



## ВЕТРЕННЫЙ ПОЯС — ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ УНИКАЛЬНЫХ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

С.В. МЕЖЕЛОВСКАЯ<sup>1,\*</sup>, К.И. ЮШИН<sup>1,2</sup>, А.Д. МЕЖЕЛОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН «Геологический институт» Российской академии наук  
7, стр. 1, пер. Пыжевский, г. Москва 119017, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»  
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

### АННОТАЦИЯ

Приведена история открытия и развития геологических гипотез об условиях формирования одной из крупнейших палеопротерозойских структур Фенноскандинавского щита — Ветреного пояса. Показана его уникальность по отношению к одновозрастным осадочно-вулканогенным структурам региона, заключающаяся в формировании вулканитов со структурой «спинифекс», типичной для архейских образований. Для Ветреного пояса установлены уникальные по составу породы с хорошей сохранностью первичных структур и минералов. В ходе проведенного эксперимента доказана принадлежность вулканических пород к коматиитовой серии. Рассмотрены проблемы стратиграфических и тектонических схем, часть из которых остаются до настоящего времени дискуссионными. Проведенное исследование изотопного состава детритового циркона методом LA-ICP-MS из метатерригенных пород Ветреного пояса позволяет предположить спокойные тектонические обстановки седиментации, стабильный уровень эрозионного среза, а возраст образования структуры — как сумийский.

**Ключевые слова:** Фенноскандинавский (Балтийский) щит, Восточная Карелия, Ветренный пояс, палеопротерозой, стратиграфия, геохронология, коматиит-базальтовая серия, спинифекс-структуры, история изучения, детритовый циркон

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Для цитирования:** Межеловская С.В., Юшин К.И., Межеловский А.Д. Ветренный пояс — геологическое наследие уникальных тектоно-магматических процессов палеопротерозоя Фенноскандинавского щита. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2024;66(1):20—34. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-20-34>

Статья поступила в редакцию 15.02.2024

Принята к публикации 15.03.2024

Опубликована 29.04.2024

\* Автор, ответственный за переписку

## VETRENY BELT AS A GEOLOGICAL HERITAGE OF UNIQUE PALEOPROTEROZOIC TECTONOMAGMATIC PROCESSES IN THE FENNOSCANDIN SHIELD

SOFYA V. MEZHELOVSKAYA<sup>1,\*</sup>, KIRILL I. YUSHIN<sup>1,2</sup>, ALEXEY D. MEZHELOVSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Geological Institute of the Russian Academy of Sciences  
7/1, Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia*

<sup>2</sup> *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting  
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

### ABSTRACT

We presented the history of discovery and development of geological hypotheses about the conditions of formation of one of the largest Paleoproterozoic structures of the Baltic Shield — the Vetreny Belt. Its uniqueness in relation to the same-age sedimentary-volcanogenic structures of the region is shown, consisting of the formation of volcanics with the spinifex structure, typical only for Archean formations. The unique composition of rocks with good preservation of primary structures and minerals was established for the Vetreny Belt. The experiment proved that volcanic rocks belong to the komatiite series. The problems of stratigraphic and tectonic schemes were considered, some of which are still debatable. The study of the isotopic composition of detrital zircon by LA-ICP-MS from metaterrigenous rocks of the Vetreny Belt hypothesizes calm tectonic conditions of sedimentation, a stable level of erosional shearing, and the age of formation of the structure being Sumian.

**Keywords:** Fennoscandin (Baltic) shield, East Karelia, Vetreny belt, paleoproterozoic, stratigraphy, geochronology, komatiite-basalt series, spinifex structures, history of study, detrital zircon

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Financial disclosures:** no financial support was provided for this study.

**For citation:** Mezhelevskaya S.V., Yushin K.I., Mezhelevsky A.D. Vetreny belt as a geological heritage of unique paleoproterozoic tectonomagmatic processes in the Fennoscandin shield. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(1):20—34. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-20-34>

*Manuscript received 15 February 2024*

*Accepted 15 March 2024*

*Published 29 April 2024*

\* Corresponding author

### Первое упоминание Ветреного пояса

В далеком 1928 году Михаилом Николаевичем Карбасниковым на месте предполагаемой заболоченной равнины был обнаружен хребет, обращенный к морю. Благодаря его усилиям и пристальному изучению протяженной возвышенности хребет нашел свое место на карте, а произошло это только в 1940 г. Пояс, получил название Ветренный, прослежен от р. Нюхча на северо-западе до р. Онега на юго-востоке. Административно он расположен в Архангельской области и в Республике Карелия. Слово «пояс» в переводе со старорусского

обозначало горный хребет, а издревле заселившиеся здесь поморы хорошо видели протяженную возвышенность с моря, полагая, что пояс овеян ветром, отсюда и пошло такое название [11]. Первое геологическое изучение Ветреного пояса относится к довоенному времени. Территорию изучали В.С. Трофимов (1939 г.), Н.В. Альбов (1937, 1940 гг.) и А.Г. Бетехтин (1940 г.), были описаны разрезы вулканических пород и сланцев, относящихся к протерозойскому комплексу. Пояс был отделен от беломорских гнейсов системой крупных разрывов сбросового типа.

**Геологические открытия.** Комплексное и детальное изучение Ветреного пояса было продолжено в послевоенный период (1949—1960 гг.). В это время была выполнена геологическая съемка масштаба 1:200 000 (А.П. Пекуров, 1953, 1956 г.; Г.А. Бойда, 1957 г.; В.В. Сиваев, 1960 г., и др.). Разработанные и составленные в ходе данных работ карты в настоящее время признаны некондиционными, однако эти исследования внесли большой вклад в познание геологического строения района. В период 1962—1968 гг. огромную работу по изучению стратиграфии, магматизма и металлогении Ветреного пояса провел коллектив Института геологии Карельского филиала АН СССР под руководством А.И. Богачева. В итоге были составлены тектонические и металлогенические карты масштаба 1:500 000 с выделением перспективных участков для поисков сульфидных никелевых руд.

Систематическое геологическое изучение Ветреного пояса началось после 50-х гг. прошлого века. Неоценимый вклад в его изучение внесла династия Куликовых: Вячеслав Степанович Куликов, Виктория Владимировна Куликова, а также Яна Вячеславовна Бычкова (Куликова). За более чем полувековое всестороннее изучение структуры были получены уникальные данные. Метавулканиды Ветреного пояса, обладая специфическим геохимическим составом и удивительной структурой, которая в последствии была названа спинифекс, на тот момент не укладывались в общепризнанные классификации. Только спустя 17 лет при содействии В.С. Куликова на Международном геологическом конгрессе 1984 года в Москве удалось пообщаться с зарубежными коллегами и выяснить, что подобные породы существуют в ЮАР, Австралии, на Канадском щите и отнесены к коматиитовой серии. Термин «коматиит» был введен в литературу братьями Морисом и Робертом Вильонами в 1969 г. [15].

Под этим названием в районе р. Комати (ЮАР) они описали вулканические породы с высоким содержанием MgO, низким  $Al_2O_3$  и необычно высоким отношением  $CaO/Al_2O_3$ , что отличает их от базальтов, пикритов и перидотитов. В 1971 г. подобные породы были описаны в Австралии [33]. В более поздние годы В.В. Куликовой были открыты коматииты в архейском Сумозерско-Кенозерском зеленокаменном поясе, и лишь потом докембрийские геологи стали обособлять подобные породы в других архейских структурах Карелии. Однако вулканогенные породы Ветреного пояса имеют немного отличный химический

состав от коматиитов. Согласно петрографическому кодексу [29] внутри семейства пикритов выделены разновидности перидотитовых (>25% MgO) и пироксенитовых (<25% MgO) коматиитов. Вулканиды Ветреного пояса в среднем содержат 14% MgO, и только лишь кумулятивные части дифференцированных потоков обогащены MgO до 28%. Содержания  $SiO_2$  в среднем составляет 50% (рис. 1), что характерно для базальтов, в то время как коматииты обеднены кремнеземом. По содержанию  $TiO_2 = 0.66$  породы близки к пикритам. Отношение  $Al_2O_3/TiO_2$  в среднем составляет 19, а в некоторых случаях достигает 33, что существенно отличает породы Ветреного пояса от других ультраосновных вулканидов и напротив типично для коматиитовой серии, согласно [29]. Таким образом, кумулятивные части потоков геохимически отвечают коматиитам, а их дифференциаты, обладающие структурой спинифекс, относятся к коматиитовым базальтам.

