

УДК 552.48:551.24:551.71/72

ЛАПЛАНДСКО-КОЛЬСКАЯ ОРОГЕНИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ БЕЛОМОРСКИХ ЭКЛОГИТОВ, СЕВЕРО-ВОСТОК ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

А. А. Щипанский

Геологический институт РАН (Пыжевский пер., 7, Москва, Россия, 109017)

Беломорский подвижный пояс (БПП) представляет собой пояс высокоградных пород, сложенный преимущественно мезо- и неоархейскими тоналит-трондьемит-гранодиоритовыми (ТТГ) гнейсами, в которых запечатаны многочисленные блоки ретроградно измененных эклогитов (ретроэклогитов), что определяет уникальность БПП, поскольку в других подобных архейских областях мира эклогиты неизвестны. До сих пор происхождение беломорских эклогитов связывалось с субдукцией палеопротерозойской океанической коры с последующей коллизией Лапландско-Кольской и Карельской литосферных плит, что предполагает поздне-палеопротерозойский возраст эклогитов. Этой модели противоречат критически важные данные, вытекающие из тектонического анализа северо-восточной части литосферы Фенноскандинавского щита. Во-первых, распространение ретроэклогитов ограничено архейской литосферой. Во-вторых, протолиты ретроэклогитов являются гиперстен-нормативными, а основные расплавы Лапландско-Кольского палеоокеана – нефелин-нормативными. В-третьих, сейсмическая картина в области наибольшего распространения эклогитов не обнаруживает ни малейших свидетельств тектонического расслоения коры. Новая модель происхождения БПП связывается с формированием в людиковии антиформного форланда Лапландско-Кольского компрессионного орогена (ЛКО) в результате девиаторного ортогонального сжатия (тектонического давления) Лапландско-Кольской и Карельской литосферных плит. В наибольшей степени тектоническому давлению была подвержена область Северо-Беломорского синтаксиса, где в ТТГ-гнейсах архея расположено большинство тел ретроэклогитов. Здесь фиксируется флексурный изгиб архейской литосферы, приведшей к ее геометрическому укорочению на ~10 %, вызвав значительное усиление дислокационной ползучести не только в ее коровой, но и в мантийной части, и активизацию флюидной активности. Ретроэклогиты БПП имеют двойственную природу: (1) изначально эклогиты образовались в результате глубокой и, вероятно, холодной субдукции архейской океанической коры как значимый компонент алмазонасной литосферной мантии; (2) их выведение на поверхность происходило длительное время с заметным продвижением в процессе Лапландско-Кольской орогении по законам неньютоновской реологии.

Ключевые слова: тектоника орогенеза; ранний докембрий; литосфера; форланд; эклогит; тектоническое давление; флюидная активность

Для цитирования: Щипанский А. А. Лапландско-Кольская орогения и происхождение Беломорских эклогитов, северо-восток Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 164–167. doi: 10.17076/geo2166

Финансирование. Работа осуществлялась в рамках госзадания АААА-А20-120030690018-2.

A. A. Shchipansky. LAPLAND-KOLA OROGENY AND THE ORIGIN OF BELOMORIAN ECLOGITES, NORTH-EASTERN FENNOSCANDIAN SHIELD

Geological Institute, Russian Academy of Science (7 Pyzhevsky Per., 109017 Moscow, Russia)

The Belomorian mobile belt is defined as the belt of high-grade metamorphic rocks, made up predominantly of Meso- to Neoproterozoic tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) gneisses with numerous blocks of strongly retrogressed eclogites (retro-eclogite) sealed inside them. We highlight that the genesis of the Belomorian mobile belt was triggered by a far-field stress resulting in emergence of the fore-bulge belt during the development of the Lapland-Kola compressional orogeny and the related flexure of the Archean lithosphere. This led to ~10 % shortening of the Archean lithosphere, culminating both in significant enhancement of the dislocation creep rate in its crustal level and compaction-derived fluid activity. The tectonic pressure was maximal in the North-Belomorian syntax area, which contains an overwhelming majority of eclogite blocks sealed in the Meso- to Neoproterozoic TTG gneisses.

Keywords: Orogenic tectonics; Early Precambrian; lithosphere; foreland; eclogite; tectonic pressure; fluid activity

For citation: Shchipansky A. A. Lapland-Kola orogeny and the origin of Belomorian eclogites, North-Eastern Fennoscandian Shield. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 164–167. doi: 10.17076/geo2166

Funding. The studies were carried out under state assignment AAAA-A20-120030690018-2.

