



## Кинематика малых дизъюнктивов и тектонические напряжения южной части Хибинского массива (Кольский полуостров)

И.В. Бондарь✉, А.В. Маринин, Л.А. Сим

Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация  
✉ bond@ifz.ru

**Резюме:** В пределах Хибинского массива ведется активная разработка апатит-нефелиновых руд. Добыча ведется как открытым способом (карьер), так и закрытым (шахты). При расширении карьера и при проходке подземных горных выработок имели место техногенные происшествия, связанные с наличием в породах месторождения избыточных горизонтальных напряжений. В статье на основании полевых замеров пространственной ориентировки зеркал скольжения, собранных авторами в 2009–2019 гг., анализируется напряженное состояние южной части Хибинского массива. В течение длительного времени эти напряжения изучались различными методами, в том числе и тектонофизическими, однако в данной статье впервые производится реконструкция напряженного состояния с помощью метода катакластического анализа разрывных смещений. Всего реконструировано 20 локальных стресс-состояний на южную часть Хибинского массива. Выяснено, что распределение напряжений зависит в большей степени от радиальной структуры массива, что говорит о наличии в его пределах своего поля напряжений, почти не зависящего от внешних тектонических условий. Также выявлена закономерность распределения геодинамических типов напряженного состояния, которая связана с развитием Хибинского массива. Ближе к центру массива преобладают геодинамические типы максимального сжатия, которые к периферии массива сменяются геодинамическими типами горизонтального растяжения и горизонтального сдвига.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, зеркало скольжения, геодинамический тип напряженного состояния, оси главных напряжений, поле напряжений, Хибинский массив

**Благодарности:** Авторы выражают огромную благодарность нашим коллегам Д.В. Жирову и Ю.Л. Ребецкому за неоценимую помощь при организации полевых исследований и обсуждении результатов работ. Исследование выполнено в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

**Для цитирования:** 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):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-116-121>

## Kinematics of minor disjunctive structures and tectonic stresses in the southern part of the Khibiny massif

I.V. Bondar✉, A.V. Marinin, L.A. Sim

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

**Abstract:** The article analyzes the stress state of the southern part of the Khibiny massif on the basis of field measurements of the spatial orientation of slickenside collected by the authors in 2009–2019. Mining is actively going on within the massif, and the problem of excess horizontal stresses is acute during the development of quarries and mines. For a long time, these stresses have been studied by various methods, including the tectonophysical ones, however, in this article, for the first time ever, a reconstruction of the stress state is performed using the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. In total, 20 local stress states were reconstructed for the southern part of the Khibiny massif. It was found out that the stresses depend more on the morphology of the rock mass due to its rounded shape, which indicates the presence of its own stress field within the rock mass, almost independent of the external tectonic conditions. The regularity in distribution of geodynamic types of stress state is also revealed. Geodynamic types of maximum compression prevail closer to the center of the rock mass, which are replaced by geodynamic types of horizontal tension and horizontal shear towards the periphery of the rock mass.

**Keywords:** stress-strain state, slickenside, geodynamic type of stress state, axes of main stresses, stress field, Khibiny massif

**Acknowledgements:** The authors express their deep appreciation to their colleagues D.V. Zhirov and Yu.L. Rebetsky for their invaluable help in organizing the field studies and discussing the results of their work. The study was carried out within the framework of the State Assignment for the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Bondar I.V., Marinin A.V., Sim L.A. Kinematics of minor disjunctive structures and tectonic stresses in the southern part of the Khibiny massif. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-116-121>



## Введение

Хибинский массив долгие годы представляет собой уникальный природный полигон, имеющий длительную историю изучения природных тектонических напряжений [1–5]. Повышенный интерес к этому объекту объясняется как особенностями строения крупнейшего в мире щелочного массива, так и наличием в его пределах крупных месторождений апатит-нефелиновых руд. При этом одна из проблем, с которой сталкиваются в ходе разработки этих месторождений, заключается в присутствии избыточных горизонтальных напряжений [6; 7]. С ними связывают возникновение большого количества техногенных происшествий на рудниках [8]. На напряженно-деформированное состояние Хибин главным образом влияют разрывная тектоника и техногенные факторы, и такие агенты приводят к его общей неоднородности. Однако в пределах всего массива напряжения горизонтального сжатия преобладают над вертикальными сжимающими напряжениями, значительно превышая их. А вблизи разрывных нарушений уровень горизонтальных напряжений возрастает почти вдвое. В горных выработках помимо повышения уровня напряжений наблюдается и переориентировка направления максимального сжатия, что связано с изменением напряженного состояния при прокладывании шахт [6]. Для детального изучения параметров напряженно-деформированного состояния горных пород Хибинского массива необходимы комплексные исследования, в том числе на удалении от объектов горнорудной инфраструктуры с привлечением полевых тектонофизических методов.