Структура «спинифекс», кристаллизующаяся из мантийных ультраосновных расплавов в зоне закалки, является неотъемлемым признаком пород коматиитовой серии. Получила свое название по сходству с австралийской остролистной травой *Triodia spinifex*. Подобные структуры можно наблюдать, например, зимой на стеклах в окнах строений или на поверхности воды, а также в некоторых продуктах металлургических производств, когда происходит быстрая кристаллизация воды или расплавов в условиях переохлаждения. Вероятность сохранности таких «хрупких» структур при метаморфизме, охватывающем все докембрийские образования, невелика [14]. В доказательство первичной закалочной природы структур спинифекс В.С. Куликовым были проведены эксперименты по плавлению вулканических пород Ветреного пояса, в результате которых при кристаллизации были получены структуры, аналогичные природным [12].

В конце XX в. значительный вклад в изучение геологии и полезных ископаемых территории внесли сотрудники ПГО «Архангельскгеология», в первую очередь геологи Плесецкой экспедиции (А.И. Зудин, А.А. Черепанов, А.Д. Казеннова, В.П. Копылов, Г.В. Канев, В.П. Кислов и другие). В начале 2000-х годов А.К. Корсаков и В.Я. Федчук проводили активную работу по изучению геодинамики и металлогении структуры. Большой вклад в геологическое изучение вещественных комплексов Ветреного пояса также внесли А.В. Синицын, В.А. Ильин, С.Б. Лобач-Жученко и др. [18].

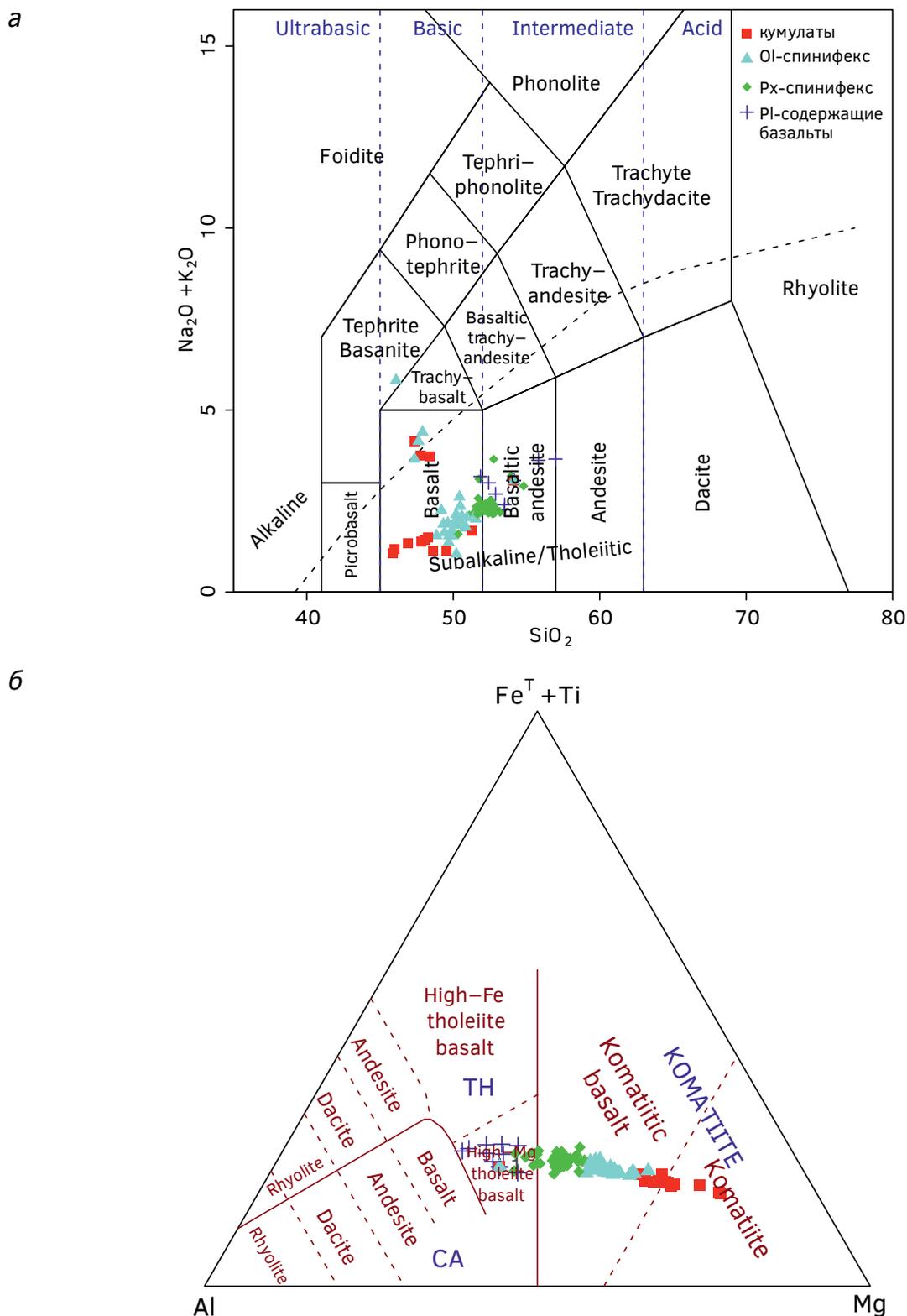


Рис. 1. Классификационные диаграммы для коматиитовых базальтов Ветреного пояса. а — TAS диаграмма Le Bas (1986), б — диаграмма для вулканических пород Jensen (1976).

Fig. 1. Classification diagrams for komatiite basalts of the Vetreny Belt. а — TAS diagram (Le Bas et al., 1986), б — Jensen cation plot for volcanic rocks (Jensen 1976)

За последние 20 лет в рамках тематических работ территорию Ветреного пояса изучали В.Ф. Смолькин, Е.В. Шарков, А.В. Самсонов, И.С. Пухтель, Ю.А. Костицын, Ю.Б. Богданов, А.М. Ахмедов. Результаты этих работ отражены в многочисленных публикациях. В пределах Нименьгской прогнозной площади проводилось геологическое изучение ЗАО «Онегазолото» (2007—2010 гг.) в рамках поисковых работ на золото и элементы платиновой группы.

### Результаты исследований

На территории Фенноскандинавского щита на рубеже 2.4—2.5 млрд лет начался крупный импульс мантийного магматизма, который привел к деструкции ранее сформированной консолидированной коры и, как следствие, масштабному рифтогенезу. В результате этих процессов были заложены многочисленные рифтогенные прогибы, одним из которых является Ветренный пояс. Раннепротерозойская структура, расположенная на юго-востоке Карельского кртона, является пограничной между Беломорским подвижным поясом и Карельской гранит-зеленокаменной областью (рис. 2). Пояс образован чередованием осадочных и вулканогенных толщ, погружающихся под углами 20—40° в северо-восточном направлении. Протяженность его в пределах Фенноскандинавского щита составляет 250 км при ширине от 15 до 85 км. Согласно геофизическим данным, пояс погружается под чехол Восточно-Европейской платформы примерно на такое же расстояние [27].

