

УДК 551.242 : 553.06 (470.22)

## МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ И РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОЙ СТРУКТУРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

**В. И. Иващенко**

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

Современное строение Ладожской структуры (ЛС) является результатом длительного развития (2,1–1,3 млрд лет), включавшего континентальный и окраино-океанский рифтогенез с раскрытием Свекофеннского океана и последующим конвергентным взаимодействием новообразованной океанической коры с архейским кратоном. Завершилось геологическое развитие структуры внутриплитным дискретным магматизмом (Салминский батолит, Валаамский силл, Хопунваарский некк) и локально (Вялимяки, Иокиранта, Алатту-Пякюля) проявлением каледонской эндогенной активизации. Рудоносность ЛС определяется двумя группами металлогенических систем (МС), развивавшихся в свекофеннский (2,1–1,65 млрд лет) и готский (1,65–1,20 млрд лет) тектоно-магматические циклы (ТМЦ). Всего выделяется 7 МС, связанных с соответствующим числом литогеодинимических комплексов и 15 рудообразующих систем. Самой ранней свекофеннской МС является континентально-рифтогенная в краевой части Карельского кратона – черные сланцы и базальты с V, Mo, Pd, Au. В условиях активной континентальной окраины проявлен раннеорогенный магматизм, сопровождающийся Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc (Кааламо) и Fe-Ti-V (Вялимяки) оруденением. Коллизионная МС представлена скарноидами с W, Pb, Zn в обрамлениях гнейсогранитных куполов и низкотемпературными рудосными (Au, Ag As, Sb, Te, Bi, Pd, Pt) метасоматитами в сдвиговых зонах (Алатту-Пякюля, Янис, Кааламо). Рудопродуктивность постколлизионной МС определялась внедрением шошонитовых интрузий (Элисенваара: P, La, Ce) и лейкогранитов (Латвасюрья: W, Pb, Zn, Be, Bi; Иокиранта: Li, Ta, Nb). Главная МС Готского ТМЦ в Приладожье континентально-рифтогенная в связи с анортозит-рапакивигранитным комплексом характеризуется наиболее широким рудным (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, флюорит, графит) спектром. МС структурно-формационного несогласия представлена месторождением урана Карку. К МС приразломных метасоматитов относятся урановое месторождение Мраморная горка и несколько проявлений с U-Pb-Zn-(±As, Au)-оруденением в Рускеальско-Салминской тектонической зоне. Наиболее перспективными в Ладожской структуре являются три МС – активной континентальной окраины (Pt, Pd, Au, As), коллизионная (Pt, Pd, Au, As) и континентально-рифтогенная (Sn, Zn, In, Be, Nb).

Ключевые слова: металлогеническая система; рудообразующая система; литогеодинимический комплекс; Ладожская структура; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Иващенко В. И. Металлогенические и рудообразующие системы Ладожской структуры Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 69–73. doi: 10.17076/geo2179

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

## V. I. Ivashchenko. METALLOGENIC AND ORE-FORMING SYSTEMS OF THE LADOGA STRUCTURE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

