [Судовиков и др., 1970], скорее всего, соответствуют L-плоскости, функционировавшие при сдвиговом (рис. 4, г) и сбросово-сдвиговом (рис. 4, д) деформационных режимах. В условиях сдвигового режима происходили новообразование, а также активизация субмеридиональных, северо-западных, северо-восточных и субширотных L-плоскостей. Таким образом, в первом приближении вырисовывается возрастная последовательность деформационных режимов структурообразования. Похожая тенденция смены деформационных режимов в ходе постъятулийского тектоногенеза выявлена при изучении рудных объектов Ведлозерско-Сезозерского зеленокаменного пояса [Ручьев, 2022], где сначала также преобладала вертикальная компонента смещения горных пород, затем – горизонтальная. Если последовательность проявления деформационных режимов – атрибут тектоно-метаморфического цикла, то в Северо-Ладужской СФЗ циклическая смена режимов могла быть неоднократной (в геологической истории ладожской серии намечается три метаморфических события в РТ-условиях амфиболитовой фации [Казаков и др., 1977]).

Плоскости главного смещения, определявшие пространственную ориентировку рудоконтролирующей зоны (табл. 1, № 1, 2), зарождались и функционировали при изменявшихся направлениях осей  $\sigma_1$  (рис. 3, 4). Можно предположить, что плоскость с элементами залегания  $311,9 \angle 89,9 / ЮЗ$  появилась при формировании парагенезиса с максимальным значением  $\alpha_0^1$  (табл. 2, ПССЭ № 5; рис. 3, диаграмма 7) во взбросово-сбросовом режиме и стрессе в северо-восточном направлении,

<sup>1</sup> Угол скалывания  $\alpha_0$  – показатель реологического состояния вещества, подвергшегося сдвиговой деформации, который увеличивается с возрастанием РТ-параметров горных пород и уменьшается при их снижении [Гинтов, 2005]. Значения  $\alpha_0$  в ранних парагенезисах (табл. 2, ПССЭ № 1, 6, 15) указывают на экстремальные РТ-параметры субстрата, деформированного во взбросовом и взбросово-сбросовом режимах, то есть на пиковые условия метаморфизма пород, что согласуется с выводами, сделанными ранее [Казаков и др., 1977]. Вариативность величины  $\alpha_0$  (табл. 2) – следствие изменчивости термодинамических условий, в которых формировалась рудоконтролирующая структура.

затем эта плоскость в парагенезисах с меньшими величинами  $\alpha_0$  (табл. 2, ПССЭ № 9, 23, 26; рис. 3, диаграммы 1, 4, 10) трижды активизировалась в том же деформационном режиме при диагональных направлениях стресса, потом еще раз в сдвиговом режиме при стрессе в западном направлении (табл. 2, ПССЭ № 44; рис. 3, диаграмма 13). Образование L-плоскости  $327,7 \angle 81 / ЮЗ$  в условиях сдвигового деформационного режима могло происходить при стрессе в южном (табл. 2, ПССЭ № 53; рис. 3, диаграмма 16) или в западном (табл. 2, ПССЭ № 38; рис. 3, диаграмма 19) направлениях, затем она активизировалась при стрессе с востока на запад (табл. 2, ПССЭ № 42; рис. 3, диаграмма 22). Вероятно, условия сдвигового и сбросово-сдвигового деформационных режимов в породах сортавальской серии, заполняющих промежутки между Йокирантским и Сортавальским выступами фундамента, во многом определялись характером границ и направлением перемещений этих блоков архейской коры.

