

Вариации напряженно-деформированного состояния в районе Вуоксинской разломной зоны (Выборгский район)*

А. В. Маринин, Л. А. Сим, И. В. Бондарь

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук,
Российская Федерация, 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Для цитирования: Маринин, А. В., Сим, Л. А., Бондарь, И. В. (2021). Вариации напряженно-деформированного состояния в районе Вуоксинской разломной зоны (Выборгский район). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (2), 396–412.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.211>

Полевыми тектонофизическими методами вдоль зоны Вуоксинского глубинного разлома (Карельский перешеек) определены характеристики напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, а также кинематический тип разломов на новейшем этапе. Основная информация получена по геологическим индикаторам напряжений/деформаций, которые большей частью были представлены на исследованной территории за мерами малых разрывных нарушений и зеркал скольжения с кинематической информацией (направлением относительного смещения) на поверхности дизъюнктива. Вблизи Вуоксинской разломной зоны фиксируются системы разрывных нарушений с близкой к простиранию этой региональной дизъюнктивной структуры ориентировкой. Особенно четко проявлены сдвиги, а общее количество разрывных нарушений со сбросовой и взбросовой кинематикой составляет здесь менее четверти. Для реконструкции напряженно-деформированного состояния использован метод катакластического анализа разрывных смещений и созданная на его основе программа *STRESSgeol*. В исследованном районе установлено значительное разнообразие положения осей главных нормальных напряжений, среди которых для максимального сжатия выделены два основных направления — северо-восточное (до ВСВ) и северо-западное (до ЗСЗ). Оси максимального девиаторного растяжения субгоризонтальны и направлены в север — северо-восточном и северо-западном (до ЗСЗ) направлениях. Промежуточная ось чаще занимает субвертикальное положение. Для всей зоны преобладает тип напряженного состояния горизонтального сдвига, для которого характерны латеральные сдвиговые перемещения по разломной зоне. Такой тип напряженного состояния исследованной части Балтийского щита существенно отличается от типов напряженного состояния горно-складчатых систем, где наравне с горизонтальным сдвигом доминирует обстановка горизонтального сжатия. Полученную изменчивость направлений максимального сжатия в изученном районе предварительно можно соотнести с выделенной ранее зоной «неустойчивых тектонических напряжений» Восточно-Европейской платформы.

Ключевые слова: Балтийский щит, Вуоксинский разлом, пещеры Иностранцева, тектонические напряжения, тип напряженного состояния, структурные парагенезы, зеркала скольжения, разрывы, отрывы, трещины.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке госзадания ИФЗ РАН.

1. Введение

Район исследования расположен в Выборгском районе Ленинградской области, недалеко от Каменногорска, на севере Карельского перешейка. Рельеф Карельского перешейка представлен грядами (сельгами) и межгрядовыми понижениями северо-западного простирания, системами озер и соединяющих их рек. Абсолютные отметки вершин сельг возрастают с юго-востока на северо-запад от 45 до 130 м, а в межгрядовых понижениях изменяются от 25 до 90 м. Город Каменногорск, именовавшийся до 1940 г. Антреа, и его окрестности расположены в Прибалтийской низменности. В центральной ее части северо-западного простирания Вуоксинская низина разделяет гряды Карельского перешейка на две части. Поверхность низины слабоволнистая, почти равнинная, наклоненная на юго-восток к Ладожскому озеру с изменением абсолютных отметок примерно от 50 до 5 м на побережье (Геология..., 1971).

Находящийся на южной окраине Балтийского кристаллического щита район исследования сложен архейскими и нижнепротерозойскими метаморфическими комплексами, представленными биотитовыми, амфиболо-биотитовыми и слюдяными гнейсами, а также кристаллическими сланцами с интрузиями кислых и основных пород (Геология..., 1971). Дорифейские кристаллические породы представляют собой часть крупной Восточно-Финляндской синклинорной зоны, прослеживающейся на юге под акваторией Ладожского озера, а на северо-западе на территории Финляндии породы представлены в основном гранитами рапакиви. Здесь развиты сильно сжатые и изоклинальные близвертикальные складки преимущественно северо-западного простирания (Балтыбаев и др., 2000). Архей представлен гранито-гнейсами, нижний протерозой — сложно дислоцированной толщей гнейсов различного состава с резко подчиненными маломощными телами амфиболитов, кварцитов, известняков. На запад нижнепротерозойские образования постепенно переходят в гнейсовый комплекс главной свекофенской зоны Южной Финляндии и Центральной Швеции.