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

The modern structure of the Ladoga structure (LS) is the result of long-term development (2.1–1.3 Ga), including continental and marginal-oceanic rifting with the opening of the Svecofennian Ocean and subsequent convergent interaction of the newly formed oceanic crust with an Archean craton. The geological development of the structure ended with intraplate discrete magmatism (Salma batholith, Valaam sill, Khopunvaar neck) and locally (Välimäki, Iokiranta, Alattu-Päkylä) with Caledonian endogenous activation. The ore-bearing capacity of the structure is underpinned by two groups of metallogenic systems (MS) which developed during the Svecofennian (2.1–1.65 Ga) and Gothian (1.65–1.2 Ga) tectonic-magmatic cycles (TMC). In total, seven MSs are distinguished, associated with the corresponding number of lithogeodynamic complexes and 15 ore-forming systems. Of these, the most promising are three MSs – active continental margin (Pt, Pd, Au, As), collisional (Pt, Pd, Au, As, W), and continental-riftogenic (Sn, Zn, In, Be, Nb). The continental-rift-related system at the Karelian Craton margin (black shales and basalts with V, Mo, Pd and Au) is the earliest Svecofennian MS. Early orogenic magmatism, accompanied by Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc (Kaalamo) and Fe-Ti-V (Välimäki) mineralization, occurred in an active continental margin environment. The collisional MS consists of skarnoids with W, Pb, Zn at the margins of gneissose granite domes and low-temperature ore-bearing (Au, Ag, As, Sb, Te, Bi, Pd and Pt) metasomatic rocks in shear zones (Alattu-Päkylä, Janis, Kaalamo). The ore productivity of the post-collisional MS was controlled by the emplacement of shoshonite intrusions (Elisenvaara: P, La, Ce) and leucogranites (Latvasurja: W, Pb, Zn, Be, Bi; Iokiranta: Li, Ta and Nb). The main MS of the Gothian TMC in the Lake Ladoga area is continental-rift-related, linked with an anorthosite-rapakivi granite complex, and displaying a wider ore spectrum (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, fluorite and graphite) (Pitkäranta). The metallogenic structural-formational unconformity system is represented by the Karku uranium deposit. The metallogenic near-fault metasomatic rock system comprises the Mramornaya Gorka uranium deposit and several occurrences with U-Pb-Zn-(±As, Au) mineralization in the Ruskeala-Salmi tectonic zone. Three MSs hold the greatest promise within the Ladoga structure – the active continental margin MS (Pt, Pd, Au, As), collisional MS (Pt, Pd, Au, As, W), and continental-riftogenic MS (Sn, Zn, In, Be, Nb).

**Keywords:** metallogenic system; ore-forming system; lithogeodynamic complex; Ladoga structure; Fennoscandian Shield

**For citation:** Ivashchenko V. I. Metallogenic and ore-forming systems of the Ladoga structure of the Fennoscandian Shield. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 69–73. doi: 10.17076/geo2179

**Funding.** The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Institute of Geology KarRC RAS).

Современное строение Ладожской структуры (ЛС) является результатом длительного развития (2,1–1,3 млрд лет), включавшего континентальный и окраинно-океанский рифтогенез с раскрытием свекофеннского океана и последующим конвергентным взаимодействием новообразованной океанической

коры с архейским кратоном [Nironen, 1997]. Соответственно, образование структурно-вещественных комплексов происходило при этом в несколько этапов, завершившихся закрытием океана с формированием аккреционно-коллизийного орогена, пост-коллизийным апплифтом, кратонизацией и

внутриплитным дискретным магматизмом (Салминский батолит, Валаамский силл, Хопунваарский нект) и локально (Вялимяки, Иокиранта, Алатту-Пякюля) проявлением каледонской эндогенной активизации [Виноградов и др., 1959; Балтыбаев и др., 2021]. В последние годы [Lahtinen et al., 2011 и др.] обосновывается более сложная модель формирования Свекофеннского орогена, частью которого является ЛС, в ходе пяти частично перекрывающихся во времени орогений, включавших континентальный рифтинг, микроконтинентальную аккрецию, расширение аккретированной коры и столкновение континентов.

С этих позиций рудоносность ЛС определяется двумя группами металлогенических систем (МС), развивавшихся в свекофеннский (2,1–1,65 млрд лет) и готский (1,65–1,20 млрд лет) тектоно-магматические циклы (ТМЦ) (табл.). В соответствии с представлениями [Митчелл, Гарсон, 1984; Deng et al., 2011, 2020; Lahtinen et al., 2011; Yusheng et al., 2013; Huston et al., 2016 и др.] о тесной взаимосвязи геодинамических и рудообразующих процессов и различных типов месторождений с определенными литогеодинамическими комплексами (ЛГДК) совокупность рудообразующих факторов и рудных объектов, связанных с ними, понимается как МС. В этом аспекте ЛГДК с их геохимическими ресурсами представляются как рудоформирующий базис МС, определяющий их рудный потенциал. МС может включать одну или несколько рудообразующих систем (РС). РС – это генерируемая эндогенными процессами в определенном временном интервале и единая общностью геологического пространства, источников энергии и рудного вещества закономерная ассоциация магматических, метаморфо-метасоматических, флюидных и структурно-вещественных факторов, приводящих при благоприятных условиях к формированию оруденения. Каждой рудообразующей системе, как единой целостной с определенной устойчивостью структуре, свойственны специфические составляющие элементы, типы их связей, пространственно-временные соотношения и свои особенности развития. Она характеризуется наличием градиентного теплового поля, благоприятной среды и рудоносного флюида.