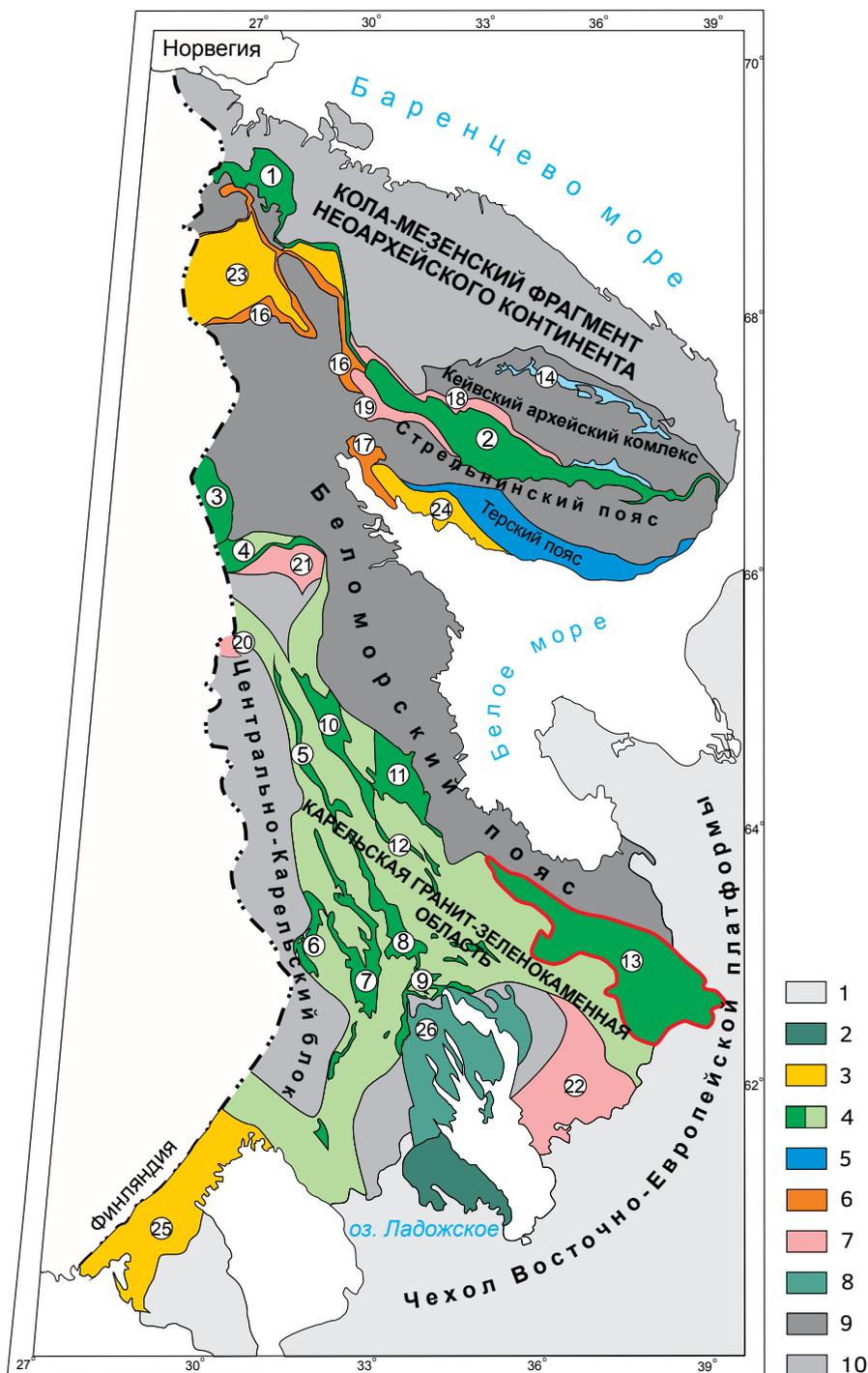
В разрезе Ветреного пояса преобладают осадочные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные толщи, нарушенные взбросо-надвигами. Геологической границей Ветреного пояса с Беломорским геоблоком является региональный надвиг, который отчетливо фиксируется зоной максимального горизонтального градиента силы тяжести. На юго-западе комплекс Ветреного пояса надвинут на саамский серогнейсовый комплекс и лопийские зеленокаменные пояса Карельского кртона.

Традиционно в разрезе структуры выделяются шесть свит: (снизу вверх) токшинская терригенная, киричская вулканогенная, калгачинская грубообломочная, кожозерская карбонатно-терригенная с потоками вулканитов, виленгская терригенно-глинистая и свита ветреного пояса вулканогенная (рис. 3). Стратиграфия Ветреного пояса являлась предметом многочисленных дискуссий на протяжении длительного

времени. При проведении геологосъемочных работ еще в 1966 году А.И. Богачев относил середину разреза (кожозерская свита) к ятулию. В 1968 году А.И. Богачевым, В.С. Куликовым и другими из разных частей структуры были получены многочисленные датировки K-Ar методом по породе для коматиитовых базальтов. Все полученные возраста укладывались в интервал от 2.4 до 2.2 млрд лет [3,6], что противоречило сопоставлению вулканитов Ветреного пояса с суйсарским комплексом докембрия. Однако Новикова А.С. совместно с Куликовым В.С., обратили внимание на уникальный петрохимический состав вулканитов Ветреного пояса и отсутствие подобных пород в более молодых разрезах аналогичных структур [28].

На структурно-формационной карте Ветреного пояса 1984 г под ред. Куликова В.С., весь комплекс структуры относится к четырем надгоризонтам палеопротерозоя от сумия до людиковия. Такое расчленение структуры обусловлено сходством разреза Ветреного пояса с аналогичными палеопротерозойскими структурами Фенноскандинавского щита, такими как Лехтинский и Шомбозерский синклиории, Кумсинская и Онежская структуры и многие другие. Для них характерным является чередование вулканогенных и осадочных образований в следующей последовательности (снизу вверх): кварциты, андезиты и андезибазальты, кварцевые порфиры, дациты, метапорфириты с горизонтами карбонатных пород, металевролиты, метапелиты, кварцитопесчаники, туфосилициты, чередующиеся с силлоподобными телами пикритов. Примечательным является также появление рассеянного углеродистого вещества.

В 1997 году И.С. Пухтель и др. впервые получили Sm-Nd возраст коматиитовых базальтов, который составил  $2410 \pm 34$  млн лет [34]. Эти данные кардинально поменяли представления многих геологов-съемщиков о стратиграфии и геологическом развитии структуры. Но, несмотря на опубликованные данные в более молодых материалах, на Госгеолкарте Р-37 — VII от 2001 г. свита Ветреного пояса и виленгская рассматриваются наравне с суйсарской и заонежской свитами людиковия [7]. В объяснительной записке к этой карте проводится сопоставление местных стратонтов ранних карелид, где наблюдается аналогичная ситуация. Не изменилось и представление о разрезе у авторов миллионной карты Р-(35,36) от 2015 г. [10]. Богданов Ю.Б. и др. в 2011 г. в своей работе, несмотря на новые изотопные данные,



**Рис. 2.** Геологическая схема главных тектонических подразделений палеопротерозоя Фенноскандинавского щита по [27] с упрощениями: 1 — осадочный чехол Восточно-Европейской платформы; 2 — Прионежская впадина; 3 — тектонические покровы; 4 — тектонические пластины чешуйчато-надвиговых ансамблей (темно-зеленый — палеопротерозойские, светло-зеленый — архейские); 5 — тектонические пластины, образованные палеопротерозойскими ортогнейсами; 6 — пояса расслоенных габбро-анортозитов; 7 — пояса расслоенных мафит-ультрамафитов; 8 — вулканогенно-осадочные комплексы пассивной окраины преобразованной в чешуйчато-надвиговые ансамбли; 9 — автохтонные и параавтохтонные неархейские комплексы; 10 — неархейские комплексы, переработанные в палеопротерозое. Цифрами в кружках показаны следующие структуры: 1 — Печенга; 2 — Имандра-Варзуга; 3 — Куоляярви; 4 — Кусамо-Паанаярви; 5 — Чирка-Кемь;

6 — Лубосалма; 7 — Янгозеро-Маслозеро; 8 — Сегозеро-Елмозеро; 9 — Кумса; 10 — Шомбозеро; 11 — Лехта; 12 — Компаковская; 13 — Ветренный пояс; 14, 15 — большие и малые Кейвы. Пояса расслоенных интрузий: 16 — Яврозеро; 17 — Колвицкий; 18 — Монча-Пана; 19 — Имандра; 20 — Койлисмаа; 21 — Оланаа; 22 — Бураковский. Тектонические покровы: 23 — Лапландский пояс; 24 — Колвица-Умбинский пояс; 25 — Южнофинляндский пояс. 26 — Онежская структура