По геофизическим данным, Ладожская аномалия электропроводимости, обусловленная, как считает большинство специалистов, наличием графит- и сульфидсодержащих горных пород, связана с системой долгоживущих разломов северо-западного направления [Жамалетдинов и др., 2018]. На Ладожско-Ботнической территории также выделены зоны повышенной электропроводимости субмеридиональной, субширотной, северо-восточной ориентировки [там же, рис. 2], вполне соответствующих разновозрастным тектоническим дислокациям, наблюдавшимся в Северном Приладожье. Как уже отмечалось, эти направления близки к простиранию статистических плоскостей (табл. 1) в структуре рудоконтролирующей зоны графитового проявления Кимамьяки. Ее пространственное положение отражает местную специфику разломно-блоковой тектоники на определенном участке Северо-Ладужской СФЗ. В других местах условия деформации и, как следствие, ориентировка зон сдвиговых дислокаций и карбонизации горных пород могли быть иными. Так, например, северо-восточное простирание ( $\sim 35\text{--}40^\circ$ ) имеют зоны графитовой минерализации на участке Рюттю [Куличенко и др., 2024], а также продуктивные графитсодержащие кварц-биотитовые сланцы в контуре подсчета запасов Ихальского месторождения графита ( $\sim 40^\circ$ ) [Минерально-сырьевая..., 2006, рис. 2.3.2.4]. Таким образом, графитовая минерализация могла контролироваться различно ориентированными зонами сдвиговой деформации широкого

возрастного диапазона от ранних субмеридиональных и северо-западных до поздних северо-восточных.

Графитоносная зона рудопроявления Ки-мамяки начала формироваться в посткалевийское время, о чем свидетельствует сходство ранних ПССЭ, выявленных в ней и в интрузивных телах раннеорогенного Кааламского клинопироксенит-габбронорит-диоритового комплекса (возраст габброноритов –  $1890 \pm 9,9$  млн лет [Государственная..., 2013]), прорывающих отложения сортавальской и ладожской серий (возрастные границы периода накопления последней ~1,92–1,88 млрд лет [Ладожская..., 2020]). На интрузивные тела синорогенного Суйстамского габбротоналитового комплекса (возраст  $1872 \pm 13$  млн лет [Государственная..., 2013]) наложены сдвиговые зоны северо-восточного простирания – рудоконтролирующие структуры ряда проявлений благородных металлов [Ивашенко и др., 2001, 2004; Ivashchenko et al., 2002], формировавшихся на завершающей стадии свекофеннской тектоно-метаморфической переработки (1,95–1,85 млрд лет назад) и/или в ходе недавно выявленного [Самсонов и др., 2011; Glebovitskii et al., 2012, 2014; Ларионова и др., 2013 и др.] широко проявленного постсвекофеннского (1,8–1,7 млрд лет назад) этапа рудогенеза. Возможно, периодические деформационные и обусловленные ими минерагенические события (графитизация, сульфидизация) повторялись 200 млн лет.

Вскрытая карьером графитоносная зона сдвиговых деформаций эпигенетична по отношению к вмещающей ее толще метавулканитов. Это ставит под сомнение «...представление о седиментогенном происхождении графитоносных метаморфических пород и о биогенной, предположительно битуминозно-сапропелевой, природе заключенного в них углеродного вещества, преобразованного в графит в процессе регионального метаморфизма» [Бискэ, 1987, с. 143].

Идеологически важное суждение об источнике УВ аргументировалось сходством изотопных характеристик графитового ( $\delta^{13}\text{C} = -18,94\text{--}24,9$  ‰) и биогенного углерода [там же]. Однако такие особенности изотопии углерода могут интерпретироваться иначе.

Приладожские графиты по изотопному составу углерода сходны с графитами, для которых наиболее вероятен эндогенный источник УВ (рис. 5).

Анализ результатов изучения изотопного состава ксенолитов мантийных пород и их минералов [Deines, 2002] показал, что углерод