Большинство рудных объектов ЛС размещены в Раахе-Ладожской надсубдукционной зоне, имеющей коллажированное строение, отражающее совокупный результат проявления всех геологических процессов в этой структуре.

Свекофеннский ТМЦ (2,1–1,65 млрд лет). Самой ранней МС Ладожской структуры является континентально-рифтогенная, связанная с черносланцево-базальтовым ЛГДК, развитым в краевой части Карельского кратона и содержащим комплексное (графит, V, Mo, Pd, Au) стратиформное оруденение (Леппясюрья, Ковадъярви) с повышенным содержанием V (0,2 %), Mo (0,03 %), Ag (до 70 г/т), Au (до 0,3 г/т),  $\Sigma$ Pd,Pt (до 1,5 г/т), Sc (до 200 г/т). Биотит содержит ~ 1 % V.

С МС активной континентальной окраины в связи с тоналит-ультрамафит-мафитовым плутоническим ЛГДК образованы Fe-Ti-V-месторождение (Вялимяки,  $\Sigma$ Pt,Pd,Au до 1 г/т), Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc-проявления (Кааламский интрузив,  $\Sigma$ Pt,Pd,Au 0,1–0,6 г/т, Sc 70–110 г/т) и Mo-W-As-Au-оруденение порфирирового типа (интрузии Алатту-Пякюля, Янис; Au до 1,5 г/т) с «невидимым» золотом в арсенопирите.

Коллизионная МС проявлена формированием скарноидов с W-Pb-Zn-оруденением в обрамлении гнейсогранитных куполов и сдвиговых зон с рудоносными (Au, Ag, As, Sb, Te, Bi, Pd, Pt) метасоматитами в тоналитах, метапироксенитах и горнблендитах Кааламского комплекса, метабазальтах сортавальской и турбидитах ладожской серий. При этом содержание  $\Sigma$ Pt,Pd,Au в амфиболовых метасоматитах Кааламского интрузива возрастает до > 10 г/т, а самородного золота в березитах Алатту-Пякюля – до 33 г/т.

Рудопродуктивность постколлизионной МС определялась внедрением лейкогранитов, сопровождавшихся редкометалльными (Li, Ta, Nb) пегматитами и скарнами (W, Be) на севере ЛС, и интрузий шошонитовой серии (Элинсенаара) с субэкономическими содержаниями REE и фосфора в ее юго-западной части.

Готский ТМЦ (1,65–1,2 млрд лет). Континентально-рифтогенная МС в связи с анортозит-рапакивигранитным комплексом характеризуется наиболее широким рудным (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, флюорит, графит) спектром и высоким рудным потенциалом. Наряду с традиционными для этой системы ранее уже добывавшимися полезными ископаемыми (Fe, Cu, Sn, Ag) она имеет промышленные перспективы на In, Zn, Ta, Nb, Li, REE, Be, Ti, V, флюорит и графит.

МС структурно-формационного несогласия представлена месторождением урана Карку, расположенным в периферийной части рифейского Ладожского прогиба, входящего в Финско-Ботническо-Балтийскую рифтовую систему.