Исследуемый район относится к нижнепротерозойской складчатой зоне Карельского геотектонического района (Свекофенской ветви). Свекофенская система складчатости протягивается из Финляндии через Карельский перешеек в южном направлении до широты г. Старой Руссы. Свекофенская система складчатости представляет область с чередованием синформных и антиформных складок, сложенную разнообразными по составу породами. Наибольшее распространение имеют биотитовые гнейсы, менее распространены гнейсы, содержащие гранат, кордиерит и силлиманит. Значительные по размерам площади сложены гранитами и мигматитами. Мигматиты часто приурочены к антиклиналям, где они развиваются по биотитовым гнейсам. Магматические образования представлены архейскими плагиогранитами, гранитами рапакиви и интрузиями основных пород.

По геофизическим и частично геологическим данным устанавливаются многочисленные разломы различного простирания и времени заложения. По периферии склонов Балтийского щита выделяются зона долгоживущих разломов и связанное с ними резкое погружение кристаллического фундамента. Эта мобильная зона определяет границу Балтийского щита и его погруженных склонов (Хазов и др., 2004). Для данного района отмечается наличие системы обновленных разрывов северо-западного простирания, также второстепенных систем северо-восточно-

го (азимут простираания СВ 60°) и северо-северо-западного (азимут простираания 350°) простираания (Никонов и др., 2014). Они предопределяют форму делимости рассматриваемой области на блоковые элементы. Наиболее четко проявлена система северо-западного простираания (азимут простираания СЗ 310–330°), которая в изученном районе представлена, собственно, Вуоксинской разломной зоной, разделяющей Выборгский и Приозерский блоки фундамента. Разломы северо-западного простираания в целом совпадают с простираанием осей складок протерозойской складчатой системы. Из других систем достаточно хорошо выражены зоны субмеридиональных разломов, а субширотные зоны выделяются лишь фрагментарно (Светов и Свириденко, 1991; Хазов и др., 2004).

Выборгский район в последние годы был недостаточно охвачен структурно-геологическими исследованиями, что определило цели полевых тектонофизических работ по изучению кинематики систем мелких разрывных нарушений и зеркал скольжения, которые являются геологическими индикаторами тектонических деформаций и могут быть использованы для реконструкции палео напряженно-деформированного состояния массива горных пород. В 2009 г. совместно с группой А. А. Никонова, которая занималась изучением древних землетрясений и скальных деформаций вблизи пещер Иностранцева, нами проведены полевые тектонофизические исследования на естественных обнажениях и на открытых карьерах вблизи Каменногорска. Основными объектами нашего изучения стали тектоническая трещиноватость, широко развитая в небольших скальных выходах и карьерах, зеркала скольжения, отрывы, жилы и зоны дробления. Перечисленные тектонические структуры объединяются под общим названием геологические индикаторы напряжений/деформаций.

Проведенные исследования древних землетрясений и формирований пещер Иностранцева были недавно опубликованы (Никонов и др., 2014; Shvarev et al., 2018). В нашей статье мы коснемся в основном тектонофизических вопросов, связанных с определением напряженно-деформированного состояния в районе исследования с использованием вышеупомянутых геологических индикаторов тектонических деформаций.

2. Методы и материалы исследования

Собранные данные включают около 300 замеров, в том числе 150 замеров с кинематической информацией на поверхности разрывных нарушений. Основные точки наблюдения и собранные в этих точках данные по тектонической трещиноватости и малым разрывным нарушениям представлены на рис. 1. Таблица с данными полевых замеров размещена в приложении к статье (Приложение 2¹). Помимо замеров полевые материалы включают зарисовки и фотографии различных геологических структур.

При анализе систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) применен структурно-парагенетический метод Л. М. Расцветаева (1987). Малые разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, жилы и другие геологические стресс-индикаторы, используемые в данном методе, дают информацию о разных этапах

¹ Приложение 2 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/6614/7481>. Приложение дано в авторской редакции.