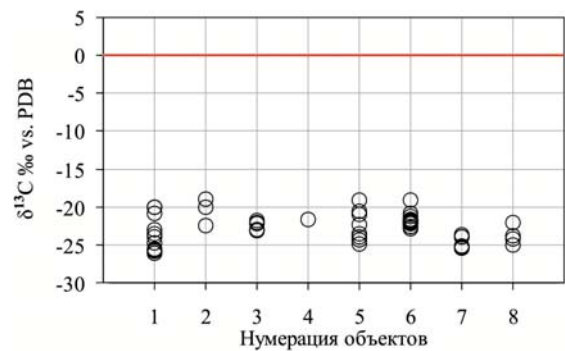


Рис. 5. Сходство изотопного состава углерода из графитов Северного Приладожья [Бискэ, 1987, табл. 20] (номера объектов: 1 – Ихальское месторождение, 2 – проявление Руокаярви, 3 – Кительское олово-полиметаллическое месторождение) и графитов с наиболее вероятным абиогенным источником углерода (номера объектов: 4 – графит октаэдрического габитуса (параморфозы по алмазу?) из гранат-авгитовых клинопироксенитов базит-ультрабазитового комплекса Бени-Бушер, Марокко [Галимов, Слодкевич, 1988]; 5 – графит из локализованного в гранитном массиве Калгутинского редкометалльного грейзенового месторождения, Горный Алтай [Потцелуев и др., 2007]; 6 – графит из эклогитов максюттовского метаморфического комплекса, Южный Урал [Ковалев, Тимофеева, 2013])

Fig. 5. Similarity of the isotopic composition of carbon from graphites of the Northern Priladozhye [Biske, 1987, Table 20] (object numbers: 1 – Ihal'skoye deposit, 2 – Ruokajarvi occurrence, 3 – Kitelskoye Sn-polymetallic deposit) and graphites with the most probable abiogenic source of carbon (object numbers: 4 – graphite of octahedral habit (paramorphoses after diamond?) from garnet-augite clinopyroxenites of the Beni Bushehr mafic-ultramafic complex, Morocco [Galimov, Slodkevich, 1988]; 5 – graphite from the Kalgutinsky rare-metal greisen deposit localized in the granite massif, Altai Mountains [Potseluev et al., 2007]; 6 – graphite from eclogites of the Maksyutovsky metamorphic complex, Southern Urals [Kovalev, Timofeeva, 2013])

с низкими и высокими значениями показателя  $\delta^{13}\text{C}$  встречается примерно с одинаковой частотой, бимодальность распределения выражена отчетливо, острые пики возникают при  $-5$  и  $-25$  ‰. Сделан вывод, что обеднение изотопом  $^{13}\text{C}$  (модальное значение  $\delta^{13}\text{C} \sim -25$  ‰) следует рассматривать как признак мантийного углерода. Показатели  $\delta^{13}\text{C}$  графита из Северного Приладожья вполне соответствуют мантийным (рис. 6).

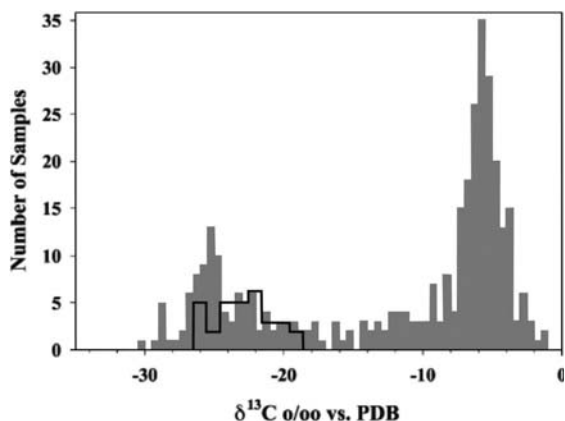


Рис. 6. Сходство изотопного состава углерода из графитов Северного Приладожья [Бискэ, 1987, табл. 20] (черный контур гистограммы) и из ксенолитов мантийных пород и их минералов (серая заливка гистограммы) [Deines, 2002, рис. 5 с изменениями]

Fig. 6. The similarity of the isotopic composition of carbon from the graphite of the Northern Priladozhye region [Biske, 1987, Table 20] (black histogram outline) and from xenolites of mantle rocks and their minerals (gray histogram fill) [Deines, 2002, Fig. 5 with changes]

Согласно концепции С. В. Дигонского и В. В. Тена, происхождение всех разновидностей природного графита обусловлено пиролизом ювенильного водородно-метанового флюида [Дигонский, Тен, 2006]. Изотопные особенности углерода графита и результаты битуминологических исследований графитоносных пород питкьярантской свиты [Бискэ, 1987], выявивших в составе углеводородов преобладание метаново-нафтенной фракции (от 88,09 до 95,25 %), отсутствие гуминовых кислот и порфиринов, наличие в газовой фазе водорода, метана и его гомологов, указывают именно на такой процесс образования графита в Северном Приладожье.