Главные металлогенические и рудообразующие системы Ладожской структуры  
Major metallogenic and ore-forming systems of the Ladoga structure

ТМЦ TMC	Металлогеническая система (возраст) Metallogenic system (age)	Литогеодинамический комплекс Lithogeodynamic complex	Рудообразующая система Ore-forming system	Рудные объекты Ore objects
Готский Gothic	Тектоногенная – приразломных метасоматитов (<1,25 млрд лет) Tectonic – fault metasomatites (<1.25 Ga)	Пропилитовый в сдвиговых зонах по амфиболитам и доломитам Propylitic in shear zones on amphibolites and dolomites	Гидротермально-метасоматическая Hydrothermal-metasomatic	U, Pb, Zn, Au, P Мраморная горка, Варалахти, Путролампи Mramornaya Gorka, Varalakhti, Putrolampi
	Структурно-формационного несогласия (1,4–0,4 млрд лет) Structural-formational disagreement (1.4–0.4 Ga)	Терригенно-базальтовый Terrigenous-basaltic	Гидротермально-метасоматическая инфильтрационная Hydrothermal-metasomatic infiltration	U, Mo, Pd Карку Karku
	Континентально-рифтогенная (1,54–1,48 млрд лет) Continental riftogenic (1.54–1.48 Ga)	Анортозит-рапакивигранитный Anorthosite-rapakivi granite	Скарново-грейзенная Skarn-greisen	Sn, Zn, In, Be, Ag, Au Питкяранта Pitkyaranta
Li-F-гранитов Li-F granites			Ta, Nb, Li, REE Мюзилампи, Хепаоя Myuzilampi, Khepaoya	
Магматическая габбро-анортозитовая Magmatic gabbro-anorthosite			Ti, Fe, P Вагозерское, Железная гора Vagozerskoe, Zheleznaya Gora	
Свекофеннский Svecofennian	Постколлизийная (1,8–1,78 млрд лет) Post-collision (1.8–1.78 Ga)	Лейкогранит-шошонитовый Leucogranite-shoshonite	Скарновая Skarn	W, Pb, Zn, Be, Mo, Bi Латвасюръя, Яккима Latvasyur'ya, Yakkima
			Пегматитовая Pegmatite	Li, Ta, Nb Иокиранта Iokiranta
			Магматическая шошонитовая Magmatic shoshonite	P, Ce, La Элисенваара Elisenvaara
	Коллизийная (1,87–1,83 млрд лет) Collision (1.87–1.83 Ga)	Тектоно-метасоматический Tectonic-metasomatic	Скарноидная Scarnoid	Pb, Zn, Cu, W Рюттю, Иокиранта Ryuttyu, Iokiranta
			Пропилит-березитовая орогенная Propylite-berezite orogenic	Au, Ag, As, Sb, Te, Bi Алатту-Пякюля, Янис Alattu-Pyakyulya, Yanis
			Метасоматическая амфиболитовая Metasomatic amphibolite	Pd, Pt, Au, Bi Кааламский комплекс Kaalamskii kompleks
	Активной континентальной окраины (1,89–1,88 млрд лет) Active continental margin (1.89–1.88 Ga)	Тоналит-ультрамафит-мафитовый вулканоплутонический Tonalite-ultramafic-mafic volcano-plutonic	Порфировая Porphyry	Mo, As, Au, W Алатту-Пякюля, Янис Alattu-Pyakyulya, Yanis
			Магматическая горнблендитовая Magmatic hornblendite	Pd, Pt, Au, Cu, Ni Кааламский комплекс Kaalamskii kompleks
			Магматическая пироксенитовая Magmatic pyroxenite	Fe, Ti, V Вялимяки Vyalimyaki
Континентально-рифтогенная (2,1–1,92 млрд лет) Continental riftogenic (2.1–1.92 Ga)	Черносланцево-базальтовый Black schists-basalt	Вулканогенно-осадочная стратиформная Volcanic-sedimentary stratiform	Графит/graphite, V, Mo, Pd, Pt, Au Леппясюръя, Ковадъярви Leppyasyur'ya, Kovad"yarvi	

К МС приразломных метасоматитов относятся мелкое урановое месторождение Мраморная горка и несколько проявлений урана (Виссу, Путролампи и др.) в Рускеальско-Салминской тектонической зоне северо-западного простирания.

Из перечисленных МС Приладожья наиболее перспективными являются три МС – активной континентальной окраины (Pt, Pd, Au, As), коллизионная (Pt, Pd, Au, As, W) и континентально-рифтогенная (Sn, Zn, In, Be, Nb).

