

## Влияние сейсмичности, напряженно-деформированного состояния земной коры и горно-промышленного комплекса на социально-экономические и экологические условия в Мурманской области

В. Т. Филатова

*Геологический институт Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия  
e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru*

Поступила 2.09.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

В работе рассмотрены особенности формирования сейсмогенных зон региона. Выявлена взаимосвязь областей их локализации с областями заложения в геологическом фундаменте ослабленных зон, развитие которых происходило в раннем докембрии. Численное моделирование позволило построить модели напряженно-деформационного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития и определить структуры, в пределах которых развивались древние мобильно-проницаемые области, которые на большей своей территории перекрываются известными сейсмогенными зонами. Там же сосредоточена значительная часть сейсмических событий как древних, так и современных. Выделенные ослабленные структуры в своей совокупности образуют каркас, который пронизывает фундамент Кольского региона, захватывая акватории Баренцева и Белого морей. В пределах этих областей локализовано большинство месторождений полезных ископаемых и сконцентрирована хозяйственная деятельность в регионе, что оказывает определенное воздействие на экологическую обстановку. В случае проявления сейсмической активности эти зоны являются потенциально опасными при разрядке межблоковых напряжений. Кроме этого, мощный горнопромышленный комплекс Мурманской области постоянно генерирует техногенные сейсмические события вследствие нарушения природного равновесия в горных массивах. Таким образом, при наложении природных и техногенных процессов, сопровождаемых горно-тектоническими ударами, чаще порождаются сейсмические события с повышенным уровнем магнитуды. Как следствие, повышаются экологические риски, усиливается уязвимость гражданских и промышленных объектов.

**Ключевые слова:** Кольский регион, геологический фундамент, численное моделирование, мобильно-проницаемые области, поля напряжений, сейсмичность, геоэкологическая безопасность.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0226-2019-0053.

© Филатова В. Т., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Для цитирования:** *Филатова В. Т.* Влияние сейсмичности, напряженно-деформированного состояния земной коры и горно-промышленного комплекса на социально-экономические и экологические условия в Мурманской области // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 4. С. 51–66. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-51-66

## **Influence of Seismicity, Stress-Strain State of the Earth's Crust and Mining and Industrial Complex on Socio-Economic and Environmental Conditions in the Murmansk Region**

**V. T. Filatova**

*Geological Institute of the Federal Research Centre  
"Kola Scientific Centre of the RAS", Apatity, Russia  
e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru*

Submitted 2.09.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

The paper discusses formation features of seismogenic zones in the region. The study revealed interrelation between areas of their localization and areas of their occurrence in the geological basement of weakened zones developed in the early Precambrian. The performed numerical modeling made it possible to construct models of the stress-strain state of the Earth's crust in the region considering its evolution and to determine the structures that hosted ancient mobile-permeable regions. These areas are overlapped by the known seismogenic zones in the major part of the territory. A significant number of seismic events, both ancient and modern, are also concentrated there. In total, the selected weakened structures produce a framework that permeates the basement of the Kola region capturing the water areas of the Barents and White Seas. The greatest part of mineral deposits of the region is located within these areas. The economic activity is also concentrated there, which affects the ecological situation in the region. In case of some seismic activity, these zones become potentially dangerous during the stress relief between geoblocks. In addition, the powerful mining and industrial complex of the Murmansk region generates technogenic seismic events by disturbing the natural equilibrium in mountain massifs. Thus, when natural and technogenic processes accompanied by tectonic rockburst are overlapped, seismic events with an increased level of magnitude are generated more often. As a result, environmental risks increase and civil and industrial facilities become more vulnerable.

**Keywords:** Kola region, geological basement, numerical modeling, mobile-permeable areas, stress fields, seismicity, geoecological safety.

**Acknowledgments:** the research is performed under state task on topic no. 0226-2019-0053.

**For citation:** Filatova, V.T., 2021. Influence of Seismicity, Stress-Strain State of the Earth's Crust and Mining and Industrial Complex on Socio-Economic and Environmental Conditions in the Murmansk Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 51–66. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-51-66 (in Russian).

### **Введение**

На территории Мурманской области сосредоточены крупные месторождения полезных ископаемых, что послужило основанием для создания мощного горнопромышленного комплекса. В целом регион относится к областям слабой сейсмичности, но относительно редко случаются землетрясения, которые могут вызвать разрушения на поверхности. Для ряда потенциально опасных промышленных объектов, попавших в эпицентр землетрясений, такие колебания могут быть критическими. Геологический фундамент региона в течение длительного периода своего развития приобрел латеральную мозаичную неоднородность. Одной из важнейших характеристик тектоносферы является напряженно-деформированное состояние, контролирующее развитие тектонических и геодинамических процессов в коре и способствующее формированию месторождений полезных ископаемых. Для объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита (период 3.0–1.6 млрд лет назад) были построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития и определены мобильно-проницаемые структуры, благоприятствующие подъему мантийных основных-ультраосновных магм, что подтверждается имеющимися геологическими данными.

Сравнение схем локализации выделенных мобильно-проницаемых зон в фундаменте (которые являются областями концентрации тектонических напряжений) и известных сейсмогенных зон региона указывает на то, что они в большей части перекрываются, особенно в узловых точках. Таким образом, в районах перекрытий вероятность нарушения равновесия в геологической среде из-за разрядки напряжений будет наибольшей, и, как следствие, повышаются сейсмические риски и усиливается уязвимость гражданских и промышленных объектов, особенно подземных сооружений различного назначения. При активном развитии горнопромышленного комплекса Мурманской области наблюдается рост числа техногенных землетрясений и, соответственно, сопутствующих им горно-тектонических ударов. Все эти факторы усугубляют социально-экономические и экологические последствия деятельности человека в регионе.