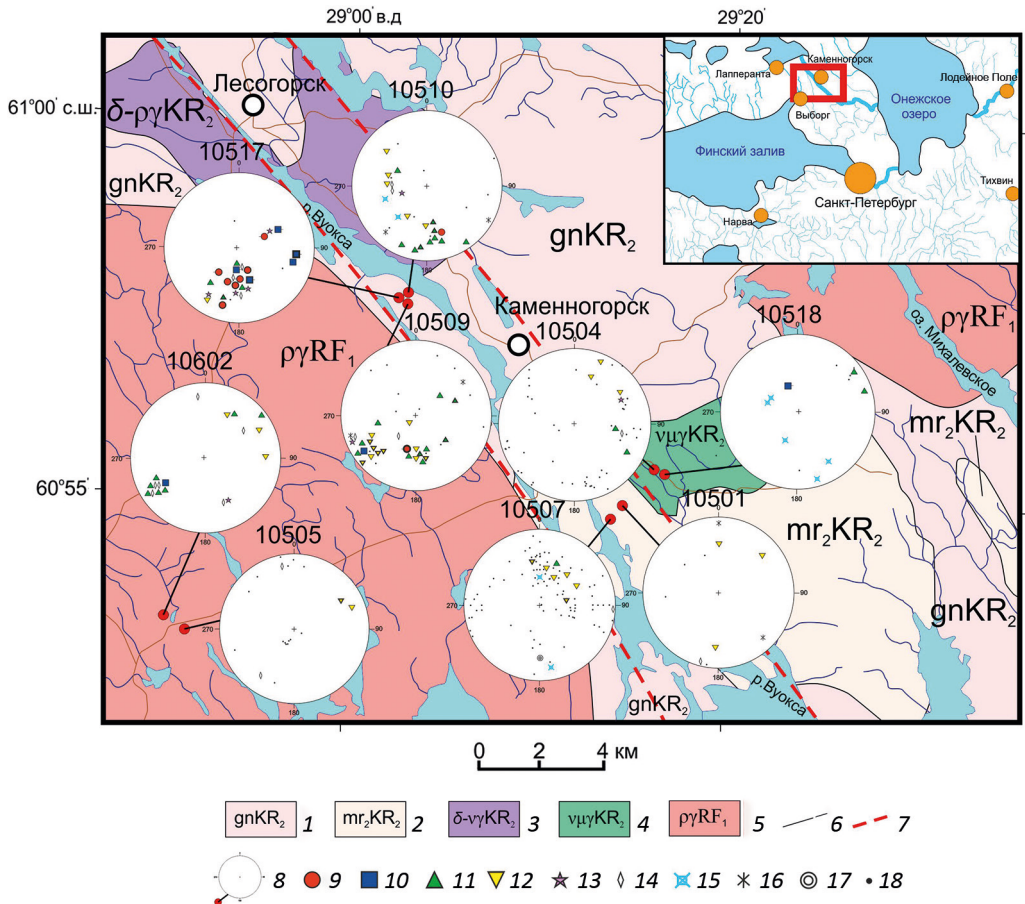


Рис. 1. Карта района исследований с точками наблюдения:

1 — метаморфические комплексы нижнего протерозоя; 2 — плутоно-метаморфические комплексы нижнего протерозоя (мигматит-граниты); 3 — интрузивные породы нижнего протерозоя (габбро, монцогаббро, диориты, монцониты, сиениты, граниты); 4 — интрузивные породы нижнего протерозоя (габбро, габбродиориты, реже граниты); 5 — интрузивные породы нижнего рифея (граниты-рапакиви); 6 — геологические границы; 7 — предполагаемые границы Вуоксинской разломной зоны; 8 — точки наблюдения и круговые диаграммы в стереографической проекции верхней полусферы с полюсами к плоскостям тектонических трещин и разрывных нарушений (на данном рисунке и далее показана преимущественная составляющая для типа перемещения): 9 — взбросы, 10 — сбросы, 11 — правые сдвиги, 12 — левые сдвиги, 13 — перемещения взбросовые или сбросовые (по падению/восстанию без определения относительного направления перемещения), 14 — сдвиги с неустановленным направлением относительного смещения, 15 — отрывы, 16 — жилы, 17 — зоны дробления, 18 — трещины.