О высокой флюидопроницаемости длительно развивавшейся рудоконтролирующей структуры и ее фидерной роли свидетельствуют выявленные признаки многократной активизации субплоскостных элементов анизотропии горных пород (рис. 2, в), изменения их минерального состава, прежде всего образование большого количества графита в зоне сдвиговых деформаций.

Привнос восстановленными флюидами значительных количеств мантийного углерода и графитизация горных пород свойственны зонам межблоковых глубинных разломов на периферии докембрийских кратонов [Летников

и др., 1996]. Графитовое проявление Кимамяки формировалось в принципиально сходной геологической обстановке. Северо-Ладожская СФЗ находится на окраине Карельского кратона, в Раахе-Ладожской подвижной зоне, изначально рифтовой структуре, формировавшейся на коре континентального типа. С ранне- (2,0–1,9 млрд лет назад) и позднекинематическим (1,85–1,75 млрд лет назад) этапами тектонического развития этой шовной зоны связывается образование дислокаций соответственно северо-западного и северо-восточного простирания [Морозов, 1999], то есть, как уже подтверждено результатами ГРП, структур, имеющих прямое отношение к минерации графита.

С учетом вышеизложенного представляется, что процессы сдвиговой деформации и контролируемой ими флюидной карбонизации гетерогенных геологических образований были главным фактором пространственно дискретной локализации рудопроявлений графита в Северо-Ладожской СФЗ.

## Выводы

Внутреннее строение рудного тела графитового проявления Кимамяки, зоны интенсивного расщелачивания и карбонизации вмещающих пород, – результат развития многочисленных парагенезисов сдвиговых структурных элементов (ПССЭ). Факт присутствия ПССЭ – неопровержимый аргумент деформационной, сдвиговой по своей физической сущности, природы рудоконтролирующей структуры.

Идентифицированные ПССЭ формировались в различных деформационных режимах и, судя по вариативности величин угла скалывания, в изменчивых термодинамических условиях. Это свидетельствует о длительности и прерывистости развития рудоконтролирующей структуры в изменявшихся во времени тектонических обстановках.

Сходство ПССЭ, выявленных на рудопроявлении Кимамяки и в интрузивных породах раннеорогенного кааламского клинопироксенит-габбронорит-диоритового комплекса (возраст не более 1,9 млрд лет), прорывающих отложения сортавальской и ладожской серий, указывает на посткалевийское время заложения рудоконтролирующей структуры и формирование ее в свекофеннский (1,95–1,85 млрд лет назад) и, возможно, постсвекофеннский (1,8–1,7 млрд лет назад) периоды тектоно-метаморфической переработки.

Многократная активизация большинства элементов субплоскостной анизотропии горных пород, изменения их минерального состава,

прежде всего интенсивная графитизация в зоне сдвиговых деформаций, свидетельствуют о высокой флюидопроницаемости рудоконтролирующей структуры и ее фидерной роли.

Изотопный состав углерода из графитов Приладожья позволяет предполагать его эндогенную природу, мантийный источник и минерагenez графита в результате пиролиза ювенильного водородно-метанового флюида.

Особенности строения и развития изученной рудоконтролирующей структуры, ее эпигенетичность по отношению к вмещающим породам сортавальской серии, соответствующий мантийному изотопный состав углерода графитов свидетельствуют, что главными факторами, определявшими дискретную локализацию минерагenezа графита в гетерогенных геологических образованиях Северо-Ладжской СФЗ, были процессы сдвиговой деформации и флюидной карбонизации.