### **Материалы и методы**

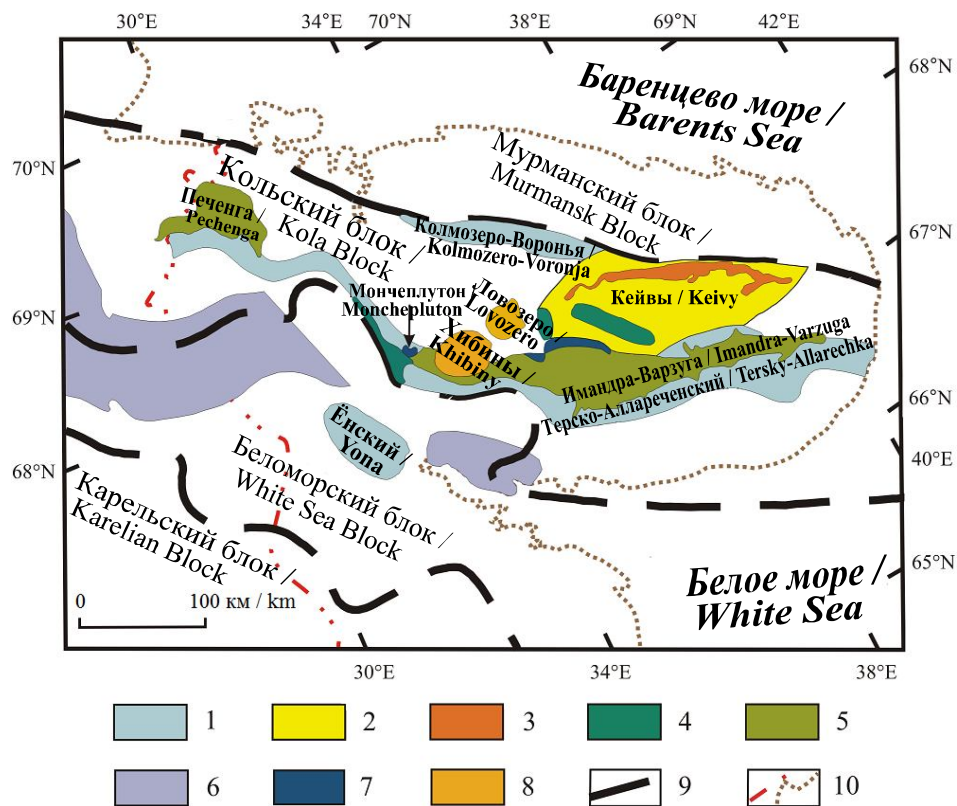
На территории Мурманской области и северной Карелии расположено 17 сейсмостанций, образующих региональную сеть сейсмомониторинга. Наиболее продуктивными звеньями этой сети являются: короткопериодная сейсмическая группа «Апатитский *ARRAY*» (*APO*), включающая 9 вертикальных короткопериодных сейсмометров (апертура около 1 км); цифровые длиннопериодные трехкомпонентные станции «Апатиты» (*APA*), «Ковдор» (*KOVD*), «Ловозеро» (*LVZ*) и «Териберка» (*TER*). При составлении базы данных сейсмических событий используются записи норвежской сейсмической группы *ARCES* (включает более 20 датчиков и 4 трехкомпонентные станции), финских трехкомпонентных станций *KEV* и *VERF*. Таким образом, регистрация сейсмической активности осуществляется на территории, включающей Мурманскую область, северную Карелию, Финляндию,

Норвегию, Баренцево море и Шпицберген. Создание региональной сети сейсмомониторинга в регионе началось в 1950-е гг. В этот период была построена сейсмостанция «Апатиты», оборудованная аналоговой аппаратурой. Позднее, в 1970-х гг., было дополнительно создано 3 аналоговых сейсмопункта. Коренная реконструкция сети сейсмических наблюдений началась в 1990-е годы, сопровождаемая заменой аналоговых сейсмостанций на цифровые. При этом в регионе было установлено свыше 10 новых цифровых сейсмостанций, использование которых позволило зарегистрировать огромное количество слабых сейсмических событий, которые ранее оставались не замеченными. Кроме этого, повысилась точность локации сейсмических событий и их разделение на естественные и техногенные. На основании имеющихся данных наблюдений отмечаются временные ряды сейсмичности, при сопоставлении которых выделяется две периодичности: 2–3 года и 8–9 лет.

В представленной работе выполненный анализ сейсмичности региона был дополнен тектонофизическим моделированием в целях выделения в фундаменте региона ослабленных зон, которые в случае землетрясения становятся областями разрядки межблоковых напряжений. Традиционно геологи фрагментарно фиксируют такие зоны по признакам проявления основного-ультраосновного магматизма [1]. При численном моделировании напряженно-деформированного состояния геологической среды использовался метод граничных элементов для решения краевой задачи в напряжениях. Был разработан подход, при котором проницаемые области в фундаменте отмечались линейными протяженными зонами с аномальными значениями рассчитанных скальвающих напряжений. Ставилась задача локализации обнаруженных ослабленных зон и известных сейсмогенных зон в фундаменте Мурманской области, выделения районов их перекрытия и оценки экологических последствий в случае усиления сейсмичности в регионе.

#### *Геологические особенности фундамента Кольского региона*

Значительная часть исследуемого региона сложена докембрийскими породами [1]. Эти породы слагают архейские блоки – Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский, которые в своей взаимосвязи формируют коллажное строение земной коры региона (рис. 1). Среди второстепенных структур из-за особенностей своего строения и состава пород выделяется архейская Кейвская структура, встроенная в структуру Кольского блока. Кроме этого, значимыми являются следующие структурные зоны: архейские зеленокаменные пояса (Колмозеро-Воронья, Ёнский и Терско-Аллареченский), палеопротерозойские мобильные пояса (Лапландский гранулитовый и Печенга-Варзугский рифтогенный), а также гигантские палеопротерозойские щелочные массивы (Хибинский, Ловозерский). Палеопротерозойский Печенга-Варзугский рифтогенный пояс наследует область развития архейского Терско-Аллареченского пояса. Период неоархей – палеопротерозой характеризуется линейной тектоникой и формированием поясовых структур, которые являлись зонами многократного проявления основного магматизма.