Использованы данные геологической карты масштаба 1:500 000 P-36-B (atlaspacket.vsegei.ru, n. d.) с изменениями

деформирования и их структурно-геологическом соотношении. Обработка данных полевых замеров зеркал скольжения с выявленным направлением относительного смещения их крыльев проводилась с помощью метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л.Ребецкого (2007). Для реконструкции напряженно-деформированного состояния применялась программа *STRESSgeol*, разработанная в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН и использующая алгоритмы вышеуказанного метода (Ребецкий и др., 2017). В программе заложен принцип разделения сколов на однородные выборки, определяющие временные фазы квазиоднородного деформирования макрообъема, для достижения максимальности суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз. Метод катакластического анализа позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений/деформаций и коэффициент Лоде — Надаи. Метод поясов трещиноватости в зонах разломов (Данилович, 1961) использован для определения ориентировки плоскости сместителя и линии основного перемещения по этой плоскости в случае, когда известно направление простирания разлома. При имеющихся дополнительных данных об относительном перемещении крыльев изучаемого разлома (например, известна взбросовая или сбросовая компонента нарушения) возможно представление линии перемещения в виде вектора перемещения по плоскости данного разлома.

3. Результаты исследований

Исследования проведены на трех основных участках, расположенных к северо-востоку от Выборга вблизи долины р. Вуоксы.

3.1. Юго-западный участок

Юго-западный участок в районе пос. Возрождения включает две точки наблюдения, расположенные около трассы газопровода, пересекающего автодорогу Выборг — Каменногорск (рис. 1). В точке наблюдения № 10602 хорошо проявлена система правых сдвигов северо-западного простирания. Система левых сдвигов субмеридионального простирания проявлена слабее (единичные зеркала скольжения со штриховкой и бороздами скольжения). С помощью структурно-парагенетического метода для точки наблюдения реконструирована обстановка горизонтального сдвига с субмеридиональным (ССЗ) направлением максимального сжатия. В точке наблюдения № 10505, наоборот, проявлены только левые сдвиги субмеридионального (ССЗ) простирания, а также система субгоризонтальных трещин и две системы субвертикальных трещин с простиранием по Аз СЗ 350° и СВ 50°.

3.2. Каменногорский участок

Каменногорский участок расположен на северо-западе исследованного района непосредственно в пределах Вуоксинской разломной зоны. Замеры малых структурных форм на участке проведены в карьерах строительных материалов северо-западнее Каменногорска (точки наблюдения № 10509, 10510 и 10517).

В точке наблюдения № 10509 хорошо проявлено два условных этапа формирования зеркал скольжения (рис. 2). Один из них связан с субширотным (ЗСЗ) макси-

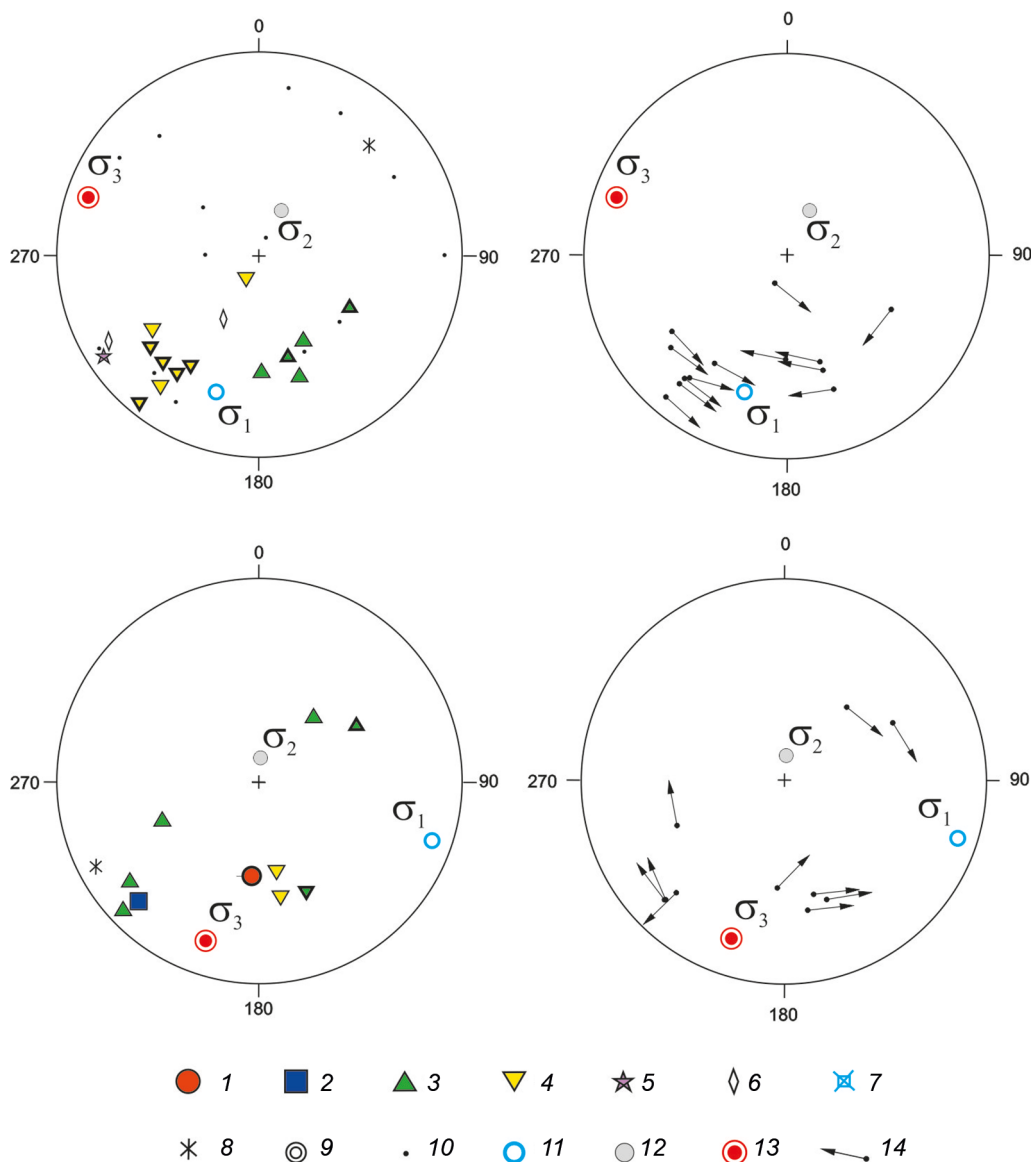


Рис. 2. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса к плоскостям тектонических трещин и разрывных нарушений разного кинематического типа, а также положение осей главных напряжений в точке наблюдения № 10509 (участок «Каменногорск») для двух структурных парагенезов субширотного и северо-восточного максимального сжатия:

1–10 — полюса к плоскостям тектонических трещин и разрывных нарушений с преимущественным типом перемещений: 1 — взбросы, 2 — сбросы, 3 — правые сдвиги, 4 — левые сдвиги, 5 — перемещения с неустановленным направлением относительного смещения по падению/восстанию (взбросы или сбросы), 6 — сдвиги с неустановленным направлением относительного смещения, 7 — отрывы, 8 — жилы, 9 — зоны дробления, 10 — трещины, 11–13 — оси главных нормальных напряжений: 11 — минимальных, 12 — промежуточных, 13 — максимальных, 14 — направление относительного перемещения всяческого блока, показанное в полюсе к плоскости зеркала скольжения. Толщина линий значков (1–4) указывает на степень достоверности определения кинематики смещения: толстые линии соответствуют хорошей достоверности, тонкие — предполагаемой

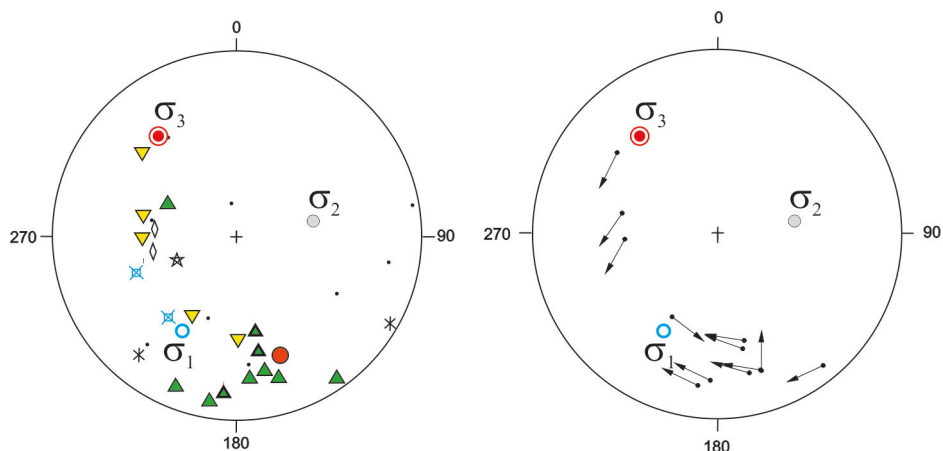


Рис. 3. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса к плоскостям тектонических трещин и разрывных нарушений разного кинематического типа, а также положение осей главных напряжений в точке наблюдения № 10510. Условные обозначения на рис. 2

мальным сжатием, при котором формировались правые сдвиги северо-восточного простирания и левые сдвиги северо-западного простирания. Другой этап связан с максимальным сжатием северо-восточного направления. Этой обстановкой определяется формирование правосдвиговых нарушений северо-западного простирания и левосдвиговых субширотного (ВСВ) простирания. Одно из зеркал скольжения, связанное с обстановкой северо-восточного сжатия, имеет взбросо-надвиговую кинематику, при этом надвигание шло в северо-восточном направлении. Для обоих этапов характерен тип напряженного состояния горизонтального сдвига, при котором реализуются преимущественно латеральные относительные смещения по разрывам (по сдвигам в геологическом смысле слова). Таким образом, они могут быть отнесены и к одной геодинамической обстановке формирования сдвиговой зоны. Для выявления хронологической их разобценности и определения порядка этапов их формирования собранных полевых данных к настоящему моменту недостаточно.

В точке наблюдения № 10510 хорошо проявлена система правых сдвигов субширотного простирания (с крутыми падениями плоскости сместителя на юг). Левые сдвиги имеют субмеридиональное простирание. Системы правых и левых сдвигов вместе с отрывами образуют четкий парагенез, связанный с северо-западным сжатием. Ось максимального растяжения, определенная с использованием программы *STRESSgeol* и имеющая субгоризонтальное юго-западное — северо-восточное положение, ориентирована по нормали к плоскостям отрывов и одной из жил (рис. 3).

В точке наблюдения № 10517 наблюдается многообразие зеркал скольжения разного кинематического типа с преимущественно южными падениями плоскости сместителя. Эти нарушения можно рассматривать как систему расплющивания (содвижения) при северо-северо-восточном направлении максимального сжатия (рис. 4). Однако ряд зеркал скольжения из этого максимума относятся к другому парагенезу, связанному с восточно — северо-восточным сжатием и субмеридиональным растяжением, который выделяется в выборке при расчетах по программе *STRESSgeol*. Зафиксированные нами зеркала скольжения Каменногорского участка

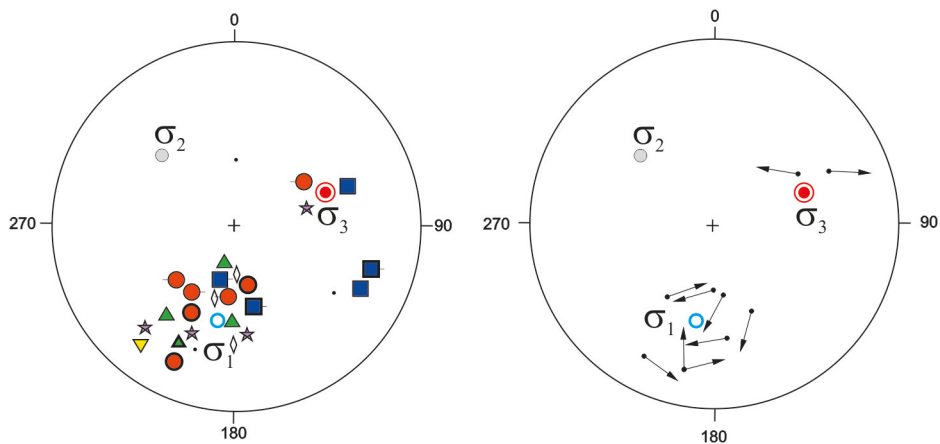


Рис. 4. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса к плоскостям тектонических трещин и разрывных нарушений разного кинематического типа, а также положение осей главных напряжений в точке наблюдения № 10517. Условные обозначения на рис. 2

имеют только механическую штриховку или небольшие кварцевые примазки на ступенях и бороздах скольжения.

3.3. Вуоксинский участок

Северо-восточный участок изученной территории расположен в долине р. Вуоксы, а также в районе пос. Красный Сокол и пещер Иностранцева. Изучение скальных деформаций в районе пещер Иностранцева подробно рассматривается в работе А. А. Никонова с соавторами (2014).