*Автор благодарит рецензентов за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.*

## Литература

- Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Северного Приладожья (геология и генетические особенности). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 172 с.
- Борисов И. В. История горного дела Северного Приладожья (XVII в. – 1939 г.). Сортавала: Ракурс, 2009. 41 с.
- Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Аристов В. В., Лаломов А. В., Мурашов К. Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 97–119. doi: 10.7868/S0016777016020027
- Галимов Э. М., Слодкевич В. В. Зональность изотопного состава углерода графита в расслоенном магматическом плутоне // Геохимия. 1988. № 8. С. 1178–1186.
- Геология и петрология свекофеннид Приладожья / Под ред. В. А. Глебовицкого. СПб.: СПбГУ, 2000. 200 с.
- Гинтов О. Б., Исай В. М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наукова думка, 1988. 228 с.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Карельская серия. Листы Р-35-XXIV, Р-36-XIX. Объяснительная записка / Сост. К. И. Степанов, Д. М. Санин, Г. Н. Санина. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 231 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минеральных ресурсов Российской Федерации в 2023 году / Гл. ред. Д. Д. Тетенькин, О. В. Казанов. М.: ВИМС, 2024. 710 с.
- Дигонский С. В., Тен В. В. Неизвестный водород (роль водорода в полиморфизме твердых веществ, процессах твердофазного восстановления оксидов и спекания порошков). СПб.: Наука, 2006. 235 с.
- Жамалетдинов А. А., Колесников В. Е., Скороходов А. А., Шевцов А. Н., Нилов М. Ю., Рязанцев П. А., Шаров Н. В., Бируля М. А., Киряков И. А. Результаты электропрофилеирования на постоянном токе в комплексе с АМТЗ по профилю, пересекающему Ладжскую аномалию // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 91–110. doi: 10.17076/geo636
- Иващенко В. И., Ручьев А. М., Лавров О. Б., Кондрашова Н. И. Рудопроявление Пякюля – новый перспективный благороднометалльный объект в Приладожье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 3. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 40–53.
- Иващенко В. И., Ручьев А. М., Лавров О. Б., Кондрашова Н. И., Терновой А. Н. Эндогенная золоторудная система Суйстамского плутонического комплекса (Северное Приладожье) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 127–146.
- Казаков А. Н. Деформации и наложенная складчатость в метаморфических комплексах. Л.: Наука, 1976. 237 с.
- Казаков А. Н., Миллер Ю. В., Дук В. Л., Харитонов А. Л. Структурная эволюция метаморфических комплексов. Л.: Наука, 1977. 159 с.
- Ковалев С. Г., Тимофеева Е. А. Первые данные по геохимии и изотопии углерода графитовых эклогитов максютовского комплекса (Южный Урал) // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2013. № 3(219). С. 8–11.
- Куличенко В. М., Петров Г. В., Пронин В. Д., Пекин Ф. Ф., Кузьмин С. Н. Поисковые работы на крупночешуйчатый графит в пределах перспективных участков Кирьяволахтинской площади (Республика Карелия): Отчет о выполнении работ по объекту, 2022–2024 гг. Кн. 1. М.: Росгеология, 2024. 250 л.
- Ладжская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) // Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
- Ларионова Ю. О., Самсонов А. В., Шатагин К. Н., Носова А. А. Изотопно-геохронологические свидетельства палеопротерозойского возраста золоторудной минерализации в архейских зеленокаменных поясах Карелии (Балтийский щит) // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 5. С. 374–396. doi: 10.7868/S0016777013050055
- Летников Ф. А., Савельева В. Б., Гореванов Д. Е., Халилов В. А. Метаморфизм и метасоматоз в зонах глубинных разломов континентальной литосферы // Геотектоника. 1996. № 5. С. 15–26.
- Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Морозов Ю. А., Гафт Д. Е. О природе гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья // Структура и петрология докембрийских комплексов / Под ред. В. В. Эза. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. С. 3–120.

Морозов Ю. А. О роли транспрессии в формировании структуры свекокарелид Балтийского щита // Геотектоника. № 4. 1999. С. 37–50.

Поцелуев А. А., Бабкин Д. И., Талибова А. Г. Изотопный состав углерода грейзеновых месторождений (Калгутинское месторождение) // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310, № 1. С. 17–21.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/142852/> (дата обращения: 12.12.2022).