Р и с . 1 . Схема геологического строения Кольского региона. 1 – архейские зеленокаменные пояса Колмозеро-Воронья, Терско-Аллареченский, Ёнский; 2 – Кейвская структура; 3 – высокоглиноземистые гнейсы; 4 – массивы анортозитов и габбро-анортозитов (архей/палеопротерозой); 5 – Печенга-Имандра-Варзугская палеорифтогенная структура; 6 – Лапландский гранулитовый пояс; 7 – расслоенные массивы основных и ультраосновных пород (палеопротерозой); 8 – щелочные интрузивы (палеозой); 9 – разломы (зоны разломов) на контакте мегаблоков; красная линия – государственная граница России; коричневая линия – современная береговая линия

Fig. 1. Map of the geological structure of the Kola region. 1 – Archean greenstone belts Kolmozero-Voronja, Tersky-Allarechka, Yona; 2 – Keivy structure; 3 – alumina and super-alumina gneiss and schist; 4 – anorthosite and gabbro-anorthosite massifs (Archean/Paleoproterozoic); 5 – Pechenga-Imandra-Varzuga paleorift belt; 6 – Lapland granulate belt; 7 – layered massifs of basic and ultra-basic rocks (Paleoproterozoic); 8 – alkaline intrusions (Paleozoic); 9 – fractures (fracture zones) at the contact between blocks; red line – state border of Russia; brown line – modern coastline

### ***Естественная и техногенная сейсмичность региона***

Регулярные сейсмологические наблюдения на территории Мурманской области проводятся с 1956 г. Наибольшее количество сейсмических событий (как древних, так и современных) происходило в Мурманском и Кандалакшском районах, где наряду со слабыми землетрясениями имели место и семирбалльные землетрясения. В процессе изучения различных типов

деформаций в четвертичных отложениях долины реки Печенга (Западная часть Мурманского блока) были зафиксированы следы сильных древних землетрясений [2]. Там же указывается, что в интервале 8.5–8.7 тыс. лет назад имело место проявления сильного сейсмического импульса с магнитудой 7.1 и выше. Ранее отмечалось, что данная территория уже подвергалась воздействию землетрясения около 8950±150 лет назад [1]. Кроме этого, описываются сейсмические события, имевшие место в западной части Мурманского блока в 1772 и 1819 гг. с магнитудой 4.6 и 4.1 соответственно [3]. На территории Кандалакшского района, как следует из исторических записей, 14 мая 1626 г. наблюдалось землетрясение с магнитудой  $M = 5.1-6.4$  при колебании поверхности до 7.5 баллов [4]. В современную эпоху (2 февраля 1960 г.) в районе была зафиксирована серия сейсмических событий с  $M > 4$  при колебании поверхности в эпицентре с интенсивностью выше 5 баллов [5].

На рисунке 2, *a* показана схема расположения сейсмогенных зон Кольского полуострова, выделенных авторами [6] для периода 9–13 тыс. лет назад. В этих зонах сосредоточена основная масса реконструированных палеосейсмодислокаций. Зоны имеют линейный вид с узлами пересечений, протягиваются как с северо-запада на юго-восток (Мурманская и Кандалакшская), так и с юго-запада на северо-восток (Туломская и Хибинско-Харловская). Непосредственно палеосейсмодислокации тяготеют к районам долгоживущих глубинных разломов. В период дегляциации (9–13 тыс. лет назад) имели место поднятие земной коры региона и внутриплитные вертикальные перемещения отдельных блоков с различной скоростью, а возникающая при этом разрядка напряжений вызывала землетрясения [7]. Отмечается, что подъем щита до сих пор продолжается, но в настоящее время в тектоническом режиме роль вертикальных движений ослабевает, и на первое место выходят горизонтально сжимающие напряжения, разрядка которых также порождает сейсмические события.

На рисунке 2, *b* представлена схема расположения сейсмогенных зон по данным сейсмомониторинга за период 1956–1993 гг. [8]. Выделено 6 зон, в пределах которых преимущественно зарегистрированы эпицентры землетрясений на тот период. Отмечается, что в первые десять лет инструментальных измерений повышенная сейсмичность фиксировалась в Мурманской и Кондалакшской зонах, но после 1966 г. наблюдалось усиление сейсмичности в Хибино-Лавозерской, Куусамо-Порьегубской и Ботний-Финмаркской зонах. Если рассматривать интервал времени с начала сейсмомониторинга региона – с 1956 г., то Кандалакшская зона является наиболее сейсмоактивной областью Кольского полуострова. В пределах Хибино-Лавозерской зоны по сейсмической активности надежно выделялся до 1969 г. только район Хибинского массива, но за период 1970–1990 гг. вся зона превратилась в пояс повышенной сейсмической активности.

Уменьшение частоты проявления землетрясений зафиксировано в интервале 1993–2013 гг., но при этом возникли изменения в конфигурации сейсмогенных зон [8]. На рисунке 2, *c* показана схема расположения сейсмогенных зон на указанный период. Отмечается, что сейсмичность в Мурманской зоне заметно уменьшилась, но в Кандалакшской и Хибино-Лавозерской

осталась на прежнем уровне. При этом Куусамо-Порьегубская зона исчезла, но появилась Кандалакшско-Варангерская. Таким образом, просматривается пространственная эволюция выделенных зон, в пределах которых было зарегистрировано наибольшее количество сейсмических событий на тот или иной период времени. Кроме этого, авторами работы [8] делается вывод, что в целом в регионе наблюдается повышение уровня сейсмичности.