## Ключевой участок

Район исследования расположен на Кольском полуострове в центральной части Мурманской области в районе Хибинского палеозойского интрузивного массива (рис. 1,

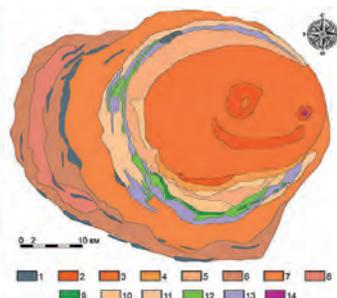
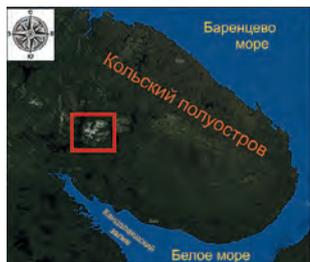


Рис. 1  
Слева – расположение района исследования, показанное красным квадратом. Справа – геологическая карта Хибинского массива. Из [4] с упрощениями:  
1 – нефелиновые фениты;  
2 – фойяиты массивные;  
3 – фойяиты трахитоидные;  
4 – щелочные сиениты;  
5 – лавочорриты;  
6 – хибиниты массивные;  
7 – хибиниты трахитоидные;  
8 – хибиниты нечеткотрахитоидные;  
9 – апатит-нефелиновые руды;  
10 – рисчорриты массивные;  
11 – рисчорриты гнейсовидные;  
12 – уртиты массивные;  
13 – ийолит-уртиты гнейсовидные;  
14 – карбонаты

Fig. 1  
On the left is the location of the study area, marked with a red square. On the right is a geological map of the Khibiny massif. From [4] with simplifications:  
1 – nepheline phenites;  
2 – massive foyaites;  
3 – trachytoid foyaites;  
4 – alkaline syenites;  
5 – lyavochorrites;  
6 – massive hibinites;  
7 – trachytoid hibinites;  
8 – indistinct trachytoid hibinites;  
9 – apatite-nepheline ores;  
10 – massive rischorrites;  
11 – gneissic rischorrites;  
12 – massive urtites;  
13 – gneissic iyolite-urtites;  
14 – carbonatites

слева). Исследования проводились в южной части массива в пределах месторождений «Олений ручей», «Коашвинское», «Апатитовый цирк», «Плато Расвумчорр», «Кукисвумчорр», а также в естественных обнажениях.

Хибинская интрузия имеет в плане форму овала размером примерно 44x35 км и площадью около 1330 км<sup>2</sup> [8]. Массив представляет собой конусообразный штوك, переходящий в лополит. В строении Хибинского массива выделяется 8 последовательных фаз внедрения, каждая фаза имеет свой состав (рис. 1, справа). В первую фазу образовались щелочные сиениты и массивные хибиниты, во вторую – трахитоидные хибиниты, в третью – рисчорриты, в четвертую – ийолит-уртиты, в пятую – эгириновые нефелиновые сиениты, в шестую – фойяиты, к седьмой и восьмой относят проявление вторичной альбитизации и образование эгирин-полевошпатовых пород и внедрение даек щелочных пород [9]. С четвертой фазой внедрения – так называемой ийолит-уртитовой дугой – связаны месторождения апатит-нефелиновых руд.

## Материалы и методы исследования

С 2009 г. в течение 10 лет авторами проводились тектонофизические исследования в южной части Хибинского массива. В ходе полевых работ собраны данные, включающие пространственную ориентировку трещин отрыва, жил, зон дробления и других индикаторов деформаций. Однако главная цель состояла в измерении пространственной ориентировки зеркал скольжения. Эти замеры легли в основу реконструкции напряженно-деформированного состояния с использованием тектонофизических методов. Замеры пространственной ориентировки проводились с помощью геологического компаса согласно методу катакластического анализа разрывных смещений [10]. Всего было собрано около 250 замеров зеркал скольжения.