Для того чтобы непротиворечиво объяснить происхождение такого уникального явления, как беломорские эклогиты, необходимо понять тектоническую природу ББП, а не основываться только на петрологических представлениях о РТ-параметрах их пикового метаморфизма, которые базируются на постулировании моноциклической петли эволюции эклогитового метаморфизма, что может быть валидным для молодых орогенов, но не является релевантным для древних полиметаморфических областей, подобных ББП.

Имеющиеся данные по литостратиграфии осадочно-вулканогенных разрезов людиковия (орозиния) Лапландско-Кольского компрессионного орогена (ЛКО), их геохимии и режимах частичного плавления мантии этого времени, как и данные по глубинной структуре ББП, не обнаруживают признаков субдукционных процессов, что до сих пор служило «петролого-субдукционным объяснением» палеопротерозойского происхождения беломорских ретроэклогитов [Щипанский, 2025]. Так, мафит-ультрамафиты людиковия являются нефелин-нормативными, а ретроэклогиты Беломорского пояса, как и ксенолитовые эклогиты из кимберлитовых трубок, – гиперстен-нормативными.

Необходимо различать собственно эклогиты, которые претерпели сильные ретроградные синскладчатые изменения, и эклогитизацию,

которая приводила к появлению массивных эклогитоподобных пятен возраста ~ 1,9 млрд лет, чаще всего в интрузивных породах раннего палеопротерозоя, что является частным проявлением глубинного метасоматоза, широко известного в ББП [Бушмин, 1987; Астафьев, Воинова, 2020] (локальное термодинамическое равновесие и инфильтрационный метасоматоз для открытых систем в земной коре) [Коржинский, 1973].

Тектогенез ББП был связан с формированием «выпученного» форланда (fore-bulge) Лапландско-Кольского компрессионного орогена и флексуризацией архейской литосферы, приведшей к ее укорочению на ~ 10 %, вызвав значительное усиление дислокационной ползучести (псевдопластичности) ее коровой части и активизацию флюидной активности [см. Pettrini, Podladchikov, 2000]. Тектоническое/избыточное давление в орогенической коре должно приводить не только к ее масштабной эксгумации, но и к активизации флюидной фазы в результате уплотнения минеральной среды, миграция которой может осуществляться не только к поверхности, но и в глубь коры [Connolly, Podladchikov, 2004]. Ключевым физическим параметром, определяющим амплитуду воздействия девиаторного давления, является длительность его воздействия [Brown, 2001].