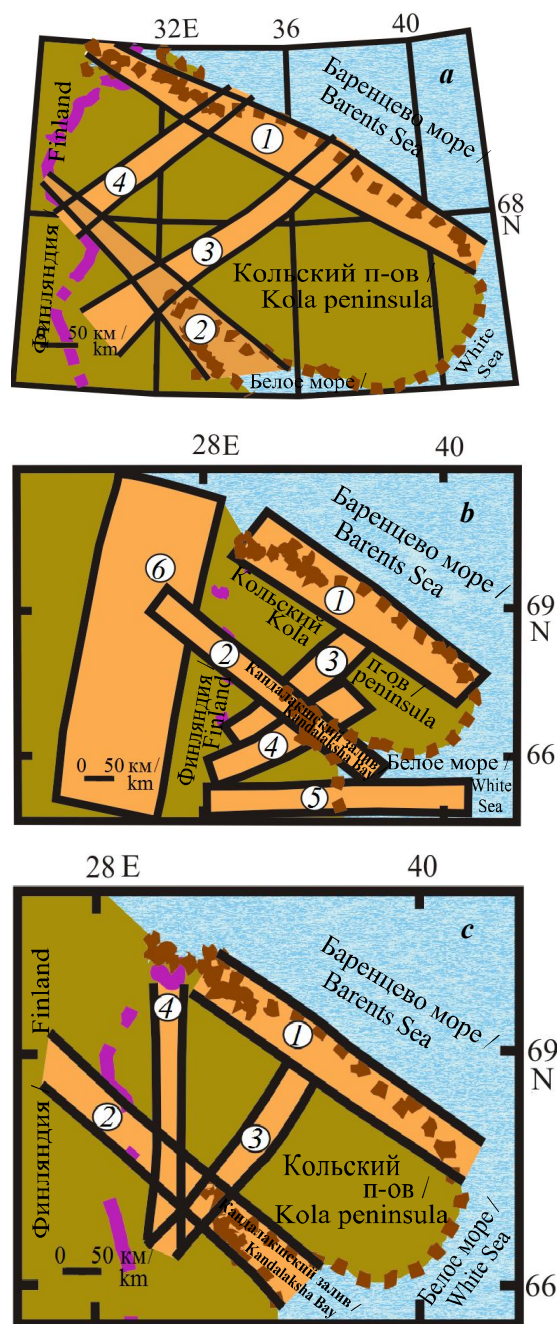


Рис. 2. Сейсмогенные зоны Кольского региона (цифры в кружочках – зоны): *a* – палеорекострукции для периода 9–13 тыс. лет назад [6]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибинско-Харловская, 4 – Туломская; *b* – по данным сейсмомониторинга за период 1956–1993 г. [8]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибино-Ловозерская, 4 – Куусамо-Порьегубская, 5 – Беломорская, 6 – Ботний-Финмаркская; *c* – по данным сейсмомониторинга за период 1993–2013 г. [8]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибино-Ловозерская, 4 – Кандалакшско-Варангерская

Fig. 2. Seismogenic zones of the Kola region (numerals in circles indicate zones): *a* – according to paleoreconstructions for a period of 9–13 thousand years ago [6]: 1 – Murmansk, 2 – Kandalaksha, 3 – Khibiny-Kharlovka, 4 – Tuloma; *b* – according to the regional monitoring network data in 1956–1995 after [8]: 1 – Murmansk, 2 – Kandalaksha, 3 – Khibiny-Lovozero, 4 – Kuusamo-Poria Guba, 5 – Belomorie, 6 – Botni-Finmark; *c* – according to the regional seismic monitoring data for 1993–2013 [8]: 1 – Murmansk; 2 – Kandalaksha; 3 – Khibiny-Lovozero; 4 – Kandalaksha-Varenga

Результаты сейсмомониторинга показывают, что активность сейсмогенных зон не постоянна и нет синхронности в ее проявлении в различных зонах (рис. 2, *a–c*). Повышение уровня сейсмичности может наблюдаться в одних зонах, в других же зонах – затухание. Кроме этого со временем могут возникать новые сейсмогенные зоны, захватывающие территории, где ранее не наблюдалась сейсмическая активность. На территории области кроме тектонических землетрясений происходят и техногенные сейсмические события, обусловленные нарушением природного равновесия в горных массивах из-за активного развития горнопромышленного комплекса региона. Непосредственно в горной выработке происходит горно-тектонический удар, у которого уровень магнитуды выше, чем у техногенного землетрясения, очаг последнего находится в массиве за пределами выработки. В силу этого горно-тектонические удары вызывают значительно большие разрушения, чем техногенные землетрясения. В 1999 г. зафиксировано самое крупное техногенное землетрясение региона с магнитудой  $M = 4.0$ , вызвавшее разрушение подземных выработок рудника «Умбозеро» (Ловозерский массив) на площади  $650 \text{ км}^2$  с развитием трещины до поверхности длиной  $0.5 \text{ км}$  [9].

Ранее в районе Ловозерского массива никогда не регистрировались сейсмические события, но в 1990-е годы стали происходить землетрясения с магнитудой  $M > 1$ , и их количество увеличивалось ежегодно. Причем устанавливается взаимосвязь появления и нарастания техногенной сейсмической активности Ловозерского массива с вводом в эксплуатацию и увеличением объемов добычи на руднике «Умбозеро» [9]. Вследствие изменения напряженного состояния массива последовала серия горно-тектонических ударов с магнитудой  $M = 2.2–2.6$ . Дальнейшее продолжение горных работ привело к разрядке потенциальной энергии массива, что и вызвало горно-тектонический удар с магнитудой  $M = 5.1$  (шкала локальных магнитуд Рихтера) в 1999 г. [9]. После остановки эксплуатации рудника число сейсмических явлений в пределах массива за последние годы заметно снизилось. Кроме рудника «Умбозеро» сильные сейсмические события (горно-тектонические удары и техногенные землетрясения) происходили и на Кировском руднике в Хибинах, но уровень энергии указанных событий был ниже.