Метод катакластического анализа [10; 11] применялся для реконструкции положения главных осей напряжения. Данный метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний (азимут и угол погружения оси максимального сжатия, оси максимального растяжения и промежуточной оси, а также коэффициент Лоде–Надаи). Под локальным стресс-состоянием авторы подразумевают параметры тензора поля напряжений. Для расчета и реконструкции положения главных осей напряжения использовалась программа STRESSgeol. Основным принципом работы программы является разделение зеркал скольжения на однородные выборки с достижением максимальной суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых этапов напряженного состояния.

Также применялся метод нахождения общих полей напряжений, подробно описанный в [12]. Суть метода заключается в поиске общего поля напряжений для некоторого количества локальных стресс-состояний. Авторы вводят термин «общее поле напряжений», или усредненное региональное поле напряжений, для более точного понимания данного метода. Согласно ему для всех значений локальных стресс-состояний с помощью кинематических стереограмм подбираются два конуса с углом при вершине 90°, оси которых взаимно перпендикулярны. В одном из них не должно быть осей растяжения локальных стресс-состояний, тогда ось конуса принимается за ось сжатия  $\sigma_3$  общего поля напряжений, а во втором конусе не должно быть

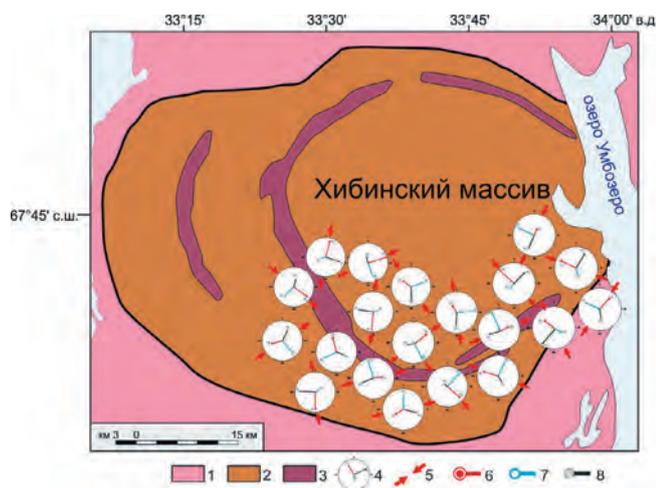
осей сжатия локальных стресс-состояний, в таком случае ось конуса принимается за ось растяжения  $\sigma_1$  общего поля напряжений.

### Результаты исследования и обсуждение

Проведенные реконструкции напряженного состояния позволили реконструировать 20 локальных стресс-состояний в пределах южной части Хибинского массива (табл. 1).

Среди преобладающих направлений осей максимального сжатия можно выделить запад-северо-западные (до субширотных) и северо-восточные, а также реже встречающиеся меридиональные ориентировки (рис. 2). Промежуточные оси часто занимают субвертикальное положение, но много и субгоризонтальных осей, имеющих северо-восточное и субширотное простирание. Оси максимального девиаторного растяжения ориентированы в север-северо-западном направлении или расположены субвертикально.

В результате применения метода нахождения общих полей напряжений получилось следующее. Общее, региональное поле напряжений Хибинского массива характеризуется взбросовым типом с пологой осью сжатия северо-восточного простирания и крутой осью растяжения

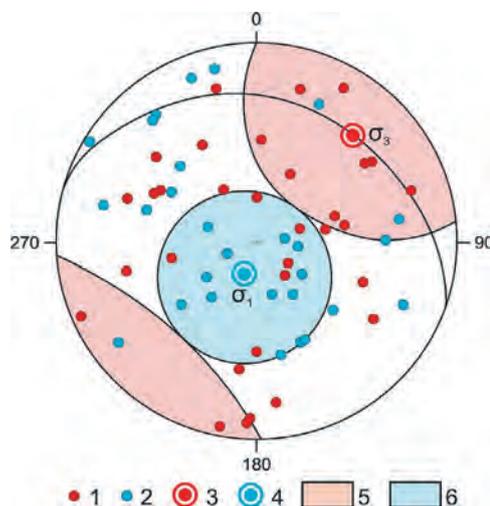


**Рис. 2**  
Положение локальных стресс-состояний южной части Хибинского массива, реконструированных методом катакlastического анализа разрывных нарушений:  
1 – вмещающие породы архей-протерозойского возраста;  
2, 3 – породы Хибинского массива:  
2 – фойайты, хибиниты, рисчорриты,  
3 – Щелочно-ультрамафитовая серия или фойдолиты (ийолит-уртитовая дуга);  
4 – локальные стресс-состояния и их местоположение (построены на верхнюю полусферу);  
5 – максимальное горизонтальное сжатие;  
6–8 – оси главных напряжений:  
6 – максимального сжатия,  
7 – максимального растяжения,  
8 – промежуточная

**Fig. 2**  
Distribution of the local stress-strain settings in the southern part of the Khibiny massif, as reconstructed by the cataclastic analysis:  
1 – Archean-Proterozoic country rocks;  
2, 3 – rocks of the Khibiny massif:  
2 – foyaites, khibinites, rischorrites,  
3 – alkaline-ultramafic series or foidolites (ijolite-urtite arc);  
4 – reconstructed local stress-strain settings and their accurate location (constructed on the upper hemisphere);  
5 – maximum horizontal stress;  
6–8 – axes of the principal stresses:  
6 – maximum compression,  
7 – maximum extension,  
8 – intermediate

(рис. 3). При определении общего поля напряжений в конусе сжатия присутствуют два определения осей локальных стресс-состояний, противоречащих найденному варианту оси сжатия «общего» поля, и два определения, находящихся в пределах ошибки определения ориентировок осей локальных стресс-состояний. В конусе растяжения также два определения осей локальных стресс-состояний противоречат найденной оси растяжения общего поля исследованной части Хибинского массива. То есть при всем разнообразии определений осей главных нормальных напряжений удастся найти вариант положения осей сжатия и растяжения усредненного регионального поля напряжений.

Это противоречит определенным ранее [12] региональным тектоническим сдвиговым полем напряжения с запад-северо-западной ориентировкой оси сжатия и северо-восточной оси растяжения, и может свидетельствовать о доминировании в пределах массива внутритектонических напряжений, генерируемых развитием и становлением массива над региональными внешними тектоническими напряжениями.



**Рис. 3**  
Реконструкция поля напряжений Хибинского массива методом нахождения общих полей напряжений [12]:  
1, 2 – оси главных напряжений для реконструированных локальных стресс-состояний:  
1 – максимального сжатия,  
2 – минимального сжатия (максимального растяжения);  
3, 4 – оси главных напряжений для усредненного регионального поля Хибинского массива:  
3 – ось максимального сжатия,  
4 – ось минимального сжатия (максимального растяжения);  
5–6 – положение конусов с углом при вершине 90°, оси которых взаимно перпендикулярны:  
5 – конус, в пределах которого не должно быть осей растяжения локальных стресс-состояний,  
6 – конус, в пределах которого не должно быть осей сжатия локальных стресс-состояний.

**Fig. 3**  
Reconstruction of the stress field of the Khibiny massif by the method of finding regional stress fields [12]:  
1, 2 – axes of principal stress for reconstructed local stress states:  
1 – maximum compression;  
2 – minimum compression (maximum tension);  
3, 4 – axes of principal stress for the averaged regional field of the Khibiny massif:  
3 – axis of maximum compression;  
4 – axis of minimum compression (maximum tension);  
5–6 – the position of cones with an angle at the apex of 90°, the axes of which are mutually perpendicular:  
5 – a cone within which there should be no axes of tension of local stress states,  
6 – a cone within which there should be no axes of compression of local stress states.



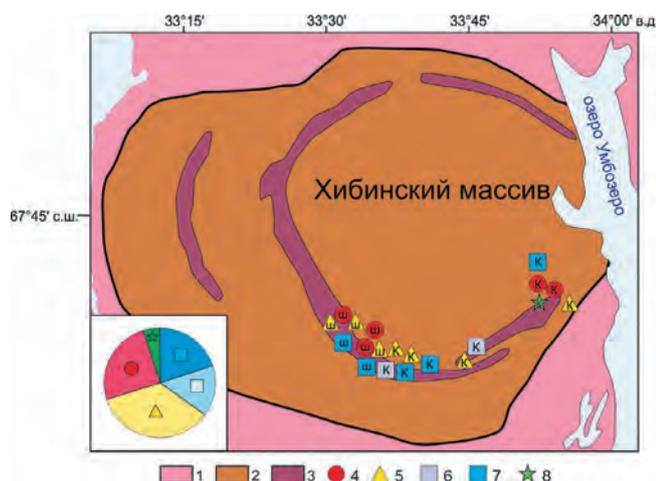
**Таблица 1**  
Параметры напряженного состояния в пределах Хибинского массива

**Table 1**  
Parameters of the stress state within the Khibiny massif

№	Номер точки	Участок	Координаты точек наблюдения		$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		Тип напряженного состояния	Количество замеров	
			с.ш.	в.д.	Аз Пд		Аз Пд		Аз Пд			N	N исп.
1	10519	Олений ручей	N 67 40.822	E 34 10.150	299	50	36	6	131	39	Поддвиг-взрез	7	3
2	10525	Олений ручей	N 67 41.470	E 34 11.090	43	65	222	25	312	1	Горизонтальное сжатие	16	8
3	10526	Олений ручей	N 67 41.314	E 34 11.378	346	65	211	18	116	16	Горизонтальное сжатие	19	11
4	Сим 8	Олений ручей	N 67 40.854	E 34 13.778	116	23	352	52	219	28	Горизонтальный сдвиг	22	17
5	10528	«Центральный»	N 67 37.693	E 33 52.082	331	6	73	65	238	24	Горизонтальный сдвиг	17	13
6	10529	«Восточный»	N 67 38.598	E 34 01.019	157	5	62	43	252	47	Горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом	18	8
7	10530	«Восточный»	N 67 38.329	E 34 00.500	206	16	328	62	109	23	Горизонтальный сдвиг	6	4
8	10532	«Центральный»	N 67 37.543	E 33 52.184	180	24	285	31	59	49	Горизонтальное растяжение	12	7
9	10533	«Центральный»	N 67 37.543	E 33 52.184	42	0	132	74	312	17	Горизонтальный сдвиг	5	4
10	10535	«Центральный»	N 67 37.696	E 33 52.111	163	6	69	36	260	54	Горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом	8	6
11	15001	Расвумчорр	N 67 40.026	E 33 41.8481	256	65	99	23	6	9	Горизонтальное сжатие	9	7
12	15002	Расвумчорр	N 67 40.026	E 33 41.8481	64	23	294	56	165	24	Горизонтальный сдвиг	4	4
13	15012	Расвумчорр	N 67 40.026	E 33 41.8481	236	69	94	17	0	13	Горизонтальное сжатие	5	5
14	16437	«Центральный»	N 68 37.800	E 33 54.510	263	18	5	30	148	54	Горизонтальное растяжение	4	4
15	гор. 236-7	Кировский рудник	67.655843	33.621892	340	31	162	59	71	1	Горизонтальный сдвиг	5	5
16	гор. 236-9	Кировский рудник	67.655843	33.621892	76	65	289	21	194	12	Горизонтальное сжатие	4	4
17	гор. 170-10	Кировский рудник	67.655843	33.621892	319	27	206	38	74	41	Горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом	5	5
18	гор. 170-11	Кировский рудник	67.655843	33.621892	46	32	194	53	306	15	Горизонтальный сдвиг	5	5
19	18661	Олений ручей	N 67 41.904	E 34 10.196	294	0	24	27	204	63	Горизонтальное растяжение	4	3
20	18000	Расвумчорр	N 67 53.398	E 34 36.9274	249	28	358	31	126	48	Горизонтальное растяжение	11	9

Примечание. В столбцах указано название участка, в пределах которого располагается точка наблюдения; номер и координаты точки наблюдения; реконструированные ориентировки осей главных напряжений ( $\sigma_1$  – минимальных,  $\sigma_2$  – промежуточных и  $\sigma_3$  – максимальных сжимающих напряжений); тип напряженного состояния; общее и использованное для расчета количество полевых измерений (зеркал скольжения).

Note. The columns indicate the name of the site within which the observation point is located; the number and coordinates of the observation point; the reconstructed orientations of the principal stress axes ( $\sigma_1$  - minimum,  $\sigma_2$  - intermediate and  $\sigma_3$  - maximum compressive stresses); type of the stress state; the total number and the number of field measurements (slickensides) used in the calculation.



**Рис. 4**  
Распределение геодинамических типов напряженного состояния в южной части Хибинского массива, полученных на основании замеров зеркал скольжения в подземных горных выработках (ш) и карьерах (к). На врезке показано распределение типов напряженного состояния для исследованной территории: 1 – вмещающие породы архей-протерозойского возраста; 2, 3 – породы Хибинского массива: 2 – фойайиты, хибиниты, рисчорриты, 3 – щелочные ультрамафиты (ийолит-уртитовая дуга); 4–8 – геодинамические типы напряженного состояния: 4 – горизонтального сжатия, 5 – горизонтального сдвига, 6 – горизонтального растяжения со сдвигом, 7 – горизонтального растяжения, 8 – подвиг-взреза

**Fig. 4**  
Distribution of geodynamic types of stress state in the southern part of the Khibiny massif obtained by measuring slickenside in underground mines (ш) and quarries (к): 1 – Archaean-Proterozoic country rocks; 2, 3 – rocks of the Khibiny massif: 2 – foyaites, khibinites, rischorrites, 3 – alkaline-ultramafic series or foidolites (ijolite-urtite arc); 4–8 – geodynamic types of stress state: 4 – horizontal compression, 5 – horizontal shear, 6 – horizontal tension in combination with a shear, 7 – horizontal tension, 8 – underthrust

При сравнении полученных ориентировок оси максимального сжатия с *in situ* измерениями в рудниках Хибинского массива наблюдается сходство. Данные прямых измерений напряжений в рудниках Хибинского массива показали, что здесь наблюдается напряженное состояние, близкое к осесимметрическому. То есть в юго-восточной части массива преобладает северо-восточное сжатие, в южной части – субширотное сжатие, а в юго-западной части – северо-западное [13].

По сравнению с меняющимися по азимуту погружения ориентировками осей главных напряжений более устойчив и информативен тип напряженного состояния, определяемый по положению осей на зенит. Таким образом, в центральной части массива преобладают геодинамические типы горизонтального сжатия (рис. 4), а по периферии массива – горизонтального сдвига и горизонтального растяжения. Это объясняется тем, что массив развивается по типу протрузивного поднятия приповерхностной центральной части массива с одновременным смещением от центра к периферии в радиальном направлении за счет разгрузки остаточных горизонтальных напряжений [14].

#### Заключение

1. В пределах южной части массива зафиксировано несколько преобладающих ориентировок осей максимального сжатия: запад-северо-западное (до субширотного), северо-восточное, а также реже встречающиеся меридиональное.
2. Ориентировки осей главных напряжений в пределах Хибин показывают зависимость от радиальной структуры и геологического строения массива.
3. Общее поле напряжений Хибинского массива характеризуется взбросовым типом с пологой осью сжатия северо-восточного простирания и крутой осью растяжения.
4. Региональное сдвиговое поле напряжения с запад-северо-западной ориентировкой оси сжатия, фиксируемое на территории всего Кольского полуострова, проявлено в пределах массива слабо, что говорит о преобладании внутреннего поля напряжения над внешним.

#### Список литературы

1. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. В кн.: Григорьев А.С., Осокина Д.Н. (ред.) *Поля напряжений и деформаций в литосфере*. М.: Наука; 1979. С. 7–25.
2. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Жиров Д.В., Смагина Ю.Г. Саамский разлом (Хибины) – аномальный характер современных деформаций. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2009;12(4):702–707. Режим доступа: <http://vestnik.mstu.edu.ru/show.shtml?art=893>
3. Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. История и результаты изучения тектонических напряжений Кольского региона полевыми тектонофизическими методами. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2013;(10):96–99.
4. Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита. *Геодинамика и тектонофизика*. 2011;2(3):219–243. <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044>
5. Самсонов А.А. Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;(1):62–67. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67>
6. Козырев А.А., Семенова И.Э., Земцовский А.В. Анализ условий реализации горного удара на Расвумчоррском руднике 14 февраля 2012 г. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(4):28–33. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2013/4/28-33\\_Kozirev\\_-\\_6\\_str.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2013/4/28-33_Kozirev_-_6_str.pdf)
7. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины Ловозеро, Ковдор). *Геология рудных месторождений*. 2017;59(4):263–280. <https://doi.org/10.7868/S0016777017040049>
8. Жиров Д.В., Климов С.А., Пантелеев А.В., Жирова А.М. Выделение факторов контроля геодинамических опасностей на примере 3D геолого-структурной модели природотехнической системы «рудник Расвумчоррский – карьер Центральный» (Хибины). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(7):200–226.