В наибольшей степени этот процесс был выражен в области Северо-Беломорского

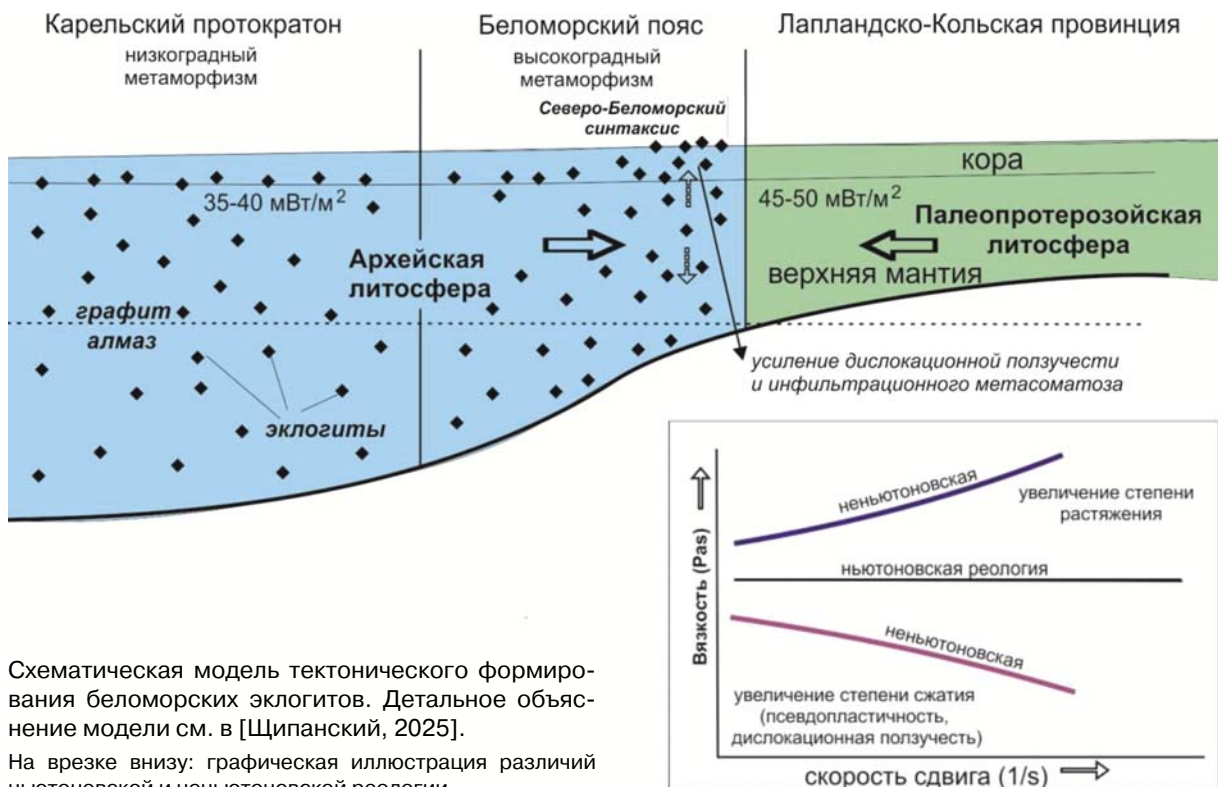
синтаксиса, где в ТТГ-гнейсах архея расположено подавляющее количество тел ретроэклогитов, которые зачастую ассоциируют с мантийными пироксенитами и перидотитами. Очевидным доказательством вовлечения мантийных пород в тектогенез ретроэклогитов являются их находки в виде включений в блоках мантийных перидотитов, демонстрирующие участие пород СКЛМ (субконтинентальной литосферной мантии) в процессе выведения эклогит-серогнейсовой ранней континентальной коры на поверхность.

Известно, что эклогиты в архейской сублитосферной мантии Карельского кратона, как и других кратонов мира, присутствуют в значительных количествах, не менее 28 % объема СКЛМ [Lee, 2003], но единственным известным способом доставки эклогитов к поверхности являются кимберлитовые и лампроитовые трубки взрыва. Однако беломорские ретроэклогиты представляют собой уникальное явление, указывающее на возможность их выведения на поверхность механизмом компрессионного сжатия литосферы ЛКО в условиях длительной дислокационной ползучести орогенической коры, т. е. по законам неньютоновской реологии [Mancktelow, 2008; Moulas et al., 2019] (рис.). В противном случае возникает неразрешимый вопрос о том, каким образом

эклогиты с плотностью $\sim 3,5 \text{ г/см}^3$ залегают в ТТГ-гнейсах с плотностью $\sim 2,8 \text{ г/см}^3$.

Эволюция беломорских эклогитов имела длительную историю, около 1 млрд лет. Возраст их образования геологически ограничивается возрастом вмещающих их ТТГ-гнейсов, т. е. мезо- и неоархеем, когда формировалась ранняя континентальная кора и подстилающая ее алмазоносная холодная СКЛМ, характеризующаяся низким тепловым потоком. Последующая их история запечатлена в изотопно-геохронологических метках циркона, который демонстрирует отчетливые пики глобальных тектонических событий от времен формирования суперконтинента Кенорленд, его распада и до начала формирования суперконтинента Нуна/Колумбия, когда в орозии появились первые орогенические пояса в истории Земли.

Таким образом, ретроэклогиты ББП имеют двойственную природу. Во-первых, изначально они образовались в результате глубокой и, вероятно, холодной субдукции архейской океанической коры как значимый компонент алмазоносной СКЛМ. Во-вторых, их выведение на поверхность происходило длительное время с заметным продвижением в процессе тектогенеза ЛКО, что физически хорошо описывается законами неньютоновской реологии.



Схематическая модель тектонического формирования беломорских эклогитов. Детальное объяснение модели см. в [Шчипанский, 2025].

На врезке внизу: графическая иллюстрация различий ньютоновской и неньютоновской реологии

Schematic model of the tectonic genesis of the Belomorian eclogites. See details in [Shchipsansky, 2025].