***Численное моделирование: постановка задачи и основные уравнения***

Обеспечение безопасности подземного комплекса в сложных горно-геологических условиях существенно зависит от физического состояния окружающего породного массива как основного защитного барьера. В целях оценки геологического фундамента Кольского региона были построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры с учетом ее эволюционного развития и определены мобильно-проницаемые структуры, контролирующие развитие тектонических и геодинамических процессов в коре. При моделировании были приняты следующие допущения. В неогарее консолидация земной коры превращает регион в относительно стабильную континентальную структуру и исследуемая область на тот период находится в устойчивом состоянии [10]. Следовательно, можно допустить, что регион при этом мог испытывать



всестороннее равномерное сжатие вследствие действия удаленных сил  $T$ . В палеопротерозое основной фронт тангенциальных напряжений был направлен на северо-восток [11, 12]. При этом Мурманский блок занимал устойчивое положение; не исключено, что он испытывал давление, направленное с северо-востока на юго-запад. Следовательно, допускаем, что в раннем протерозое регион был подвержен одноосному сжатию равномерно распределенными усилиями  $T$  с юго-запада и с северо-востока.

Полагаем, что северо-восточная часть Балтийского щита на весь период геологической истории региона представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объемных сил и заданных напряжений на его границе [13]. При этом допускается: а) тип тектоно-магматической активности, установившийся в раннем докембрии, был внутриплитный; б) конфигурация контактных границ между архейскими блоками на протяжении всей геологической истории принципиально не изменялась. Рассматриваемая область состоит из нескольких конечных подобластей, каждая из них считается однородно изотропной и линейно-упругой с линейно-упругими постоянными (коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) и модуль Юнга ( $E$ )). Каждый архейский блок – это отдельная подобласть. Зоны глубинных разломов, разделяющие архейские блоки, рассматриваются как подобласти шириной 25–30 км. Задаем условие, что область находится в состоянии равновесия и компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  в случае плоской задачи удовлетворяют условиям равновесия [14]:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \beta_x = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \beta_y = 0,$$

где  $\beta_x$  и  $\beta_y$  – объемные силы. При численном решении данной краевой задачи в напряжениях использовался метод граничных элементов. Численное решение строится с помощью предварительно полученных аналитических решений для простых сингулярных задач таким образом, чтобы удовлетворять заданным граничным условиям на каждом элементе контура [15]. Рассматриваем верхнюю горизонтальную поверхность модели сплошной среды.

При решении поставленной задачи были рассмотрены три временных этапа развития Кольского региона (3.0–2.8, 2.8–2.5, 2.5–1.6 млрд лет назад) и, соответственно, на каждом этапе задавалась определенная базовая модель (рис. 3), описывающая исследуемую область с учетом сформировавшихся к этому времени геологических структур [13]. Значения линейно-упругих постоянных ( $\mu$ ,  $E$ ) для пород архейских блоков, зеленокаменных поясов, Кейвской структуры и разломных зон задавались согласно данным, приведенным в работе [16]. Значение нагрузки  $T$  в целях удобства расчетов принимаем равным единице. Для каждой базовой модели были оценены величины напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ , что позволило рассчитать главные напряжения  $\bar{\sigma}_{xx}$ ,  $\bar{\sigma}_{yy}$ ,  $\bar{\tau}_{xy}$  [14]:

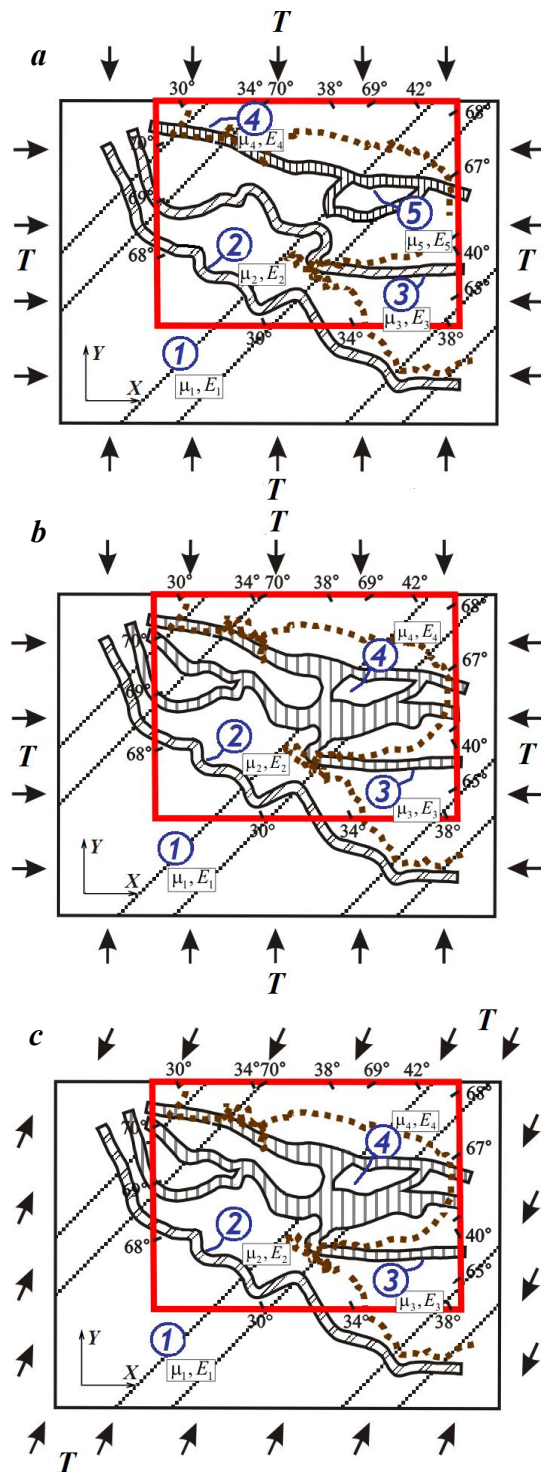


Рис. 3. Модельные блочные области – аппроксимационные схемы блочного строения земной коры северо-восточной части Балтийского щита на период 3.0–1.6 млрд лет назад: *a* – 3.0–2.8 млрд лет ( $\mu_1 = \mu_5 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = E_4 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_5 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); *b* – 2.8–2.5 млрд лет ( $\mu_1 = \mu_4 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); *c* – 2.5–1.6 млрд лет ( $\mu_1 = \mu_4 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); коричневая штриховая линия – контуры современной береговой линии; красная линия – контуры исследуемого региона; *T* – нагрузка; цифры в кружочках – подобласти