**Fig. 2.** Geological scheme of the main Paleoproterozoic tectonic subdivisions of the Fennoscandian Shield [27] with simplifications: 1 — sedimentary cover of the East-European Platform; 2 — Prionezhskaya depression; 3 — tectonic covers; 4 — tectonic plates of scale-overthrust ensembles (dark green — Palaeoproterozoic, cool green — Archean); 5 — tectonic plates formed by Palaeoproterozoic orthogneisses; 6 — belts of stratified gabbro-anorthosite; 7 — belts of stratified mafic-ultramafic; 8 — volcanogenic-sedimentary complexes of the passive margin transformed into scaly thrust ensembles; 9 — autochthonous and para-autochthonous Neoarchean complexes; 10 — Neoarchean complexes reworked in the Paleoproterozoic. Figures in circles show the following structures: 1 — Pechenga; 2 — Imandra-Varzuga; 3 — Kuolayarvi; 4 — Kusamo-Panayarvi; 5 — Chirka-Kem; 6 — Lubosalma; 7 — Yangozero-Maslozero; 8 — Segozero-Yelmozero; 9 — Kumsa; 10 — Shombozero; 11 — Lekhta; 12 — Kompakovskaya; 13 — Vetreny Belt; 14, 15 — large and small Keivas. Belts of stratified intrusions: 16 — Yavrozzero; 17 — Kolvitsky; 18 — Moncha-Pana; 19 — Imandra; 20 — Koilismaa; 21 — Olanaa; 22 — Burakovsky. Tectonic covers: 23—Lapland belt; 24 — Kolvitsa-Umba belt; 25 — South Finlandland belt. 26 — Onega structure

по-прежнему омолаживает верхнюю часть разреза Ветреного пояса [5]. Однако в опубликованных материалах Куликова В.С. и др. от 2011 г. весь комплекс структуры относится к сумийскому надгоризонту, что было подтверждено новыми, надежными изотопными данными [13].

В 2016 году вышла работа Пухтеля И.С., в которой он подтвердил раннепротерозойский (сумийский) возраст коматиитовых базальтов Re-Os методом —  $2407 \pm 6$  млн лет [35]. Рядом исследователей были предприняты попытки выделения монофракции циркона из коматиитовых базальтов для проведения прецизионного изотопного датирования U-Pb методом SIMS-SHRIMP-II, однако был получен более древний (архейский) возраст [4, 32], который, вероятно, характеризует ксеногенную природу циркона за счет коровой контаминации [1, 8, 21]. Авторами также была предпринята попытка выделения монофракции циркона из плагиобазальтов средней части разреза; конкордантный возраст по двум зернам составил  $2856 \pm 8$  млн лет. Скорее всего, данные зерна были захвачены в процессе ассимиляции. Корреляция Ветреного пояса с другими стратотипическими структурами палеопротерозоя Фенноскандинавского щита во многом была основана на хронособытийном подходе [22, 23], используя надежные датировки планетарных событий. К ним относятся событие Ломагунди, во время которого накапливались карбонатные толщи с тяжелым углеродом, характерные для ятулийского времени, или феномен «Шуньга», во время которого стали накапливаться толщи, существенно обогащенные органическим веществом и типичные для людиновия. Комплекс Ветреного пояса хорошо укладывается в общепринятые модели таких разрезов. Например, в составе кожозерской свиты

присутствуют карбонаты, представленные сланцами по известнякам, местами мраморами по доломитам; в составе вышележащей виленгской свиты присутствуют металевролиты и метапелиты с тонко рассеянным углеродистым веществом органического происхождения. Данные особенности существенно сближают середину разреза структуры с более молодыми надгоризонтами палеопротерозоя, однако имеющиеся на сегодня ограничения возраста по завершающему этапу вулканизма противоречат такой стратиграфической последовательности при условии ненарушенного залегания.

#### Вклад авторов

Многие исследователи Ветреного пояса основное внимание уделяют вулканитам коматиитовой серии, оставляя без внимания осадочную составляющую разреза структуры. Нами был изучен изотопный U-Pb возраст зерен детритового циркона из всех осадочных уровней разреза Ветреного пояса методом LA-ICP-MS. Самый молодой возраст по единичным зернам циркона был получен из аркозовых метапесчаников кожозерской свиты —  $2464 \pm 10$  млн лет, а самый молодой циркон из метапесчаников виленгской свиты имел возраст  $2494 \pm 73$  млн лет [25], что может отвечать нижнему пределу осадконакопления и характеризовать принадлежность разреза к сумийскому надгоризонту, однако небольшая популяция зерен с молодым возрастом не позволяет в полной мере это утверждать.

Большое количество изотопно-геохронологических данных (рис. 3) по вулканитам, завершающим разрез структуры, однозначно подтверждает сумийский возраст Ветреного пояса. Предположить иную возрастную последовательность разреза

| Акротема   | Зонотема | Комплекс    | Надгоризонт | Колонка   | Мощность, м  | Характеристика пород  | Возраст, млн лет   | Метод  | Порода   | Источник   |  |  |  |
|------------|----------|-------------|-------------|-----------|--|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Протерозой | Нижний   | Карелийский | Сумийский   |           | 4000   | Свита ветренный пояс. Коматиитовые metabазальты, туффиты среднего и основного состава | 2415±5<br>2407±6<br>2410±34<br>2424±178<br>2448±42<br>2449±35<br>2405±5<br>2441±24<br>2801±16<br>2100-2200   | Sm-Nd (Вал+Ол+Пи)<br>Re-Os (изохрона)<br>Sm-Nd (Вал+Ав+Пж+Ол)<br>Pb-Pb (изохрона)<br>Sm-Nd (Вал)<br>Sm-Nd (Вал+Пи+Ол+Пл)<br>U-Pb (Zr ID-TIMS)<br>U-Pb (Zr кайма n=1 SHRIMP-II)<br>U-Pb (Zr ядро ксеног. SHRIMP-II)<br>K-Ar (Вал) | Коматиитовый базальт   | [9]<br>[35]<br>[34]<br>[34]<br>[30]<br>[34]<br>[20]<br>[32]<br>[32]<br>[3] |  |  |  |
|            |          |             |             | 1200-1500 | Виленгская свита. Песчаники с прослоями алевролитов и обломками кремнистых сланцев, светло-серые кремнистые породы, алевролиты с метapelитами, тонкослоистые темные кремнистые сланцы, метапесчаники, в верхах карбонат-хлорит-альбит-кварцевые сланцы | 2494±73<br>2751±7<br>2823±5<br>2873±12  | U-Pb (dZr) LA-ICP-MS n=2<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS n=38<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS n=31<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS n=17  | Метапесчаник   | [25]<br>[19]<br>[19]<br>[19]                                       |  |  |  |  |
|            |          |             |             | 400-600   | Кожозерская свита. Зеленые сланцы по туфам, мраморизованные карбонатные. Потоки порфировых метаплагиобазальтов, мелко-среднезернистые метапесчаники с обломками гранитоидов  | 2464±10<br>2761±8<br>2829±8<br>2851±7<br>2854±7<br>2848±7                             | U-Pb (dZr) LA-ICP-MS (n=1)<br>U-Pb (Zr) LA-ICP-MS ксеног.  | Метапесчаник<br>Метабазальт  | [25]<br>н.р.   |  |  |  |  |
|            |          |             |             | 250       | Калгачинская свита. Конгломераты с аргиллитовым или алевролитовым цементом, с галькой гранитного и основного состава   | 2876±16<br>2934±19<br>2859±16   | U-Pb (dZr) LA-ICP-MS цемент (n=26, 17)<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS галька (n=35)   | Конгломерат<br>Конгломерат   | [25]<br>[25]   |  |  |  |  |
|            |          |             |             | 700-1000  | Киричская свита. Метандезиты и метандезитобазальты с прослоями туфов. В основании коматиитовые metabазальты  | 2437±3<br>2704±10<br>2991±12<br>2662-2751<br>2817-2863<br>2379-2440<br>2693-2767      | U-Pb (Zr) n=3<br>U-Pb (Zr ксеног.) (SHRIMP-II) n=7<br>U-Pb (Zr ксеног.) (SHRIMP-II) n=7<br>U-Pb (Zr ксеног.) (LA-ICP-MS) n=26<br>U-Pb (Zr ксеног?) (SHRIMP-II) n=2,5 | Дациит<br>Андезитобазальт  | [34]<br>[4]<br>[4]<br>[21]<br>[9]                                  |  |  |  |  |
|            |          |             |             | 300-1500  | Токшинская свита. Кварциты, кварцевые гравелиты, полимиктовые песчаники, в основании конгломераты  | 2755±2<br>2824±5<br>2919±8<br>3148-3364   | U-Pb (dZr) LA-ICP-MS (n=34)<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS (n=38)<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS (n=12)<br>U-Pb (dZr) LA-ICP-MS (n=4)  | Кварцитопесчаник   | [20]<br>[20]<br>[20]<br>[20]                                       |  |  |  |  |
|            |          |             |             | Архей     |  |   |  |  | Метаморфические комплексы Карельской гранит-зеленокаменной области |  |  |  |  |