Lower inset: plot of viscosity versus shear rate explaining the difference between Newtonian and non-Newtonian reologies

Литература

Астафьев Б. Ю., Воинова О. А. Климковский метасоматический комплекс Беломорского подвижного пояса: состав, возраст, геологическая позиция // Геотектоника. 2025. № 1. С. 23–40. doi: 10.31857/S0016853X20010038

Бушмин С. А. Минеральные фации метасоматитов, связанных с региональным метаморфизмом // Записки ВМО. 1987. Вып. 5. С. 585–601.

Коржинский Д. С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 288 с.

Щипанский А. А. Тектогенез Беломорского подвижного пояса и происхождение беломорских эклогитов (северо-восток Балтийского щита) // Геотектоника. 2025. № 4. С. 3–28. doi: 10.1134/S0016852125700232

Brown C. D. Thermal controls on flexure of underthrust continental lithosphere // Geophys. J. Int. 2001. Vol. 146. P. 813–826.

Connolly J. A. D., Podladchikov Y. Y. Fluid flow in compressive tectonic settings: Implications for mid-crustal seismic reflectors and downward fluid migration // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2004. Vol. 109. B0420. doi: 10.1029/2003JB002822.

Lee C.-T. A. Compositional variation of density and seismic velocities in natural peridotites at STP conditions: Implications for seismic imaging of compositional heterogeneities in the upper mantle // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, no. B9. doi: 10.1029/2003JB002413

Mancktelow N. S. Tectonic pressure: theoretical concepts and modelled examples // Lithos. 2008. Vol. 103. P. 149–177. doi: 10.1016/j.lithos.2007.09.013

Moulas E., Schmalholz S., Podladchikov Y., Tajčmanová L., Kostopoulos D., Baumgartner L. Relation between mean stress, thermodynamic, and lithostatic pressure // J. Metamorph. Geol. 2019. Vol. 37. P. 1–14. doi: 10.1111/jmg.12446

Petrini K., Podladchikov Yu. Lithospheric pressure–depth relationship in compressive regions of thickened crust // J. Metamorph. Geol. 2000. Vol. 18. P. 67–77. doi: 10.1046/j.1525-1314.2000.00240.x

References

Astafiev B. Yu., Voinova O. A. Klimovskii metasomatic complex of the Belomorian Mobile Belt: composition, age, geological position. *Geotectonics*. 2020;54(1): 19–34. doi: 10.1134/S0016852120010033

Brown C. D. Thermal controls on flexure of underthrust continental lithosphere. *Geophys. J. Int.* 2001; 146:813–826.

Bushmin S. A. Mineral facies of metasomatites related to regional metamorphism. *Zapiski VMO = Proceedings of the All-Union Mineralogical Society*. 1987;5: 585–601. (In Russ.)

Connolly J. A. D., Podladchikov Y. Y. Fluid flow in compressive tectonic settings: Implications for mid-crustal seismic reflectors and downward fluid migration. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2004;109:B0420. doi: 10.1029/2003JB002822.

Korzhinskii D. S. Theoretical basis for the analysis of the paragenesis of minerals. Moscow: Nauka; 1973. 288 p. (In Russ.)

Lee C.-T. A. Compositional variation of density and seismic velocities in natural peridotites at STP conditions: Implications for seismic imaging of compositional heterogeneities in the upper mantle. *J. Geophys. Res.* 2003;108:B9. doi: 10.1029/2003JB002413

Mancktelow N. S. Tectonic pressure: theoretical concepts and modelled examples. *Lithos*. 2008;103: 149–177. doi: 10.1016/j.lithos.2007.09.013

Moulas E., Schmalholz S., Podladchikov Y., Tajčmanová L., Kostopoulos D., Baumgartner L. Relation between mean stress, thermodynamic, and lithostatic pressure. *J. Metamorph. Geol.* 2019;37:1–14. doi: 10.1111/jmg.12446

Petrini K., Podladchikov Yu. Lithospheric pressure–depth relationship in compressive regions of thickened crust. *J. Metamorph. Geol.* 2000;18:67–77. doi: 10.1046/j.1525-1314.2000.00240.x

Shchipansky A. A. Tectonic origin of the Belomorian Mobile Belt and Belomorian eclogites (northeast of the Baltic Shield). *Geotektonika = Geotectonics*. 2025;4: 3–28. (In Russ.). doi: 10.1134/S0016852125700232

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Щипанский Андрей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: shchipansky@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Shchipansky, Andrey

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