Fig. 3. Model block regions: approximation schemes of the Earth's crust block structure in the northeastern part of the Baltic Shield for the period of 3.0–1.6 Ga: *a* – 3.0–2.8 Ga ( $\mu_1 = \mu_5 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = E_4 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_5 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); *b* – 2.8–2.5 Ga ( $\mu_1 = \mu_4 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); *c* – 2.5–1.6 Ga ( $\mu_1 = \mu_4 = 0.25$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$ ,  $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$  МПа,  $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$  МПа); brown dashed line – contours of the modern coastline; red line – contours of the study region; *T* – force; encircled numerals – subregions

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{xx} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \bar{\sigma}_{yy} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \bar{\tau}_{xy} &= -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha,\end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол, который составляет ось главного напряжения с осью  $OX$ ,  $\operatorname{tg} 2\alpha = 2\tau_{xy} / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$ . Максимальные по абсолютному значению скаль- вающие напряжения определяются следующим образом [14]:

$$|\tau_{xy}|_{\max} = \left| \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right|.$$

Окончательно значения напряжений  $|\tau_{xy}|_{\max}$  нормировались и пред- ставлялись в процентном соотношении от максимального значения по ре- гиону. Таким образом, после нормировки области, отмеченные аномальны- ми скаль- вающими напряжениями, рассматривались как ослабленные зоны в фундаменте региона. Все работы выполнялись в масштабе 1:1 000 000 с использованием исходной геологической карты масштаба 1:500 000<sup>1)</sup>. Применительно к исследуемому региону были выполнены расчеты для не- скольких вариантов нагрузки области. В случае всестороннего равномерно- го сжатия области (архей) и одноосного сжатия по линии юго-запад – севе- ро-восток (палеопротерозой) наиболее отчетливо выделяются в поле скаль- вающих напряжений структурные особенности региона, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры.

### Результаты и обсуждение

Выявленные ослабленные (мобильно-проницаемые) зоны в земной коре Кольского региона несут в основном наложенный характер и в совокупно- сти образуют структуру, которая пронизывает фундамент области исследо- вания, захватывая акватории Баренцева и Белого морей (рис. 4). Анализ схем расположения сейсмогенных зон (см. рис. 2) показывает, что они значительно перекрывают ослабленные области в фундаменте региона, выделенные с помощью математического моделирования. Там же фиксируется значи- тельная часть сейсмических событий как древних, так и современных. При этом в их пределах локализовано большинство месторождений полезных ископаемых и сконцентрирована хозяйственная деятельность населения области (горнодобывающие и металлургические предприятия, электростан- ции, морские порты, морской терминал). Подъем щита до сих пор продол- жается и имеют место как вертикальные, так и горизонтальные движения структурных элементов коры, следовательно, подвижки геоблоков относи- тельно друг друга будут происходить по ослабленным зонам фундамента.

<sup>1)</sup> Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). Масштаб 1:500000 / Ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1996.

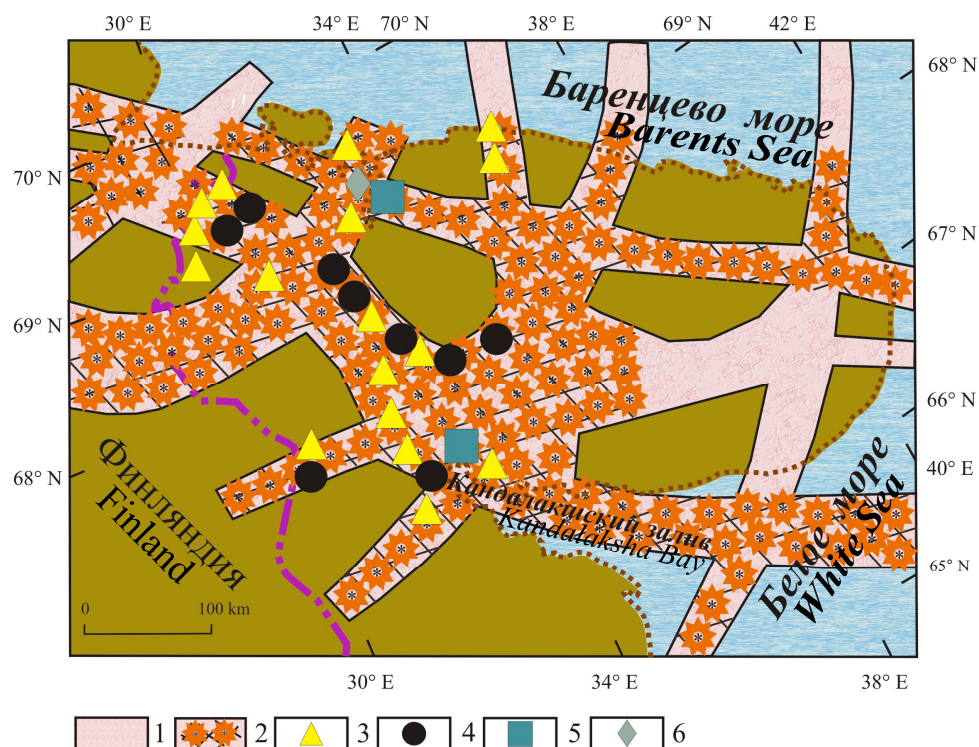


Рис. 4. Схема наложения сейсмогенных зон на выделенные ослабленные области в геологическом фундаменте Кольского региона: 1 – ослабленные области фундамента (выделенные по данным численного моделирования), 2 – районы проявления повышенной сейсмичности, 3 – электростанции, 4 – горнодобывающие и металлургические предприятия, 5 – морские порты, 6 – морской терминал

Fig. 4. Diagram of the overlap of seismogenic zones on the identified weakened areas in the geological basement of the Kola region: 1 – weakened areas of the basement (identified according to numerical modeling data), 2 – areas of increased seismicity, 3 – power plants, 4 – mining and metallurgical enterprises, 5 – seaports, 6 – sea terminal

В итоге выделенные ослабленные зоны являются районами концентрации тектонических напряжений и в случае проявления сейсмической активности эти зоны становятся потенциально опасными при разрядке межблоковых напряжений.