★ Пробы и их номера, отобранные авторами в ходе изучения Ветренного пояса. Zr — циркон, dZr — детритовый циркон, Пи — пироксен, Ол — оливин, Пл — плагиоклаз, Пж — пижонит, Ав — авгит, Вал — валовая проба

Рис. 3. Сводный разрез Ветренного пояса по [13] с дополнениями

Fig. 3. Summary section of the Vetryny Belt according [13] with additions

возможно только при условии нарушенного залегания, что характерно для многих докембрийских структур, претерпевших многократные тектонические деформации. Впервые полученные изотопно-геохронологические данные по детритовому циркону (dZr) из всех метаосадочных уровней Ветреного пояса позволяют сделать вывод о том, что процессы седиментации в раннем протерозое на юго-востоке Фенноскандинавского щита происходили в спокойной тектонической обстановке, в условиях развивающегося рифта. На это указывают схожие возрастные популяции dZr по всему разрезу (рис. 3), характеризующие одинаковые источники сноса, при несущественном изменении эрозионного среза. В кварцитопесчаниках базальной токшинской свиты основные популяции циркона показали полимодальное распределение со средневзвешенными пиками 2755, 2824, 2919 млн лет и единичными более древними возрастными. Для гальки гранитоидного состава в конгломератах калгачинской свиты определен возраст  $2859 \pm 16$  млн лет. Циркон из цемента имеет два основных пика: 2876 и 2934 млн лет. В метапесчаниках кожозерской свиты установлено унимодальное распределение с возрастом 2761 млн лет. Для метатерригенных пород виленгской свиты характерно полимодальное распределение с основными пиками 2751, 2823, 2873 млн лет.

Изучение карбонатсодержащих пород кожозерской свиты не показало аномально высоких значений тяжелого углерода, характерных для события Ломагунди ятулийского времени (2200—2100 млн лет). Содержание  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  (-0,9...-1) не позволяет коррелировать карбонатсодержащие сланцы средней части разреза Ветреного пояса (кожозерская свита) с аналогичными породами ятулийского уровня в других структурах Фенноскандинавского щита (Онежская, Лехтинская, Шомбозерская и др.).

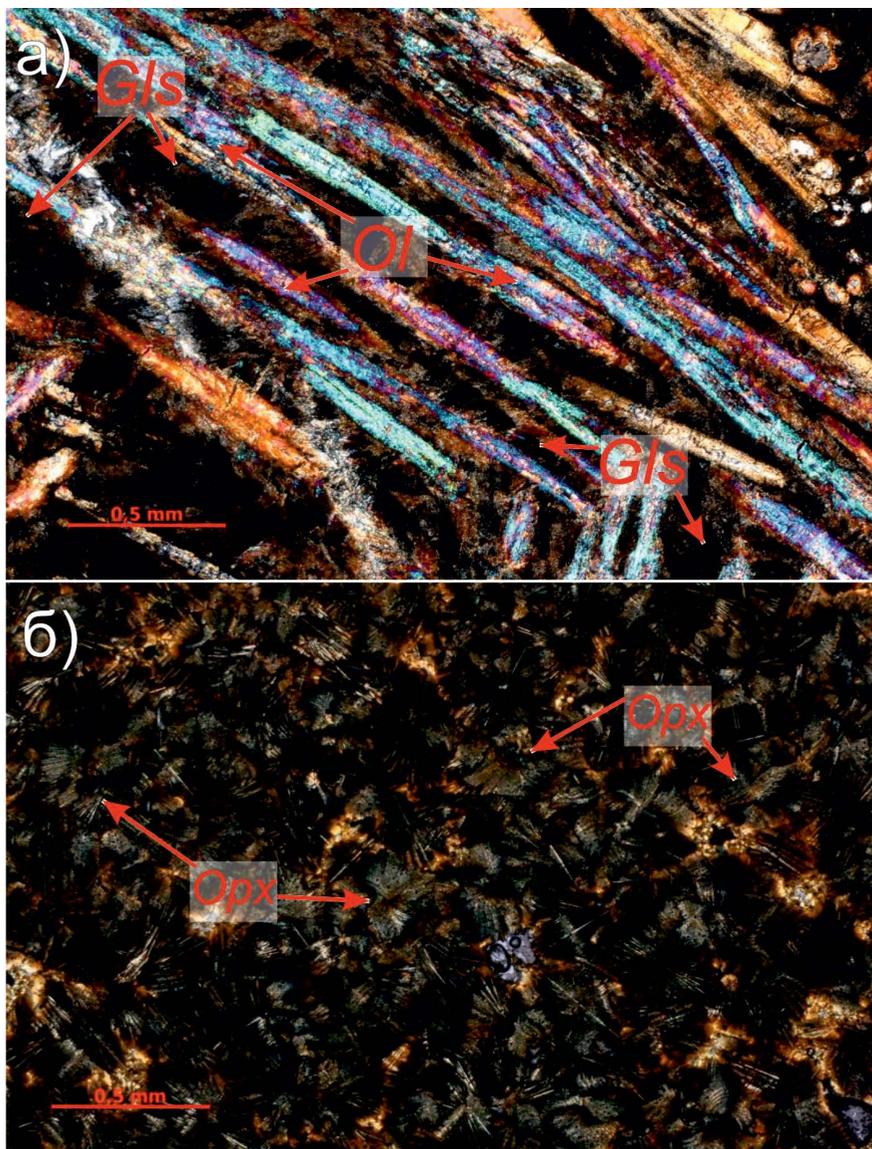
Метабазальты, завершающие разрез Ветреного пояса, имеют ряд особенностей. Впечатляют объемы вулканизма: согласно предварительной оценке гравиметрических данных, мощность вулканитов в северо-западной части структуры достигает 4000 м [24]. Учитывая уровень эрозионного среза и возраст пород (2,4 млрд лет), изначальная мощность была больше. Вулканиты Ветреного пояса обладают уникальным петрографо-геохимическим составом и не укладываются в номенклатуры петрографического кодекса [16]. При низких для коматиитовой серии содержаниях MgO (9—18%) породы обладают структурой спинифекс хорошей сохранности. В некоторых кумулятивных частях лавовых

потоков сохраняются реликты первичных минералов, прежде всего пироксена и оливина, что обусловлено минимальными преобразованиями пород в условиях низких ступеней метаморфизма, не выше зеленосланцевой фации [15]. Подобная сохранность глубинных минералов позволяет изучать эволюцию мантии с применением современных прецизионных методов [1].

Узкий временной диапазон распространения пород коматиитовой серии и их принадлежность к докембрию, преимущественно архею, объясняет дефицит имеющихся на сегодняшний день данных об условиях образования коматиитов. Такие породы, являясь продуктом чрезвычайно высокотемпературных магм, быстро подвергаются ассимиляции окружающими породами, что влияет на конечный состав пород после кристаллизации.

Для получения информации о составе исходных (первичных) магм необходимо статистическое изучение содержаний летучих компонентов и воды, сосредоточенных в расплавных включениях, которые были захвачены наиболее ранними минеральными фазами при кристаллизации. На сегодняшний день имеется ограниченное количество работ по изучению расплавных включений в коматиитах, однако получение новых данных позволит не только установить составы исходных расплавов, но и установить режимы образования коматиитовых магм, тем самым дополнив сведения о составе и эволюции древней мантии [1, 2, 36].