## Литература

Балтыбаев Ш. К., Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Васильева И. М., Ризванова Н. Г., Алексеев И. А., Кириллова П. А. Два этапа золотосульфидной минерализации в раннепротерозойских габброидах Северного Приладожья // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66(3). С. 559–577. doi: 10.21638/spbu07.2021.307

Виноградов А. П., Тарасов Л. С., Зыков С. И. Изотопный состав рудных свинцов Балтийского щита // Геохимия. 1959. № 7. С. 577–607.

Митчелл А., Гарсон М. Глобальные тектонические позиции минеральных месторождений. М.: Мир, 1984. 496 с.

Deng J., Wang Q., Xiao C., Yang L., Huan Liu H., Qingjie Gong Q., Zhang J. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China // *Int. Geol. Rev.* 2010. Vol. 53, no. 5-6. P. 449–476. doi: 10.1080/00206814.2010.501538

Deng J., Yang L.-Q., Groves D. I., Zhang L., Qiu K.-F., Wang Q.-F. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China // *Earth-Science Rev.* 2020. Vol. 208. Art. 103274. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103274

Huston D. L., Mernagh T. P., Steffen G., Hagemann S. G., Doublier M. P., Fiorentini M., Champion D. C., Jaques A. L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // *Ore Geol. Rev.* 2016. Vol. 76. P. 168–210. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.005

Lahtinen R., Hölttä P., Kontinen A., Niiranen T., Nironen M., Saalman K., Sorjonen-Ward P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian Shield: key questions with emphasis on Finland // *Geol. Surv. Fin. Special Paper* 49. 2011. P. 23–33.

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model // *Precamb. Res.* 1997. Vol. 86, no. 1-2. P. 21–44. doi: 10.1016/S0301-9268(97)00039-9

Yusheng Z., Jun D., Jianping W., Runmin P., Zhenjiang L. Theory of metallogenic systems: principles and applications to mineral exploration // 12<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting. 2013. Vol. 1. P. 40–43.

## References

Baltybaev Sh. K., Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Vasil'eva I. M., Rizvanova N. G., Alekseev I. A., Kirillova P. A. Two stages of gold sulfide mineralization in the Early Proterozoic gabbros of the Northern Ladoga region. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vest. St. Petersburg Univ. Geosciences.* 2021;66(3): 559–577. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2021.307

Deng J., Yang L.-Q., Groves D. I., Zhang L., Qiu K.-F., Wang Q.-F. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Science Rev.* 2020;208: 103274. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103274

Deng J., Wang Q., Xiao C., Yang L., Huan Liu H., Qingjie Gong Q., Zhang J. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China. *Int. Geol. Rev.* 2010;53(5-6):449–476. doi: 10.1080/00206814.2010.501538

Huston D. L., Mernagh T. P., Steffen G., Hagemann S. G., Doublier M. P., Fiorentini M., Champion D. C., Jaques A. L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. *Ore Geol. Rev.* 2016;76: 168–210. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.005

Lahtinen R., Hölttä P., Kontinen A., Niiranen T., Nironen M., Saalman K., Sorjonen-Ward P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian Shield: key questions with emphasis on Finland. *Geol. Surv. Fin.* 2011; 49:23–33.

Mitchell A., Garson M. Global tectonic positions of mineral deposits. Moscow: Mir; 1984. 496 p. (In Russ.)

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model. *Precamb. Res.* 1997;86(1-2):21–44. doi: 10.1016/S0301-9268(97)00039-9

Vinogradov A. P., Tarasov L. S., Zykov S. I. Isotopic composition of ore lead in the Baltic Shield. *Geokhimiya = Geochemistry.* 1959;7:577–607. (In Russ.)

Yusheng Z., Jun D., Jianping W., Runmin P., Zhenjiang L. Theory of metallogenic systems: principles and applications to mineral exploration. 12<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting. 2013;1:40–43.

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Ивашченко Василий Иванович

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: ivashche@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

Ivashchenko, Vasily

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher