

Поле напряжений Кольского региона с северо-восточным направлением максимального горизонтального сжатия

Бондарь И. В. , Маринин А. В.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, bond@ifz.ru

Аннотация. Данная работа посвящена изучению особенностей напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточной части Балтийского щита. Многочисленные работы предшественников по изучению тектонических напряжений земной коры Кольского региона различными тектонофизическими методами позволили выделить региональное поле напряжений с преобладанием сдвиговых обстановок с северо-западным направлением максимального сжатия. Авторами данной работы совместно с коллегами проводились многолетние полевые тектонофизические исследования Кольского региона. Благодаря комплексному применению метода катакластического анализа разрывных смещений Ребецкого Ю. Л., структурно-парагенетического метода Расцветаева Л. М., структурно-геоморфологического метода Сим Л. А., удалось подтвердить наличие поля напряжений северо-западного сжатия. Помимо этого, авторами выделено другое региональное поле напряжений, развитое повсеместно на всей территории Кольского региона – поле напряжений северо-восточного сжатия, связанное, по-видимому, с развитием Восточно-Баренцевоморского рифта, который развивается вглубь восточной части Балтийского щита, образуя Хибино-Контозерскую зону растяжения северо-восточного простиранья.

Ключевые слова: Поле напряжений, зеркало скольжения, оси главных напряжений, локальные напряжения, региональные напряжения, Кольский полуостров.

North-Eastern compression stress field of the Kola region

Bondar I. V. , Marinin A. V.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, bond@ifz.ru

Abstract. This work is devoted to the study of the features of the stress-strain state of the Earth's crust in the NE part of the Baltic Shield. Numerous works of his predecessors on studying the stresses of the Earth's crust in the Kola region by various tectonophysical methods allowed us to identify the regional shear stress field of the NW compression. The authors of this work, together with colleagues, conducted long-term field tectonophysical studies of the Kola region. Thanks to the complex application of the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements by Rebetzky Yu. L., the structural-paragenetic method by Rastsvetaev L. M., and the structural-geomorphological method by Sim L. A., it was possible to confirm the presence of a stress field of NW compression. In addition, the authors identified another regional stress field that is developed throughout the entire territory of the Kola region – the NE compression stress field, which is probably associated with the development of the East Barents Sea Rift, which develops deep into the eastern part of the Baltic Shield, forming the Khibiny-Kontozero extension zone of the NE strike.

Keywords: Stress field, slickensides, major stress axes, local stress, regional stress, Kola Peninsula.

Введение

При проектировании опорных геодезических сетей и создании крупных долговременных сооружений – портов, каналов, тоннелей, ГЭС, АЭС должны учитываться закономерности поля тектонических напряжений, определяемые с помощью инструментальных наблюдений и их тектонофизической интерпретации.

Тектонофизические исследования северо-востока Балтийского щита начались во второй половине XX в. с работ Гущенко О. И. (1979), в которых с помощью метода кинематического анализа структур разрушения проведена реконструкция полей тектонических напряжений в пределах Хибинского массива. В дальнейшем был проведен ряд тектонофизических работ на локальных участках северо-восточной части Балтийского щита (Николаев, 1992; Сим, 2000; Агибалов и др., 2016; Жиров и др., 2018). Площадные работы проводились В. И. Бабаком, Ф. Г. Касаткиной и Л. А. Сим (1981), для различных районов Кольского региона получены сходные кинематические стерео-

граммы трещинных структур, которые сформировались в условиях сдвигового поля напряжений: ось максимального сжатия субгоризонтальная, простирание от запад-северо-западного до субширотного, ось максимального растяжения тоже субгоризонтальная, простирание северо-северо-восточное, промежуточная ось – субвертикальная. В результате обобщения было выделено региональное сдвиговое поле напряжения северо-западного сжатия, фиксируемое на всей территории Кольского региона (Сим и др., 2011). Совместное применение метода катакластического анализа разрывных смещений Ребецкого Ю. Л. и структурно-парагенетического метода Расцветаева Л. М. позволили выявить другое, более проявленное региональное поле напряжения.

Методика исследования и исходные данные

В основу работы положены данные полевых исследований 2010–2024 гг. в виде замеров пространственной ориентировки геологических индикаторов деформаций – зеркал скольжения, отрывов, жил, зарисовок структур и прочих полевых наблюдений (рис. 1). Полевые работы проводились на южном и северном побережье Белого моря, в Лувеньгских тундрах, изучены обнажения вдоль системы озер Имандра и в окрестностях г. Мурманска, а также интрузивные массивы – Хибинский, Ловозерский, Мончегорский, Африканда. Полевые данные были обработаны с помощью комплекса тектонофизических методов.

Метод катакластического анализа (Ребецкий и др., 2017) применялся для реконструкции положения осей главных напряжений. Данный метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний (азимут и угол погружения осей максимального сжатия, растяжения и промежуточной). Для расчета использовалась программа STRESSgeol, разработанная в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН.

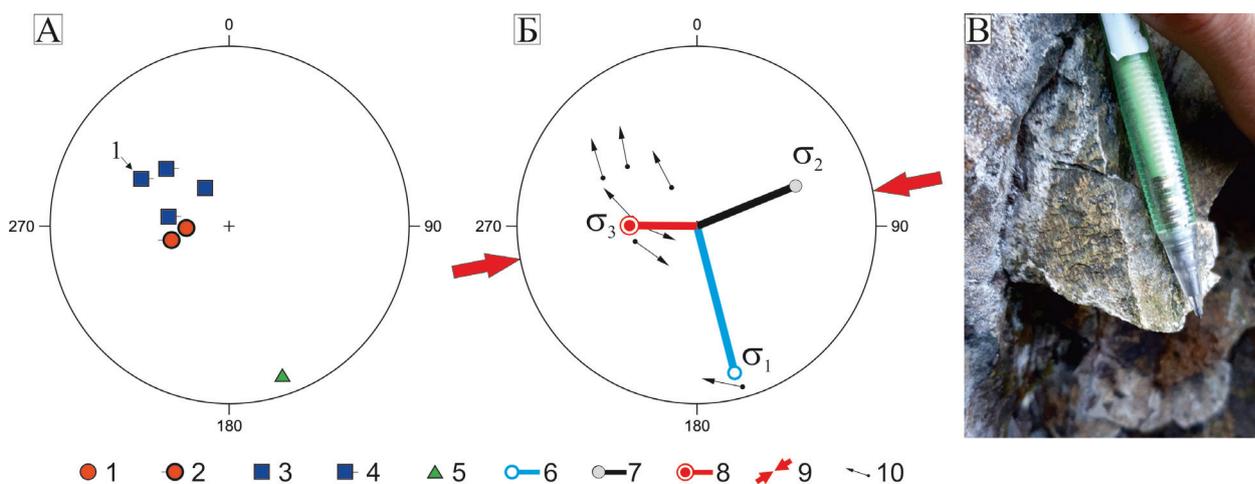


Рис. 1. Пример реконструкции осей главных напряжений. Стереогаммы (проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (А) и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа разрывных нарушений (Б): 1–5 – полюсы тектонических структур: 1 – взбросы, 2 – левые сдвиги-взбросы, 3 – сбросы, 4 – правые сдвиги-сбросы, 5 – правые сдвиги; 6–8 – оси главных нормальных напряжений: 6 – минимальных, 7 – промежуточных, 8 – максимальных сжимающих; 9 – направление максимального горизонтального сжатия; 10 – направление перемещения висячего блока в полюсах трещин (зеркал скольжения). На фото (В) – сбросовое зеркало скольжения с право-сдвиговой составляющей (полюс плоскости зеркала скольжения показан цифрой 1 стереогамме А)

Fig. 1. An example of reconstruction of the axes of the main stresses. Stereograms (projection of the upper hemisphere) showing the poles of the planes of tectonic fractures of various types (A) and the position of the axes of the main stresses determined by the method of cataclastic analysis of discontinuous faults (B): 1–5 – poles of tectonic structures: 1 – reverse fault, 2 – left reverse fault, 3 – normal faults, 4 – right normal faults, 5 – right strike-slips; 6–8 – axes of the main normal stresses: 6 – minimum, 7 – intermediate, 8 – maximum compressive; 9 – direction of maximum horizontal compression; 10 – direction of movement of the hanging block in the poles of joints (slickensides). In the photo (B) there is a slickensides with right normal faults component (the pole of the plane of the slickensides is shown by the number 1 in stereograms A)

Структурно-парагенетический метод применялся для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов и их объединения в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) (Расцветаев, 1987). Малые разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, жилы и другие используемые в данном методе геологические стресс-индикаторы несут информацию об одном или разных этапах деформирования в зависимости от их соотношений.

В некоторых случаях применялся структурно-геоморфологический метод (Сим, 1991), с помощью которого определялась кинематика некоторых разломов, а также ориентировки осей главных напряжений в зоне их геодинамического влияния.

Результаты исследования и обсуждение

В результате реконструкции получено 120 локальных стресс-состояний с характеристиками напряженно-деформированного состояния в каждой конкретной точке наблюдения, в частности получены ориентировки осей главных напряжений и направление максимального горизонтального сжатия. Ориентировки максимального горизонтального сжатия были вынесены на тектоническую схему Кольского региона (рис. 2) (Козлов и др., 2006; Чашин, Митрофанов, 2014). Розы-диаграммы ориентировок максимального горизонтального сжатия показывают наличие в пределах каждой крупной тектонической структуры как минимум двух основных направлений. В пределах Центрально-Кольского мегаблока преобладает субширотное и северо-восточное направления максимального горизонтального сжатия, Лапландско-Беломорский подвижный пояс характеризуется северо-западным и северо-восточным сжатием. В пределах Колвицкой гранулитовой зоны чет-

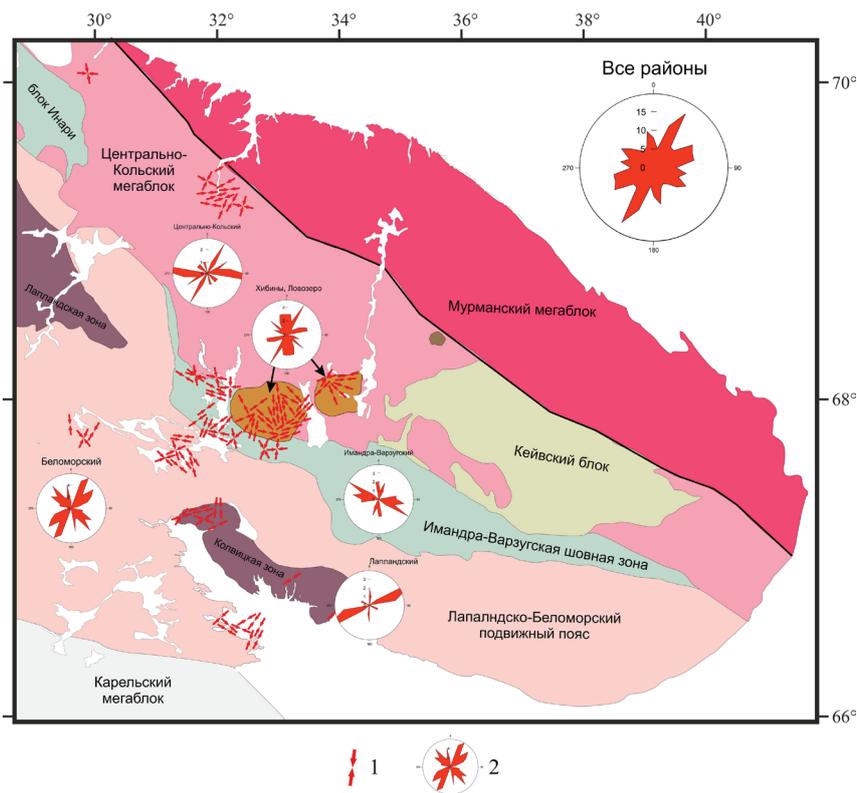


Рис. 2. Направления максимального горизонтального сжатия. Тектоническая схема (Козлов и др., 2006; Чашин, Митрофанов, 2014), с изменениями. На розах-диаграммах показаны преимущественные направления для разных структур и зон Кольского региона. В верхней части показана общая диаграмма по всем, полученным авторами данной работы, определениям. 1 – Направление максимального горизонтального сжатия; 2 – розы-диаграммы преимущественного направления максимального горизонтального сжатия

Fig. 2. Directions of maximum horizontal compression. The rose diagrams show the predominant directions in different tectonic blocks (zones) of the Kola Peninsula. The upper part shows the total for all the definitions made. 1 – The direction of maximum horizontal compression; 2 – roses-diagrams of the preferred direction of maximum horizontal compression

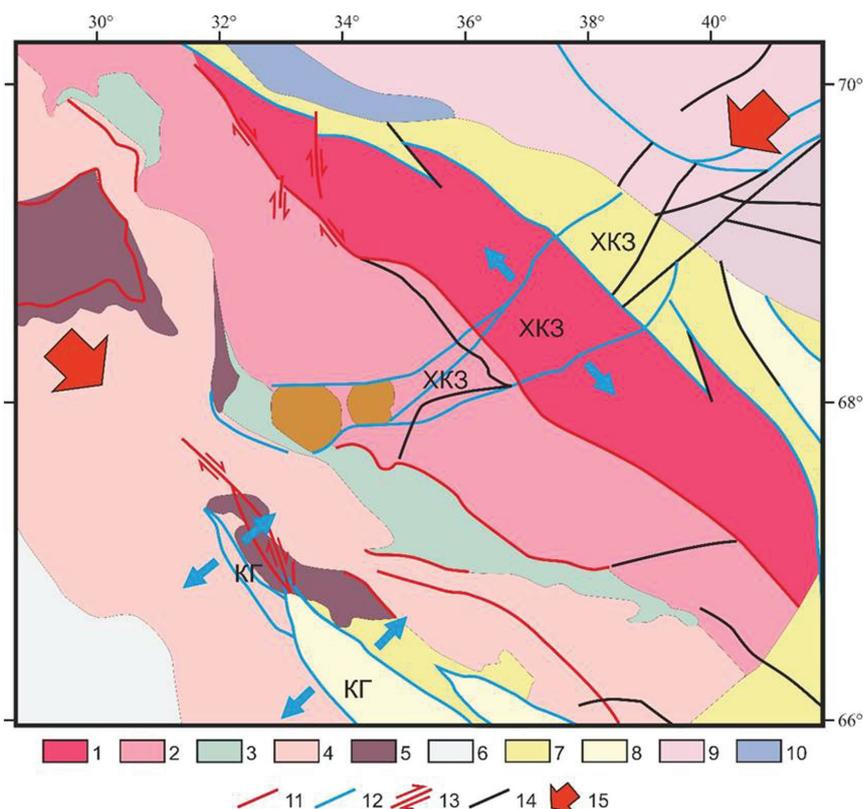


Рис. 3. Геодинамическая схема восточной части Балтийского щита. Составлена по результатам проведенных исследований, с использованием данных (Балуев, Терехов, 2010): 1–5 – тектонические провинции Кольского полуострова: 1 – Мурманский геоблок, 2 – Центрально-Кольский геоблок, 3 – Имандра-Варзугская шовная зона, 4 – Лапландско-Беломорский подвижный пояс, 5 – Лапландская и Колвизкая гранулитовые области; 6 – Карельский геоблок; 7 – плитная часть платформы; 8 – грабены палеорифтовой системы Белого моря; 9 – Тимано-Печорская плита; 10 – Свальбардская плита; 11–14 – разрывные нарушения: 11 – взбросы, 12 – сбросы, 13 – правые сдвиги, 14 – разломы с неопределенной кинематикой; 15 – направление сжатия регионального поля напряжения. КГ – Кандалакшский грабен, ХКЗ – Хибино-Контозерская зона растяжения

Fig. 3. The geodynamic scheme of the eastern part of the Baltic Shield, compiled based on the results of this work: 1–5 – tectonic provinces of the Kola Peninsula: 1 – Murmansk geoblock, 2 – Central Kola geoblock, 3 – Imandra-Varzug seam zone, 4 – Lapland-Belomorian mobile belt, 5 – Lapland and Kolvitskaya granulite regions; 6 – Karelian geoblock; 7 – plate part of the platform; 8 – grabens of the paleorift system of the White seas; 9 – Timan-Pechora plate; 10 – Svalbard plate; 11–14 – discontinuous faults: 11 – overflows, 12 – overflows, 13 – right shifts, 14 – faults with uncertain kinematics; 15 – direction of compression of the regional stress field. КГ – Kandalaksha graben, ХКЗ – Khibino-Kontozerskaya extension zone

ко проявлено северо-восточное сжатие, в Имандра-Варзугской шовной зоне (Мончегорский массив отнесен сюда же) наоборот, наиболее выражено северо-западное сжатие с подчиненным значением субмеридионального. В Хибинском и Ловозерском массивах проявлены различные направления максимального горизонтального сжатия, что связано с особенностями распределения напряжений кольцевых интрузивных массивов (Управление..., 1996; Жиров и др., 2018; Бондарь и др., 2023). На розе-диаграмме всех локальных стресс-состояний существенно преобладают ориентировки максимального горизонтального сжатия в северо-восточном направлении с небольшими вариациями. Северо-западная ориентировка максимального горизонтального сжатия выражена меньше. Таким образом, авторами данной работы, зафиксировано поле напряжений северо-западного сжатия, выделенное в работах предшественников, несмотря на разные методики и подходы. Это поле напряжений связывают с двумя крупными тектонически активными структурами – спредингом Срединно-Атлантического хребта на северо-запад от Фенноскандии (Бабак и др., 1981; Сим, 2000) и формированием Кандалакшского грабена, развивающегося вглубь Балтийского щита (Колодяжный, 2007; Латеральные..., 2013; Демахин, 2020).

Однако, по результатам данной работы более проявленным оказалось региональное поле напряжений с северо-восточной ориентировкой максимального сжатия. Возможно, оно связано с ограничивающей Восточно-Европейскую платформу с северо-востока Тимано-Варангерской зоной, проявляющей свою активность на протяжении палеозоя и мезозоя. К северо-западу она трассируется на зону, разделяющую Срединно-Атлантический хребет и хребет Гаккеля.

Но более вероятно, что северо-восточное направление максимального горизонтального сжатия в Кольском регионе связано с развитием Восточно-Баренцевского трога. Он расположен в пределах Баренцевоморской плиты и имеет субмеридиональное простирание. Эта рифтогенная структура заложилась в верхнем девоне и испытывает прогибание фактически до настоящего времени, накопив 18–20-километровый слой осадков (Балуев, Терехов, 2010). В Кольском регионе отмечаются следы вероятной пропагации рифта в сторону Балтийского щита, продолжение которого проявляется в виде Хибино-Контозерской разломной зоны с признаками растяжения. То есть крупная зона со структурами растяжения северо-восточного простирания, очевидно, может развиваться в поле напряжений с ориентировкой оси максимального горизонтального сжатия примерно вдоль оси зоны растяжения, то есть в направлении юго-запад – северо-восток (рис. 3).

Выводы

1. В пределах Кольского региона преобладают два основных направления максимального горизонтального сжатия – северо-восточное и северо-западное.