В точке наблюдения № 10504, вблизи дороги Каменногорск — Красный Сокол, зафиксированы левые сдвиги субширотного (ЗСЗ) простирания и правые сдвиги субмеридионального простирания (рис. 5), связываемые нами с парагенезом максимального сжатия восточного — северо-восточного направления. По результатам расчетов методом катакластического анализа ось максимального сжатия также имеет восточное — северо-восточное направление (погружается по Аз 242 \angle 18°). На диаграмме трещиноватости выделяется основной плотностной максимум ЮВ 155 \angle 80°, который предположительно может быть связан с отрывными трещинами. При этом расположение этих трещин не противоречит рассчитанной нами оси девиаторного растяжения (σ_1). Другие плотностные максимумы тектонической трещиноватости тяготеют к сколовым трещинам лево- и правосдвиговой кинематики.

На скальном уступе в точке наблюдения № 10507 плоскости левосдвиговых смещений имеют северные и северо-восточные азимуты падения (рис. 6). Отрывные нарушения имеют субширотные простирания. По данным анализа тектонической трещиноватости отчетливо выделяется плотностной максимум системы широтных трещин преимущественно с крутым падением в северных румбах. Возможно, этот максимум также связан с отрывным характером трещин. Кроме того, в долине р. Вуоксы в нескольких точках удалось зафиксировать субширотные левосдвиговые зеркала скольжения, а также системы субвертикальных трещин, про-

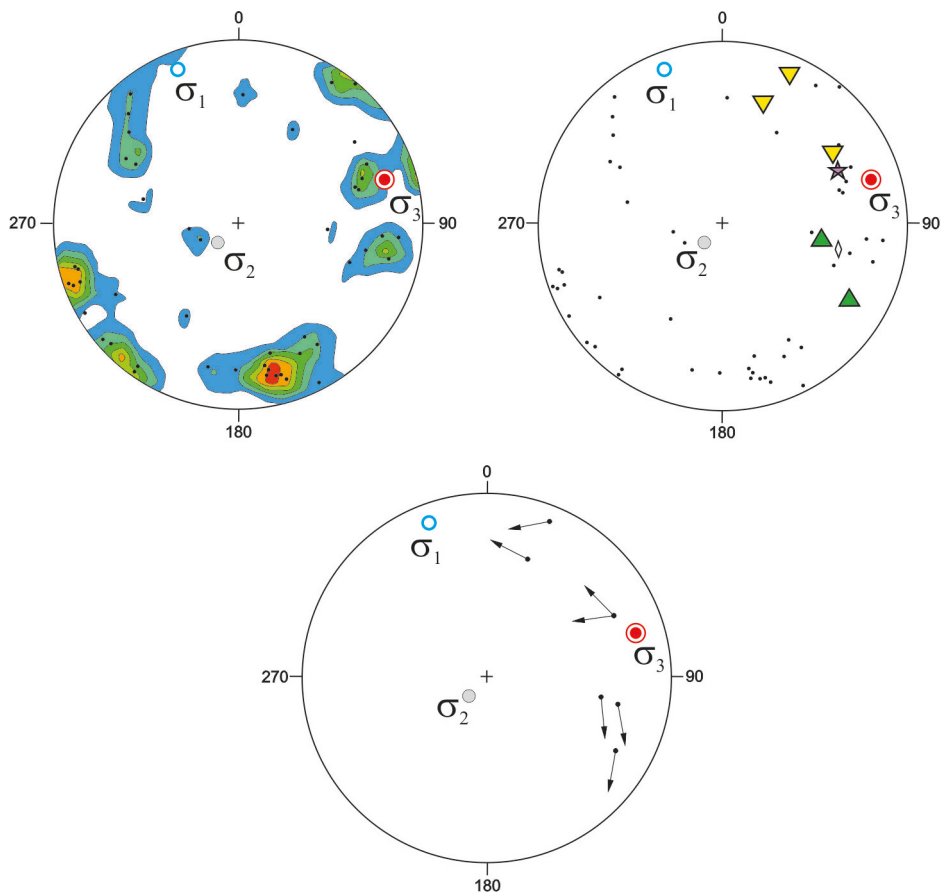


Рис. 5. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие: полюса к плоскостям тектонических трещин с их плотностным распределением (слева), полюса к плоскостям разрывных нарушений разных кинематических типов и положение осей главных напряжений в точке наблюдения № 10504. Условные обозначения на рис. 2

явленных по азимуту простираения СВ 30° и СЗ 310°. Простираение этих систем трещин совпадает с простираением наиболее выраженных линейментов, выделяемых по космическим снимкам в исследованном районе. По соотношению выделенных структурных парагенезов с элементами рельефа и сейсмодислокациями можно предположить, что полученные данные по тектоническим напряжениям можно сопоставлять с современным напряженным состоянием.