Для моделирования скорости остывания расплава повторно проведен эксперимент В.С. Куликова по плавлению пород свиты ветреного пояса [26]. В качестве исходного материала взяты образцы коматиитовых базальтов с содержанием MgO более 18%, отобранные на г. Голец (северо-западная часть Ветреного пояса). В ходе проведения нескольких экспериментов наиболее благоприятными условиями для кристаллизации структур спинифекс было плавление при температурах 1300 градусов в печи, далее корундовый тигель с расплавом постепенно остывал внутри камеры. Петрографическое изучение полученной закристаллизованной породы позволило установить структуры спинифекс, напоминающие «соцветие» (рис. 4). Анализ состава минеральных фаз на электронном микроскопе показал, что удлиненные пластинчатые кристаллы отвечают авгиту, а по центру расположен хромшпинелид, послуживший затравкой для роста минералов группы пироксена. Материал основной массы обеднен кремнеземом и железом, обогащен алюминием, кальцием и натрием и соответствует



**Рис. 4.** Структуры спинифекс: а — оливиновый спинифекс в коматиитовых базальтах Ветренного пояса (г. Голец); б — пироксеновый спинифекс, полученный экспериментальным путем при плавлении коматиитового базальта, отобранного с г. Голец

**Fig. 4.** Spinifex structures: a — olivine spinifex in komatiite basalts of the Vetryny Belt (Golets); б — pyroxene spinifex obtained experimentally by melting of komatiite basalt sampled from Golets

вулканическому стеклу [26]. Следует отметить, что при более быстром остывании расплава в воздушной или водной среде структуры спинифекс не образовались.

Эксперименты по плавлению аналогичных пород коматиитовой серии Кольской провинции ранее проводились В.Ф. Смолькиным и др. [31]. При температуре 1400–1390 °С наблюдался интенсивный рост первой фазы оливина, образованной спинифексподобной структурой. При снижении температуры кристаллизовался

оливин идиоморфной конфигурации, дипирамидального габитуса. Позже, при температурах 1250 °С, к нему присоединялся шпинелид кубооктаэдрической морфологии.

Для подтверждения существующих датировок коматиитового вулканизма были изучены породы комагматичного расслоенного интрузива Руйга (габбро-норитовая часть) [17]. Полученный авторами U-Pb возраст по циркону, определенный методом TIMS в лаборатории КНЦ РАН, составил  $2415 \pm 11$  млн лет. Также было выделено

единичное зерно циркона из раскристаллизованной части лавового потока коматиитовых базальтов на г. Голец, его возраст аналогичным методом показал  $2405 \pm 5$  млн лет [20].

### Заключение

Несмотря на длительную историю геологического изучения структуры Ветреный пояс, на сегодняшний день остаются актуальные и важные вопросы о положении его стратиграфических подразделений, что требует уточнения. Для возможного решения данного вопроса авторы предлагают обратить внимание на плагиобазальты в составе кожозерской свиты, а также дайки габбро-долеритов, слагающих дайковый пояс, приуроченный к полям развития пород виленгской свиты. Всестороннее изучение комплексов структуры прецизионными методами с получением надежных

изотопных данных по указанным выше объектам, возможно, поможет разобраться в стратиграфии Ветреного пояса.

Наличие в разрезе коматиитовых пород, обладающих уникальным петрохимическим составом с хорошей степенью сохранности первичных структур и минералов не встречаются (или в значительной степени переработаны наложенными тектоно-метаморфическими процессами) в других докембрийских структурах на территории Российской Федерации. Высокая сохранность первичных магматических минеральных фаз дает возможность получать уникальную информацию для реконструкции режимов генерации коматиитовых магм и изучать эволюцию древней мантии Земли. Это позволяет предложить Ветреный пояс в качестве геологического памятника природы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Асафов Е.В., Кошлякова А.Н., Соболев А.В., Тобелко Д.П., Батанова В.Г., Пухтель И.С., Межеловская С.В. Состав расплавов коматиитовых базальтов Ветреного пояса (Карелия) по данным изучения расплавных включений в оливине // Мат-лы Всеросс. ежег. семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2023): ГЕОХИ РАН. М., 2023. С. 6.
2. Асафов Е.В. Условия образования и кристаллизации коматиитов: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2019.
3. Богачев А.И., Куликов В.С., Пекуров А.В., Слюсарев В.Д. Новые данные по геологии и магматизму синклиной зоны Ветреного пояса. — В кн. «Вулканогенные и гипербазитовые комплексы протерозоя Карелии». Петрозаводск, Карельск. кн. изд-во. 1968. 289с.
4. Богданов Ю.Б., Анисимова С.А., Бережная Н.Г. Новые данные о возрасте вулканитов сумия Карелии // Материалы VIII Российской конференции по проблемам геологии докембрия «Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения». СПб.: Своё издательство, 2023. С. 22-25.
5. Богданов Ю.Б., Робонен В.И. Результаты деятельности региональной межведомственной стратиграфической комиссии по северо-западу России (1984—2010) // Геология Карелии от архея до наших дней. ИГ КарНЦ РАН. ВСЕГЕИ, 2011. С. 65.
6. Вулканогенные и гипербазитовые комплексы протерозоя Карелии: сб. статей / Научн. ред. канд. геол.-минерал. наук А.И. Богачев. Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1968. 293 с.: ил.; 27 см. (Труды Института геологии/ Карел. филиал АН СССР; Вып. 1).
7. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Карельская. Листы Р-37-I (Маленьга), Р-37-VII (Сергиево). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. 94 с.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Карельская. Лист Р-37-XV (Поча). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2023. 209 с.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Карельская. Лист Р-37-IX (Скарлахта). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2023. 148 с.
10. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1: 1 000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35),36 Петрозаводск. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 400 с.
11. Карбасников М.Н. Ветреный пояс. Л., 1940. 58 с., 4 л. карт.: карт.; 22 см. (Труды по географии Севера Европейской части СССР / Географо-экон. науч.-исслед. ин-т Ленингр. гос. ун-та; Ч. 1).
12. Куликов В.С., Калинин Ю.К. Экспериментальное воспроизведение некоторых структур базальтов Ветреного пояса // Минералогия и геохимия докембрия Карелии. Петрозаводск, 1971. Вып. 7а. С. 168—173.
13. Куликов В.С., Куликова В.В., Бычкова Я.В. Ветреный пояс: тектоно- и петротип палеопротерозоя Юго-Восточной Фенноскандии // Геология Карелии от архея до наших дней. Материалы докладов Всеросс. конф., посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 2011. С. 91—103.
14. Куликов В.С., Куликова В.В., Бычкова Я.В. Коматиитовый магматизм в Карелии: история открытия, основные характеристики, проблемы изучения // Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика. Материалы Междунар.