В настоящее время разрабатываются проекты строительства подземных атомных станций малой мощности, которые могут быть альтернативными источниками электрической и тепловой энергии при освоении арктических регионов России. Естественно, встает необходимость изучения фундамента региона, физического состояния окружающего породного массива, привлечения данных сейсмомониторинга в целях обеспечения безопасности как самого промышленного объекта, так и гражданского населения. Авторами работы [17] представлен анализ данных относительно сейсмических событий, зарегистрированных на Кольском полуострове. При этом учитывались

данные об энергонасыщенности массивов пород в приповерхностной части земной коры региона [18]. Отмечается, что вероятность землетрясения магнитудой  $M = 5$  в Мурманской области за 50 лет статистически приближается к 100 %. Ущерб, причиняемый землетрясением инженерным сооружениям, зависит не только от магнитуды сейсмособытия, но и от глубины его очага и расстояния до рассматриваемого объекта. Особую опасность представляют мелкофокусные землетрясения при глубинах гипоцентра 10–12 км. Например, при землетрясении с магнитудой 5 интенсивность колебания поверхности Земли в эпицентре будет превышать 7–9 баллов по шкале МСК-64 [8, 17]. Приводятся оценки, характеризующие степень опасности для технических объектов на примере магистрального трубопровода: разрушение надземного трубопровода наступает при сейсмичности в 6–7 баллов, а подземного – при 7–8 баллах [17]. Принимая во внимание активное развитие горнопромышленного комплекса Мурманской области, нельзя исключить возможный рост числа техногенных землетрясений и, соответственно, сопутствующих им горно-тектонических ударов.

#### **Заключение**

Большинство месторождений полезных ископаемых Мурманской области и значительная часть сейсмических событий региона (особенно землетрясения с магнитудой  $M = 5$  и выше) концентрируется в районах развития мобильно-проницаемых зон кристаллического фундамента, выделенных с использованием математического моделирования. В пределах этих областей также сосредоточена хозяйственная деятельность населения региона, что оказывает определенное воздействие на экологическую обстановку. Максимальную нагрузку на состояние окружающей среды создают предприятия горнодобывающей промышленности, цветной металлургии, химической промышленности, военного комплекса, стройиндустрии, которые одновременно являются основой благосостояния населения области. Следовательно, необходимо соблюдать баланс интересов при экономическом развитии региона, поддержании социальной стабильности и сохранения окружающей среды.

В настоящее время сейсмичность в Мурманской области присутствует и даже усилилась в 2 раза за последние 30 лет. Допускается, что она может достигать 6 баллов по шкале МСК-64, а такие районы, как Мурманский и Кандалакшский, можно отнести к наиболее сейсмоактивным в регионе. В случае проявления сейсмических воздействий именно в ослабленных зонах будет иметь место разрядка межблоковых напряжений, которая может вызвать чрезвычайные события различного характера. Существующий горнопромышленный комплекс области круглосуточно генерирует техногенные сейсмические события. В итоге при наложении природной и техногенной сейсмичности даже при слабых сейсмических колебаниях могут пострадать промышленные и гражданские объекты.

В пределах шельфа идет активное освоение месторождений нефти и газа и возрастает риск возникновения чрезвычайных событий вследствие аварий при добыче, переработке и транспортировке нефтепродуктов и природного газа. Кроме этого, в Мурманской области присутствуют объекты, связанные с применением ядерных технологий (Кольская атомная

электростанция, атомный ледокольный флот и т. д.). Необходимо помнить, что гарантией геологической безопасности при работе перечисленных предприятий, а также проектируемых подземных атомных электростанций является устойчивость геологической среды. Полномасштабные исследования геологического фундамента региона для его ранжирования по прочности являются очень затратными. В целях экономии времени и средств целесообразнее предварительно выполнить исследования с использованием численного моделирования, чтобы локализовать ослабленные (мобильно-проницаемые) области в фундаменте. В пределах выделенных областей уже можно выполнять детальные инженерные геолого-геофизические исследования с последующим выбором наиболее благоприятных районов для строительства. Таким образом, можно снизить степень уязвимости гражданских и промышленных объектов и, следовательно, ослабить экологические последствия аварий на предприятиях в случае усиления сейсмичности при наложении природных и техногенных процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / F. P. Mitrofanov [et al.]. Apatity : Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 1995. 144 p.
2. *Nikolaeva S. B.* Seismogenic deformations in early holocene sediments of the Pechenga River Terrace (Kola Peninsula) // *Doklady Earth Sciences*. 2006. Vol. 406, no. 1. P. 4–7. <https://dx.doi.org/10.1134/s1028334x06010028>
3. *Ahjos T., Uski N.* Earthquakes in Northern Europe in 1375-1989 // *Tectonophysics*. 1992. Vol. 207, no. 1–2. P. 1–23. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M)
4. *Степанов В. В.* Геодинамическая опасность промышленных объектов. М. : Наука, 2001. 100 с.
5. *Панасенко Г. Д.* Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л. : Наука, 1969. 183 с.
6. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным / С. В. Баранов [и др.] // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы / Ред. А. А. Маловичко. Обнинск : ГС РАН, 2011. С. 47–51.
7. *Николаева С. Б., Евзеров В. Я.* К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 5–14.
8. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region / Yu. A. Vinogradov [et al.] // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 46–52. <https://dx.doi.org/10.1134/S1062739116010113>
9. *Ловчиков А. В.* Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 68–73.
10. Эволюция земной коры и эндогенной металлогенической зональности северо-восточной части Балтийского щита / Ред. И. В. Бельков. Л. : Наука, 1987. 109 с.
11. *Загородный В. Г., Радченко А. Т.* Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). Л. : Наука, 1983. 96 с.

12. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500 000) / А. Т. Радченко [и др.]. СПб. : Наука, 1992. 111 с.
13. *Filatova V. T.* Formation of frame tectonogens in the northeastern part of the Baltic Shield // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 455, no. 2. P. 430–435. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>
14. *Мухелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966. 707 с.
15. *Crouch S. L., Starfield A. M.* Boundary element methods in solid mechanics. London : George Allen & Unwin, 1983. 322 p.
16. *Filatova V. T.* Evaluation of the stressed deformed State of the Earth's crust in the northeastern part of the Baltic Shield in the Late Archaean // *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 424, no. 1. P. 118–122. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010255>
17. *Калашник А. И., Максимов Д. А.* О подходе к оценке сейсмического риска и районированию Кольского полуострова применительно к поверхностным линейно-протяженным объектам // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2016. № 2. С. 44–51.
18. Сейсмичность при горных работах / Ред. Н. Н. Мельников. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2002. 325 с.

*Об авторе:*

**Филатова Валентина Тимофеевна**, ведущий научный сотрудник, Геологический институт Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», (184209, Россия, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7375-4573, Scopus Author ID: 7003828451, WoS ResearcherID: AAR-3435-2021, [filatova@geoksc.apatity.ru](mailto:filatova@geoksc.apatity.ru)**

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Mitrofanov, F.P., Pozhilenko, V.I., Smolkin, V.F., Arzamastsev, A.A., Yevzerov, V.Ya., Lyubtsov, V.V., Shipilov, E.V., Nikolaeva, S.B. and Fedotov, Zh.A., 1995. *Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield)*. Apatity: Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 144 p.
2. Nikolaeva, S.B., 2006. Seismogenic deformations in Early Holocene sediments of the Pechenga River terrace (Kola Peninsula). *Doklady Earth Sciences*, 406(1), pp. 4–7. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X06010028>
3. Ahjos, T. and Uski, N., 1992. Earthquakes in Northern Europe in 1375–1989. *Tectonophysics*, 207(1–2), pp. 1–23. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M)
4. Stepanov, V.V., 2001. [*Seismic Hazard of Industrial Infrastructure*]. Moscow: Nauka, 100 p. (in Russian).
5. Panasenko, G.D., 1969. [*Seismic Features of the Northeastern Baltic Shield*]. Leningrad: Nauka, 183 p. (in Russian).
6. Baranov, S.V., Vinogradov, Y.A., Nikolaeva, S.B. and Petrov, S.I., 2011. [Seismicity of Kola Peninsula according to instrumental data]. In: A. A. Malovichko, ed., 2011. [*Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data. Proceedings of the Sixth International Seismological Workshop*]. Obninsk: Publishing House of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, pp. 47–51 (in Russian).

7. Nikolaeva, S.B. and Yevzerov, V.Ya., 2018. On Geodynamics of the Kola Region in the Later Pleistocene and Holocene: the Review and Results of the Studies. *Proceedings of Voronezh State University, Geology*, (1), pp. 5–14 (in Russian).
8. Vinogradov, Yu.A., Asming, V.E., Kremenetskaya, E.O. and Zhirov, D.V., 2016. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region. *Journal of Mining Science*, 52(1), pp. 46–52. <https://dx.doi.org/10.1134/S1062739116010113>
9. Lovchikov, A.V., 2013. Review of the Strongest Rockbursts and Mining-Induced Earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*, 49(4), pp. 572–575. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS1062739149040072.pdf> (Accessed on 25 November 2021).
10. Bel'kov, I.V., ed., 1987. [*Evolution of the Earth's Crust and Endogenous Metallogenic Zonality in the Northeastern Part of the Baltic Shield*]. Leningrad: Nauka, 112 p.
11. Zagorodnyi, V.G. and Radchenko, A.T., 1983. [*Tectonics of the Early Precambrian in the Kola Peninsula (State of the Investigation and Problems)*]. Leningrad: Nauka, 96 p. (in Russian).
12. Radchenko, A.T., Balaganskii, V.V., Vinogradov, A.N., Golionko, G.B., Petrov, V.P., Pozhilenko, V.I. and Radchenko, M.K., 1992. [*Precambrian Tectonics of the Northeastern Part of the Baltic Shield (Explanatory Note to the Tectonic Chart 1: 500 000)*]. St.-Petersburg: Nauka, 110 p. (in Russian).
13. Filatova, V.T., 2014. Formation of Frame Tectonogens in the Northeastern Part of the Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, 455(2), pp. 430–435. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>
14. Muskhelishvili, N.I., 1966. [*Some of the Main Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*]. Moscow: Nauka, 707 p. (in Russian).
15. Crouch, S.L. and Starfield, A.M., 1983. *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. London: George Allen & Unwin, 322 p.
16. Filatova, V.T., 2009. Evaluation of the Stressed Deformed State of the Earth's Crust in the Northeastern Part of the Baltic Shield in the Late Archaean. *Doklady Earth Sciences*, 424(1), pp. 118–122. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010255>
17. Kalashnik, A.I. and Maksimov, D.A., 2016. On Approaches to Seismic Risk Assessment and Zoning of the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, (2), pp. 44–51 (in Russian).
18. Melnikov, N.N., ed., 2002. [*Seismicity in Mining*]. Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 325 p. (in Russian).

*About the author:*

**Valentina T. Filatova**, Leading Research Associate, Geological Institute of the Federal Research Centre “Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences”, (14 Fersman St., Apatity, 184209, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-7375-4573**, **Scopus Author ID: 7003828451**, **ResearcherID: AAR-3435-2021**, [filatova@geoksc.apatity.ru](mailto:filatova@geoksc.apatity.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*