Ручьев А. М. Зоны сдвиговых дислокаций: общие особенности структуры и ее формирования (на примере геологических объектов Карелии) // Третья тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Мат-лы докл. Т. 1. М., 2012а. С. 427–431.

Ручьев А. М. Образование кианитовых гнейсов в тектонофизическом аспекте (беломорский комплекс пород Балтийского щита) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 13–27.

Ручьев А. М. Структурный анализ сдвиговых зон: новый метод, первые результаты // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 15. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012б. С. 115–124.

Ручьев А. М. Структурные особенности разведочного участка и относительный возраст золоторудного месторождения Педролампи // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 92–112.

Ручьев А. М. Структурные особенности сдвиговых дислокаций, контролирующих благороднометалльную минерализацию и пегматитогенез в гнейсах чупинской свиты (беломорский комплекс пород Балтийского щита) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 12. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 2009. С. 65–87.

Ручьев А. М. Структурные особенности флюорит-сульфидного проявления Калливолампи (Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 82–98. doi: 10.17076/geo1548

Самсонов А. В., Ларионова Ю. О., Носова А. А., Ручьев А. М. Проблемы возрастной позиции и генезиса золоторудной минерализации в архейских зеленокаменных поясах Карельского блока: опыт комплексных реконструкций // Доклады МО РМО. 2011. URL: <http://www.minsoc.ru/E2-2011-10-0/> (дата обращения: 10.06.2025).

Судовиков Н. Г., Глебовицкий В. А., Сергеев А. С., Петров В. П., Харитонов А. Л. Геологическое развитие глубинных зон подвижных поясов (Северное Приладожье). Л.: Наука, 1970. 227 с.

Судовиков Н. Г. Тектоника, метаморфизм, мигматизация и гранитизация пород ладожской формации // Труды Лаборатории геологии докембрия АН СССР. Л.: АН СССР, 1954. 198 с.

Deines P. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // *Earth-Science Reviews*. 2002. Vol. 58, iss. 3–4. P. 247–278. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00064-8

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A., Belyatskii B. V., Bogomolov E. S., Borozdin A. P., Savva E. V., Lebedeva Y. M. Rb-Sr age of metasomatism and ore formation in the low-temperature shear zones of the Fenno-Karelian Craton, Baltic Shield // *Petrology*. 2014. Vol. 22, no. 2. P. 184–204.

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A., Bogomolov E. S., Belyatskii B. V., Savva E. V., Lebedeva Yu. M. Rb-Sr age of metasomatism and ore formation in low-temperature shear zones of the Fenno-Karelian Craton (Baltic Shield) // *Doklady Earth Sciences*. 2012. Vol. 445, no. 1. P. 821–825. doi: 10.1134/S1028334X12070021

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Golubev A. I. Two types of noble metal mineralization in the Kaalamo Massif (Karelia) // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 468(1). P. 441–446. doi: 10.1134/S1028334X16050111

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Lavrov O. B., Kondrashova N. I. The Päkylä ore occurrence: a new prospective type of noble metal mineralization in Precambrian rocks of Karelia // *Doklady Earth Sciences*. 2002. Vol. 384(4). P. 371–376.

## References

Biske N. S. Graphite mineralization of the Northern Ladoga Lake region (geological and genetic features). Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1987. 172 p. (In Russ.)

Borisov I. V. The history of mining in the Northern Ladoga Region (17<sup>th</sup> century – 1939). Sortavala: Rakurs; 2009. 41 p. (In Russ.)

Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murašov K. Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*. 2016;58(2):83–103. doi: 10.1134/S1075701516020021

Decree of the Government of the Russian Federation no. 2473-p, dated August 30, 2022. (In Russ.). URL: <http://government.ru/docs/all/142852/> (accessed: 12.12.2022).

Deines P. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths. *Earth-Science Reviews*. 2002;58(3–4):247–278. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00064-8

Digonsky S. V., Ten V. V. The unfamiliar hydrogen: the role of hydrogen in the polymorphism of solid materials, solid-phase reduction of oxides, and powder sintering. St. Petersburg: Nauka, 2006. 235 p.