- конф., посвященной 60-летию КарНЦ РАН. Секция «Науки о Земле». Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. С. 280—282.
15. Куликов В.С., Куликова В.В., Светова А.И., Раевская М.Б., Горьковец В.Я., Вяхирев С.А., и др. Коматииты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита / ИГ Карельск. фил. АН СССР. Л.: Наука, 1988, 192 с.
  16. Куликова В.В. и др. Петрохимические серии магматических пород: (анализ состояния и проблемы систематизации, предпочтительные модули химических элементов, новые направления). Карел. науч. центр Рос. акад. наук, Ин-т геологии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. С. 114.
  17. Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В. 2007. К вопросу о вулканоплутонической системе «вулкан Голец — интрузив Руйга». Геология и полезные ископаемые Карелии. Тр. КарНЦ РАН. Вып. 10: с. 69—81.
  18. Межеловская С.В. Особенности геологического строения и время формирования осадочно-вулканогенного комплекса Ветреного пояса: юго-восток Балтийского щита: дис. ... геол.-мин. наук. М., 2016. С. 211.
  19. Межеловская С.В., Асафов Е.В., Кошлякова А.Н., Тобелко Д.П., Межеловский А.Д. Изотопно-геохронологическая характеристика метаосадочных пород виленгской свиты, Ветренный пояс // Материалы 55-го тектонического совещания «Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы — 2024», Том 2. М.: ГЕОС, 2024, с. 24-28.
  20. Межеловская С.В., Корсаков А.К., Межеловский А.Д., Бибикина Е.В. Временной диапазон формирования осадочно-вулканогенного комплекса Ветреного пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24. № 2. С. 1—14.
  21. Межеловская С.В., Межеловский А.Д. Ксеногенные цирконы в разрезе Ветреного пояса как признак коровой контаминации в палеопротерозое юго-востока Фенноскандинавского щита // Разведка и охрана недр. 2019. № 3. С. 38—42.
  22. Межеловская С.В., Межеловский А.Д. Особенности корреляции палеопротерозойских (сумийско-людиковских) комплексов Балтийского щита // Мат-лы XIII науч. чтений, посвященных памяти профессора Михаила Владимировича Муратова «Проблемы региональной геологии северной Евразии». М.: Парадигма, 2022. С. 52—57.
  23. Межеловская С.В., Межеловский А.Д. Палеопротерозойская структура, Ветренный пояс: нерешенные вопросы // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2022. № 5. С. 99—102.
  24. Межеловский А.Д. Блоковое строение Ветреного пояса (юго-восток балтийского щита): дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2011. С. 184.
  25. Межеловский А.Д., Межеловская С.В. Ветренный пояс: сумийский рифтогенез // Разведка и охрана недр. 2022. № 2. С. 27—36.
  26. Межеловский А.Д., Ульянов Д.К. Результаты экспериментального плавления коматиитовых базальтов свиты Ветреного пояса // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ). Мат-лы Междунар. науч.-практич. конф. 2018. С. 81—83.
  27. Минц М.В. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2010. Т.2. 400с.
  28. Новикова А.С. Тектоника основания Восточно-Европейской платформы. Труды ГИН, вып. 237. М.: «Наука», 1971. С. 81.
  29. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. — Изд. 2. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. — 200 с.
  30. Пухтель И.С., Журавлев Д.З., Куликова В.В., Самсонов А.В., Симон А.К. Коматииты Водлозерского блока (Балтийский щит) // Докл. АН СССР, 1991, т. 317, № 1, с. 197—202.
  31. Смолькин В.Ф. Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. СПб.: Наука, 1992. 272 с.
  32. Смолькин В.Ф., Шарков Е.В., Лохов К.И., Капитонов И.Н., Сергеев С.А. Генезис высокомагнезиальных вулканических пород Ветреного пояса палеопротерозоя по данным исследований U-Pb- и Lu-Hf систем в цирконах (Восточная Карелия) // ДАН. 2011. Т. 439. № 4. С. 528—533.
  33. Nesbitt R.W. Skeletal crystal forms in the ultramafic rocks of the Yilgarn Block, Western Australia: evidence for an Archean ultramafic liquid. // Geol.Soc. Aust. Spec. Publ., 1971. No. 3.
  34. Puchtel I.S., Haase K.M., Hofmann A.W., Chauvel C., Kulikov V.S., Garbe-Schnberg C.D., Nemchin A.A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetryny Belt, southeastern Baltic Shield: evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. Vol. 61. P. 1205—1222.
  35. Puchtel I.S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R.J., Brandon A.D., Nicklas R.W., et al. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. Vol. 180. P. 227—255.
  36. Sobolev A.V., Arndt N.T., Batanova V.G., Asafov E.V., Portnyagin M.V., Krashennikov S.P., Gurenko A.A., Garbe-Schönberg D. Komatiites reveal a hydrous-archaeo-deep-mantle reservoir // Nature. 2016. Vol. 531. No. 7596. P. 628—632.

## REFERENCES

1. Asafov E.V., Koshlyakova A.N., Sobolev A.V., Tobelko D.P., Batanova V.G., Puchtel I.S., Mezhelovskaya S.V. Composition of melts of komatiite basalts of the Vetreny belt (Karelia) according to the study of melt inclusions in olivine // Report of All-Russian annual seminars on experimental mineralogy, petrology and geochemistry. Moscow. 2023. 6 p. (In Russian).
2. Asafov E.V. Conditions of formation and crystallisation of komatiites. Diss. dokt. geol.-min. nauk. Moscow. 2019. 337 p. (In Russian).
3. Bogachev A.I., Kulikov V.S., Pekurov A.V., Slyusarev V.D. New data of the geology and magmatism of the syncline zone of the Vetreny belt. Volcanogenic and hyperbasite complexes of the Proterozoic of Karelia. Petrozavodsk: Karelian book Publ., 1968. 289 p. (In Russian).
4. Bogdanov Y.B., Anisimova S.A., Berezhnaya N.G. New data on the age of volcanics of the Karelian Sumia volcanics. Theses of VIII Russian Conference on Precambrian Geology "Precambrian Stratigraphy: Problems and Solutions". St. Petersburg Publ., 2023, pp. 22—25. (In Russian).
5. Bogdanov Y.B., Robonen V.I. Results of the Regional Interdepartmental Stratigraphic Commission for North-West Russia (1984—2010). Geology of Karelia from the Archean to the present day. Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2011. 65 p. (In Russian).
6. Volcanogenic and hyperbasite complexes of the Proterozoic of Karelia: collection of articles / Edited by A.I. Bogachev, Cand. Sc. of Geological and Mineral. Petrozavodsk: Karelian Book Publishing House, 1968. 293 p. (Proceedings of the Institute of Geology/Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences; Vol. 1).
7. The 1: 200 000 State Geological Map of the Russian Federation (1rd ed.) Ser. Karelian. Sheets P-37-I (Malenga), P-37-VII (Sergievo). Explanatory Note (Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2001) (In Russian).
8. The 1: 200 000 State Geological Map of the Russian Federation (2rd ed.) Ser. Karelian. Sheet P-37-XV (Pocha). Explanatory Note (Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2023) (In Russian).
9. The 1: 200 000 State Geological Map of the Russian Federation (2rd ed.) Ser. Karelian. Sheet P-37-IX (Skarlahta). Explanatory Note (Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2023) (In Russian).
10. The 1: 200 000 State Geological Map of the Russian Federation (1rd ed.) Ser. Baltic. Sheet P-(35),36 Petrozavodsk. Explanatory Note (Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2015) (In Russian).
11. Karbasnikov M.N. Vetreny belt. L., 1940. 58 p. (Works on the geography of the North of the European part of the USSR / Geografo-ekon. scientific research institute of the Leningr. state university; Ch. 1). (In Russian).
12. Kulikov V.S., Kalinin Yu.K. Experimental reproduction of some structures of basalts of the Vetreny belt basalts. Mineralogy and geochemistry of the Precambrian of Karelia. Petrozavodsk Publ., 1971. no.7a. pp.168—173 (In Russian).
13. Kulikov V.S., Kulikova V.V., Bychkova Y.V. Vetreny belt: tectono- and petrotype of the Palaeoproterozoic of South-Eastern Fennoscandia. Geology of Karelia from the Archean to the present day. Theses of reports of the All-Russian Conf. dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Geology of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk Publ., 2011. pp. 91—103 (In Russian).
14. Kulikov V.S., Kulikova V.V., Bychkova Y.V. Komatiite magmatism in Karelia: history of discovery, main characteristics, problems of study // Northern Europe in the XXI century: nature, culture, economy. Theses of the International Conf. devoted to the 60th anniversary of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Section «Earth Sciences». Petrozavodsk: Izd-vo KarRC RAS, 2006. 280—282 p. (In Russian).
15. Kulikov V.S., Kulikova V.V., Svetova A.I., Raevskaya M.B., Gorkovets V.Ya. Komatiites and high-magnesian volcanics of the Early Precambrian of the Baltic Shield. Karelian branch of the USSR Academy of Sciences. Nauka Publ., 1988, 192 p. (In Russian).
16. Kulikova V.V. et al. Petrochemical series of igneous rocks: (analysis of the state and problems of systematisation, preferred modules of chemical elements, new directions). Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geology. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2001. 114 p. (In Russian).
17. Kulikova V.V., Kulikov V.S., Bychkova Y.V. On the issue of the volcanic-plutonic system «Golets volcano — Ruiga intrusion». Geology and mining resources of Karelia. Karelian Centre of RAS. no.10. 2007. pp. 69—81 (In Russian).
18. Mezhelovskaya S.V. Peculiarities of the geological structure and time of formation of the sedimentary-volcanogenic complex of the Vetreny Belt: south-east of the Baltic Shield. Diss. dokt. geol.-min. nauk. Moscow. 2016, 211 p. (In Russian).
19. Mezhelovskaya S.V., Asafov E.V., Koshlyakova A.N., Tobelko D.P., Mezhelovsky A.D. Isotope-geochronological characterisation of meta-sedimentary rocks of the Vilenga Formation, Vetreny belt. Theses of Tectonic Conference «Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems — 2024», Vol. 2. Moscow Publ., 2024, pp. 24—28 (In Russian).
20. Mezhelovskaya S.V., Korsakov A.K., Mezhelovskii A.D., Bibikova E.V. Age range of formation of sedimentary-volcanogenic complex of the Vetreny Belt (the south-east of the Baltic Shield). Stratigr. Geol. Correl. 2016, 24, pp.105—117 (In Russian).
21. Mezhelovskaya S.V., Mezhelovsky A.D. Xenogenic zircons in the Vetreny belt section as a sign of crustal contamination in the Palaeoproterozoic of the south-eastern Fennoscandinavian Shield. Prospect and protection of mineral resources. 2019. no.3. pp. 38—42 (In Russian).
22. Mezhelovskaya S.V., Mezhelovsky A.D. Peculiarities