9. Зак С.И., Колесников Г.П. (сост.) *Геологическая карта масштаба 1:200 000, лист Q-36-IV*. Объяснительная записка. М.: Недра; 1964.
10. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. *От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям*. М.: ГЕОС; 2017. 234 с.
11. Ребецкий Ю.Л. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Наука; 2007. 406 с.
12. Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы. В кн.: М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука; 2000. С. 326–350.
13. Козырев А.А., Панин В.И., Иванов В.И., Савченко С.Н., Тимофеев В.В., Ловчиков А.В. и др. *Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах*. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 1996.
14. 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*. 2018;(15):140–143. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.033>

## References

1. Gushchenko O.I. Method of kinematic analysis of fracture structures during reconstruction of tectonic stress fields. In: Grigoriev A.S., Osokina D.N. (eds) *Stress and strain fields in the lithosphere*. Moscow: Nauka; 1979, pp. 7–25. (In Russ.)
2. Kozyrev A.A., Kasparian E.V., Zhirov D.V., Smagina Yu.G. The saamsky fault (the Khibiny massif) – an abnormal nature of the recent deformations. *Vestnik of MSTU*. 2009;12(4):702–707. (In Russ.) Available at: <http://vestnik.mstu.edu.ru/show.shtml?art=893>
3. Sim L.A., Zhirov D.V., Marinin A.V. History and results of the study of tectonic stresses of the Kola region by field tectonophysical methods. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*. 2013;(10):96–99. (In Russ.)
4. Sim L.A., Zhirov D.V., Marinin A.V. Stress-and-strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011;2(3):219–243. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044>
5. Samsonov A.A. Assessment of rock mass state of Oleniy Ruchey rock burst deposit based on the results of stress measurements. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019;(1):62–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67>
6. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zemtsovskiy A.V. Analysis of rock burst realization conditions in the Rasvumchorrskiy mine of “Apatit” JSC in 14.02.2012. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(4):28–33. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2013/4/28-33\\_Kozirev\\_-\\_6\\_str.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2013/4/28-33_Kozirev_-_6_str.pdf)
7. Rebetsky Y.L., Sim L.A., Kozyrev A.A. Possible mechanism of horizontal overpressure generation of the Khibiny, Lovozero, and Kovdor ore clusters on the Kola peninsula. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(4):265–280. <https://doi.org/10.1134/S1075701517040043>
8. Zhirov D.V., Klimov S.A., Panteleev A.V., Zhirova A.M. Identification of geodynamic hazard control factors in terms of 3D geological-structural model of the natural-tectonic Rasvumchorr mine-Tsentralny open pit system in Khibiny. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(7):200–226. (In Russ.)
9. Zak S.I., Kolesnikov G.P. (eds) *Geological map scale 1:200 000, sheet Q-36-IV*. Explanatory note. Moscow: Nedra; 1964. (In Russ.)
10. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. *From slickenside to tectonic stresses*. Moscow: GEOS; 2017. 234 p. (In Russ.)
11. Rebetsky Yu.L. *Tectonic stresses and strength of mountain massifs*. Moscow: Nauka; 2007. 406 p. (In Russ.)
12. Sim L.A. The influence of global tectogenesis on the newest stressed state of the platforms of Europe. In: M.V. Gzovsky and the development of tectonophysics. Moscow: Nauka; 2000, pp. 326–350. (In Russ.)
13. Kozyrev A.A., Panin V.I., Ivanov V.I., Savchenko S.N., Timofeev V.V., Lovchikov A.V. et al. *Management of rock pressure in tectonically stressed massifs*. Apatity: Kola Science Center RAS; 1996. (In Russ.)
14. Zhirov D.V., Marinin A.V., Zhirova A.M., Sim L.A. Neotectonics of the southern part of the Khibiny massif: the results of the complex interpretation of contradictory phenomena. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*. 2018;(15):140–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.033>

### Информация об авторах

**Бондарь Иван Владимирович** – научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [bond@ifz.ru](mailto:bond@ifz.ru)

**Маринин Антон Витальевич** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

**Сим Лидия Андреевна** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

### Information about the authors

**Ivan V. Bondar** – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; [bond@ifz.ru](mailto:bond@ifz.ru)

**Anton V. Marinin** – Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Lydia A. Sim** – Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

### Article info

Received: 09.01.2023

Revised: 26.01.2023

Accepted: 29.01.2023

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.01.2023

Поступила после рецензирования: 26.01.2023

Принята к публикации: 29.01.2023