Galimov E. M., Slodkevich V. V. Zonality of carbon isotope composition of graphite in the layered magmatic pluton. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1988;8:1178–1186. (In Russ.)

Gintov O. B. Field tectonophysics and its application in studies of crustal deformation in Ukraine. Kiev: Feniks; 2005. 572 p. (In Russ.)

Gintov O. B., Isai V. M. Tectonophysical studies of consolidated crust faults. Kiev: Naukova dumka; 1988. 228 p. (In Russ.)

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A., Belyatskii B. V., Bogomolov E. S., Borozdin A. P., Savva E. V., Lebedeva Y. M. Rb-Sr age of metasomatism and ore formation in the low-temperature shear zones of the Fenno-Karelian Craton, Baltic Shield. *Petrology*. 2014;22(2):184–204.

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A., Bogomolov E. S., Belyatskii B. V., Savva E. V., Lebedeva Yu. M. Rb-Sr age of metasomatism and ore formation in low-temperature shear zones of the Fenno-Karelian Craton (Baltic Shield). *Doklady Earth Sciences*. 2012;445(1): 821–825. doi: 10.1134/S1028334X12070021

Glebovitsky V. A. (ed.). *Geology and petrology of Ladogan Svecofennian rocks*. St. Petersburg: SPbGU; 2000. 200 p.

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Golubev A. I. Two types of noble metal mineralization in the Kaalamo Massif (Karelia). *Doklady Earth Sciences*. 2016;468(1): 441–446. doi: 10.1134/S1028334X16050111

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Lavrov O. B., Kondrashova N. I. Pyakyulya ore occurrence – a new promising noble metal object in Priladozhye. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 3. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 40–53. (In Russ.)

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Lavrov O. B., Kondrashova N. I. The Päkylä ore occurrence: a new prospective type of noble metal mineralization in Precambrian rocks of Karelia. *Doklady Earth Sciences*. 2002;384(4):371–376.

Ivashchenko V. I., Ruchyov A. M., Lavrov O. B., Kondrashova N. I., Ternovoy A. N. Endogenous gold ore system of the Suistamo plutonic complex (Northern Priladozhye). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. P. 127–146. (In Russ.)

Kazakov A. N. Deformations and superimposed folding in metamorphic complexes. Leningrad: Nauka; 1976. 237 p. (In Russ.)

Kazakov A. N., Miller Yu. V., Duk V. L., Kharitonov A. L. Structural evolution of metamorphic complexes. Leningrad: Nauka; 1977. 159 p. (In Russ.)

Kovalev S. G., Timofeeva E. A. First data on the geochemistry and carbon isotope of graphite eclogites of the Maksyutovsky complex (Southern Urals). *Vestnik IG Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013;3(219):8–11. (In Russ.)

Kulichenko V. M., Petrov G. V., Pronin V. D., Pekin F. F., Kuz'min S. N. Prospecting work for coarse flake graphite within the promising areas of the Kiri-yavolaktinskaya area (Republic of Karelia): Report on the work on the object, 2022–2024. Book 1. Moscow: Rosgeologiya, 2024. 250 p. (In Russ.)

Larionova Yu. O., Samsonov A. V., Shatagin K. N., Nosova A. A. Isotope-geochronological evidence of the Paleoproterozoic age of gold mineralization in the Archean greenstone belts of Karelia (Baltic Shield). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits*. 2013;55(5):374–396. (In Russ.). doi: 10.7868/S0016777013050055

Letnikov F. A., Savel'eva V. B., Gorevanov D. E., Khalilov V. A. Metamorphism and metasomatism in deep-seated faults of the continental crust. *Geotektonika = Geotectonics*. 1996;5:15–26. (In Russ.)

Mikhailov V. P., Aminov V. N. (eds.). *Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2: Non-metallic mineral resources. Underground waters and medical muds*. Petrozavodsk: Karelia; 2006. Book 2. 356 p. (In Russ.)