2. Поле напряжений северо-западного сжатия проявляется на всей территории исследования. Это направление согласуется с ориентировкой крупных тектонических структур – ортогонально оси Срединно-Атлантического срединного хребта и континентальной окраины на северо-западе от Фенноскандии, а также совпадает с направлением развития Кандалакшского грабена (вглубь Балтийского щита).

3. Выявлено региональное поле напряжений с северо-восточной ориентировкой максимального сжатия, которое может быть связано с ограничивающей Восточно-Европейскую платформу с северо-востока Тимано-Варангерской зоной, проявляющей свою активность на протяжении палеозоя и мезозоя, либо с пропагацией Восточно-Баренцевского трога, в виде Хибино-Контозерской зоны, вглубь восточной части Балтийского щита с северо-востока на юго-запад.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам Л. А. Сим, Д. В. Жирову, Ю. Л. Ребецкому, Н. А. Гордееву, А. Б. Молчанову, П. А. Каменеву за предоставленные материалы и программное обеспечение.

Исследования выполнены при поддержке Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Агибалов А. О., Зайцев В. А., Сенцов А. А. Влияние геологического строения и современного напряженного состояния на рельеф полуостровов Рыбачий и Средний (Кольский полуостров) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2016. Т. 91, № 4–5. С. 97–102.
2. Бабак В. И., Сим Л. А., Касаткин Ф. Г. Вариации тектонического поля напряжений восточной части Балтийского щита // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1981. Т. 56, № 1. С. 150.
3. Балуев А. С., Терехов Е. Н. Хибино-Контозерская тектоническая зона – структура пропагации Восточно-Баренцевского рифтогенного трога // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: Матер. XLIII Тектонического совещания. Т. 1. М. Изд-во: ГЕОС, 2010. С. 33–37.
4. Бондарь И. В., Маринин А. В., Сим Л. А. Кинематика малых дизъюнктивов и тектонические напряжения южной части Хибинского массива (Кольский полуостров) // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-116-121>.
5. Гордеев Н. А., Молчанов А. Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л. А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.
6. Гущенко О. И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М. Изд-во: Наука. 1979. С. 7–25.

7. Демахин А. Ю. Исследование структуры и сейсмичности приповерхностной зоны земной коры участков Беломорской сейсмогенной зоны на Кольском полуострове // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 5–12. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-5-12>.
8. Жиров Д. В., Маринин А. В., Жирова А. М., Сим Л. А. Неотектоника южной части Хибинского массива: результаты комплексной интерпретации противоречивых явлений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты. 2018. 140–143 с. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.033>.
9. Козлов Н. Е. Сорохтин Н. О., Глазнев В. Н., Козлова Н. Е., Иванов А. А., Кудряшов Н. М., Мартынов Е. В., Тюремнов В. А., Матюшкин А. В., Осипенко Л. Г. Геология архея Балтийского щита. СПб. Изд-во: Наука, 2006. 345 с.
10. Колодяжный С. Ю. Структурно-кинематические особенности эволюции центральной части Беломорско-Лапландского пояса в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 3. С. 46–68.
11. Латеральные тектонические потоки в литосфере Земли / Отв. ред. М. Г. Леонов. М. Изд-во: ГЕОС. 2013. 318 с.
12. Николаев П. Н. Методика тектоно-динамического анализа. М. Изд-во: Недра. 1992. 295 с.
13. Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 2002. 359 с.
14. Расцветаев Л. М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М. Изд-во: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.
15. Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям // Методы и алгоритмы. М. Изд-во: ГЕОС, 2017. 225 с.
16. Сим Л. А., Жиров Д. В., Маринин А. В. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 3. С. 219–243. <https://doi.org/10.5800/GT2011230044>.
17. Сим Л. А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3–22.
18. Сим Л. А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М. В. Гзовский и развитие тектонофизики. М. Изд-во: Наука, 2000. С. 326–350.
19. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / А. А. Козырев, В. И. Панин, В. И. Иванов, С. Н. Савченко и др. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 159 с., Ч. 2. 162 с.
20. Чашин В. В., Митрофанов Ф. П. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минерагения // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 1. С. 231–256.