- of correlation of the Paleoproterozoic (Sumian-Ludikovian) complexes of the Baltic Shield. Theses of XIII Scientific Readings in Memory of Professor Mikhail Vladimirovich Muratov «Problems of Regional Geology of Northern Eurasia». Moscow Publ., 2022. pp. 52—57 (In Russian).
23. Mezhelovskaya S.V., Mezhelovskiy A.D. Vetreny belt paleoproterozoic structure: unresolved issues // Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. 2022. N 5. P. 99—102 (In Russian).
  24. Mezhelovsky A.D. Block structure of the Vetreny Belt (south-east of the Baltic Shield). Diss. dokt. geol.-min. nauk. Moscow. 2011. 184 p. (In Russian).
  25. Mezhelovsky A.D., Mezhelovskaya S.V. Vetreny belt: Sumian riftogenesis. Prospect and protection of mineral resources. 2022. no.2. pp. 27—36 (In Russian).
  26. Mezhelovsky A.D., Ulyanov D.K. Results of experimental melting of komatiite basalts of the Vetreny belt Formation. Strategy of development of geological study of subsoil: present and future (to the 100th anniversary of MGRI-RGGRU). Theses of International scientific-practical conf. 2018. pp. 81—83 (In Russian).
  27. Mints M.V., Suleimanov A.K., Babayants P.S., et al. Deep structure, evolution and mineral deposits of the Early Precambrian basement of the East European Platform: interpretation of the materials on the 1-EU geotraverse and profiles 4B and TATSEIS (GEOKART, Geos, Moscow, 2010), Vol. 1/2 (in Russian).
  28. Novikova A.S. Basement tectonics of the East European Platform. Moscow, Nauka Publ., 1971. 81 p. (In Russian).
  29. Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact rock-assemblages (2rd ed.). Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst., St. Petersburg, 2008. 200 p. (In Russian).
  30. Puhtel' I. S., Zhuravlev D. Z., Kulikova V. V., Samsonov A.V., Simon A. K. Komatiity Vodlozerskogo bloka (Baltiyskiy shhit) [Komatiites of the Vodlozero block (Baltic Shield)]. DAN SSSR [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 1991. Vol. 317, no. 1. P. 197—202 (In Russian).
  31. Smol'Kin V.F. Komatiite and picrite magmatism of the Early Precambrian of the Baltic Shield. St. Petersburg, Nauka Publ., 1992. 272 p. (in Russian).
  32. Smol'Kin V.F., Sharkov E.V., Lokhov K.I., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. Genesis of high-magnesium volcanic rocks of the paleoproterozoic Vetrennyi belt (Eastern Karelia): evidence from the study of U-Pb and Lu-Hf systems in zircons // DES. 2011. Vol. 439. N 4. P. 528—533 (In Russian).
  33. Nesbitt R.W. Skeletal crystal forms in the ultramafic rocks of the YilgarnBlock, Western Australia: evidence for an Archean ultramafic liquid.-Geol.Soc. Aust. Spec. Publ., 1971.No. 3 (In Russian).
  34. Puchtel I.S., Haase K.M., Hofmann A.W., Chauvel C., Kulikov V.S., Garbe-Schnberg C.D., Nemchin A.A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the VetrenyBelt, southeastern Baltic Shield: evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere//Geochim. CosmochimActa. 1997. Vol. 61. P. 1205—1222.
  35. Puchtel I.S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R.J., Brandon A.D., Nicklas R.W., et al. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites //Geochimica et CosmochimicaActa. 2016. Vol. 180. P. 227—255.
  36. Sobolev A.V., Arndt N.T., Batanova V.G., Asafov E.V., Portnyagin M.V., Krashennnikov S.P., Gurenko A.A., Garbe-Schönberg D. Komatiites reveal a hydrousarchaean deep-mantle reservoir // Nature. 2016. T. 531. No. 7596. P. 628—632.

## ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Межеловская С.В. — проанализировала фондовую и опубликованную литературу, разработала концепцию статьи, выделила ключевые этапы геологического изучения палеопротерозойской структуры Ветренный пояс, обозначила ряд нерешенных вопросов на сегодняшний день, требующих дальнейшего изучения, подготовила текст статьи. Окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Юшин К.И. — собрал и ознакомился с фондовой литературой по объекту исследования, разработал базу ретроспективных данных для дальнейшего использования, проанализировал опубликованные научные статьи, касающиеся структуры Ветренный пояс, оформил иллюстрации к статье и участвовал в подготовке итогового макета статьи. Окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Sofia V. Mezhelovskaya — analysed the stock and published literature, developed the concept of the article, highlighted the key stages of geological study of the Paleoproterozoic structure of the VetrenyBelt, identified a number of unresolved issues to date that require further study, prepared the text of the article. Finalised the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Kirill I. Yushin — collected and familiarised himself with the stock literature on the object of research, developed a database of retrospective data for further use, analysed published scientific articles concerning the structure of the VetrenyBelt, designed illustrations for the article and participated in the preparation of the final layout of the article. Finalised the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Межеловский А.Д. — участвовал в подготовке статьи, разработал ее структуру, описал полученные новейшие данные при изучении структуры, включая личный вклад авторов. Занимался редактированием итогового макета. Окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Alexey D. Mezhelovsky — participated in the preparation of the article, developed its structure, described the latest data obtained during the study of the structure, including the personal contribution of the authors. He edited the final layout. Finalised the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Межеловская Софья Владимировна\*** — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Тектоника консолидированной коры», ФГБУН «Геологический институт» Российской академии наук.  
7, стр. 1, пер. Пыжевский, г. Москва 119017, Россия  
e-mail: [Mezhelsofya@gmail.com](mailto:Mezhelsofya@gmail.com)  
тел.: +7 (916) 906-77-92  
SPIN-код: 5624-8838  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8175-8507>

**Sofia V. Mezhelovskaya\*** — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Senior Researcher, Consolidated Crust Tectonics Laboratory, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences.  
7/1, Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia  
e-mail: [mezhelsofya@gmail.com](mailto:mezhelsofya@gmail.com)  
tel.: +7 (916) 906-77-92  
SPIN-code: 5624-8838  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8175-8507>

**Юшин Кирилл Игоревич** — аспирант ФГБОУ ВО «Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе», младший научный сотрудник лаборатории «Неотектоники и современной геодинамики», ФГБУН «Геологический институт» Российской академии наук.  
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия  
7, стр. 1, пер. Пыжевский, г. Москва 119017, Россия  
e-mail: [yushin-kirill@mail.ru](mailto:yushin-kirill@mail.ru)  
SPIN-код: 2228-2419  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3299-5761>

**Kirill I. Yushin** — post-graduate researcher of Post-graduate student of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Junior Research Associate, Laboratory of Neotectonics and Modern Geodynamics, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences.  
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia  
7/1, Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia  
e-mail: [yushin-kirill@mail.ru](mailto:yushin-kirill@mail.ru)  
SPIN-code: 2228-2419  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3299-5761>

**Межеловский Алексей Дмитриевич** — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры «Общая геология и геокартирование» ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».  
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия  
e-mail: [mezhelovskiyad@mgri.ru](mailto:mezhelovskiyad@mgri.ru)  
SPIN-код: 8624-1909  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8527-0063>

**Alexey D. Mezhelovsky** — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Department of General Geology and Geomapping Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.  
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia  
e-mail: [mezhelovskiyad@mgri.ru](mailto:mezhelovskiyad@mgri.ru)  
SPIN-code: 8624-1909  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8527-0063>

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author