Morozov Yu. A., Gaft D. E. On the nature of granite-gneiss domes of the Northern Priladozhye. *Struktura i petrologiya dokembriiskikh kompleksov = Structure and petrology of the Precambrian complexes*. Moscow: IFZ AN SSSR; 1985. P. 3–120. (In Russ.)

Morozov Yu. A. The role of transpression in the structural evolution of the svecofennides in the Baltic Shield. *Geotektonika = Geotectonics*. 2002;4:37–50. (In Russ.)

Potseluev A. A., Babkin D. I., Talibova A. G. Isotopic composition of carbon in greisen deposits (Kalgutinskoye deposit). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2007;310(1):17–21. (In Russ.)

Ruchyov A. M. Formation of kyanite gneisses in tectonophysical aspect (Belomorian complex of rocks of the Baltic Shield). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 13. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. P. 13–27. (In Russ.)

Ruchyov A. M. Shear dislocation zones: general features of the structure and its formation (on the example of geological objects of Karelia). *Tret'ya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle: Mat-ly dokl. = Third tectonophysical conference at the IPE RAS. Tectonophysics and topical issues of Earth sciences: proceedings of the All-Russian conf.* Vol. 1. Moscow; 2012. P. 427–431. (In Russ.)

Ruchyov A. M. Structural analysis of shear zones: a new method, the initial results. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 15. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. P. 115–124. (In Russ.)

Ruchyov A. M. Structural characteristics of the Kallivolampi fluorite-sulfide occurrence, Vedlozero-Segozero greenstone belt, Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:82–98. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1548

Ruchyov A. M. Structural features of the exploration site and the relative age of the Pedrolampi gold deposit. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 14. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 92–112. (In Russ.)

Ruchyov A. M. Structural features of shear dislocations controlling noble metal mineralization and pegmatogenesis in gneisses of the Chupinskaya suite (Belomorsky complex of rocks of the Baltic Shield). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 12. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2009. P. 65–87. (In Russ.)

Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Nosova A. A., Ruchyov A. M. Problems of age position and genesis of gold ore mineralization in the Archean greenstone belts of the Karelian block: experience of complex reconstructions. *Doklady MO RMO = Proceedings MB RMS*. 2011. URL: <http://www.minsoc.ru/E2-2011-10-0/> (In Russ.)

Sharov N. V. (ed.). Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure, and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)

Stepanov K. I., Sanin D. M., Sanina G. N. (eds.) State geological map of the Russian Federation, scale 1:200 000. Second edition. Karelian series. Sheets R-35-XXIV, R-36-XIX. Explanatory note. Moscow: MF VSEGEI; 2013. 231 p. (In Russ.)

Sudovikov N. G., Glebovitskii V. A., Sergeev A. S., Petrov V. P., Kharitonov A. L. Geological development of deep zones of mobile belts (Northern Ladoga region). Leningrad: Nauka; 1970. 227 p. (In Russ.)

Sudovikov N. G. Tectonics, metamorphism, migmatization and granitization of rocks of the Ladoga formation. *Trudy Laboratorii geologii dokembriya AN*

*SSSR = Transactions of the Laboratory of Precambrian Geology of the USSR Academy of Sciences*. Leningrad: AN SSSR; 1954. 198 p. (In Russ.)

Tetenkin D. D., Kazanov O. V. (eds.). State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow: VIMS; 2024. 710 p.

Zhamaletdinov A. A., Kolesnikov V. E., Skorokhodov A. A., Shevtsov A. N., Nilov M. Yu., Ryazantsev P. A., Sharov N. V., Birulya M. A., Kiryakov I. A. Results of electric profiling using direct current in combination with AMT sounding along the profile across the Lake Ladoga anomaly. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;2:91–110. (In Russ.). doi: 10.17076/geo636

Поступила в редакцию / received: 10.07.2025; принята к публикации / accepted: 24.12.2025.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Ручьев Андрей Михайлович**

старший научный сотрудник

e-mail: [ruchyov@krc.karelia.ru](mailto:ruchyov@krc.karelia.ru)

#### **CONTRIBUTOR:**

**Ruchyov, Andrey**

Senior Researcher