3.4. Результаты реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород

Всего с использованием программы *STRESSgeol* по собранным данным удалось произвести расчет для семи локальных стресс-состояний в районе Каменногорска (см. таблицу, рис. 7 и 8). Полученные ориентировки осей главных напряжений характеризуются значительным разнообразием. Условно преобладающим можно

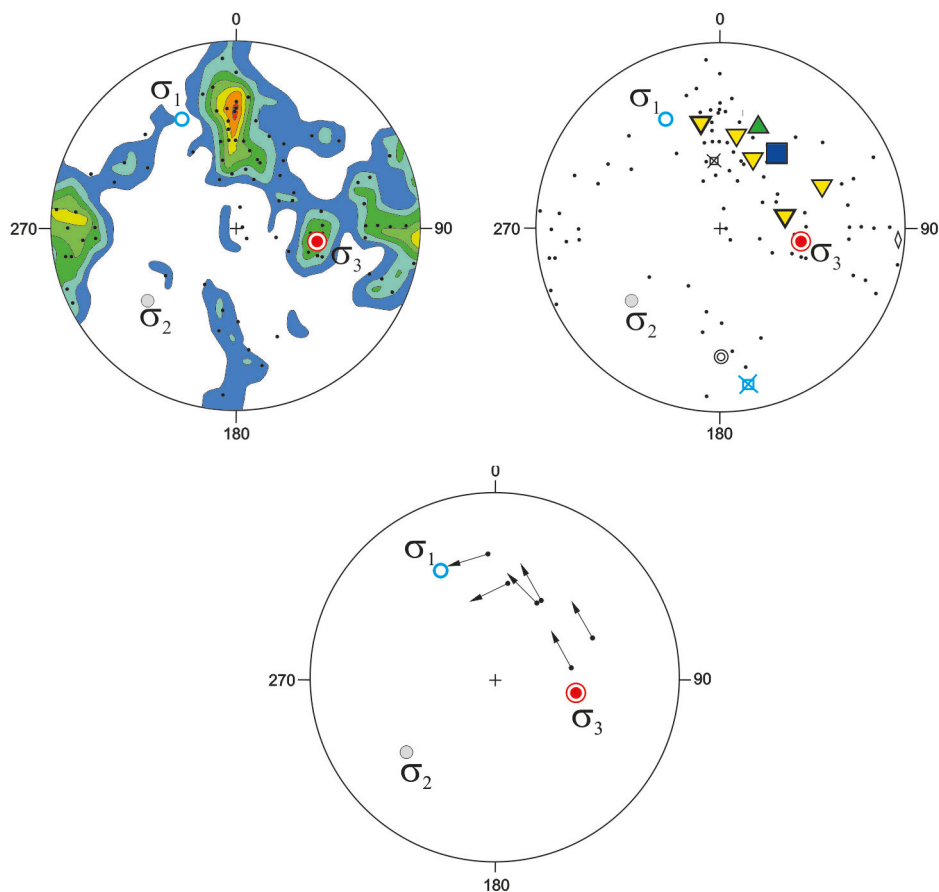


Рис. 6. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие: полюса к плоскостям тектонических трещин с их плотным распределением (слева), полюса к плоскостям разрывных нарушений разных кинематических типов и положение осей главных напряжений в точке наблюдения № 10507. Условные обозначения на рис. 2

назвать запад — северо-западное направление максимального сжатия (до широтного, всего 3 определения). Далее можно выделить восточно — северо-восточные (2 определения) и северо — северо-восточные (2 определения) ориентировки осей максимального сжатия (рис. 7 и 8).

Промежуточные оси имеют в основном субвертикальное положение с погружением в северо-восточных и юго-западных румбах (рис. 7 и 8). Среди осей максимального девиаторного растяжения преобладает субгоризонтальное север — северо-восточное погружение. В двух точках наблюдения оси растяжения погружаются в юго — юго-восточном направлении (рис. 7 и 8). По типу напряженного состояния, определяемого по положению осей главных напряжений относительно горизонта, для рассматриваемого района преобладают обстановки горизонтального сдвига, для которых характерны субгоризонтальное положение осей максимального сжатия и растяжения. Встречаются обстановки горизонтального растяжения и горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом. Доминирование

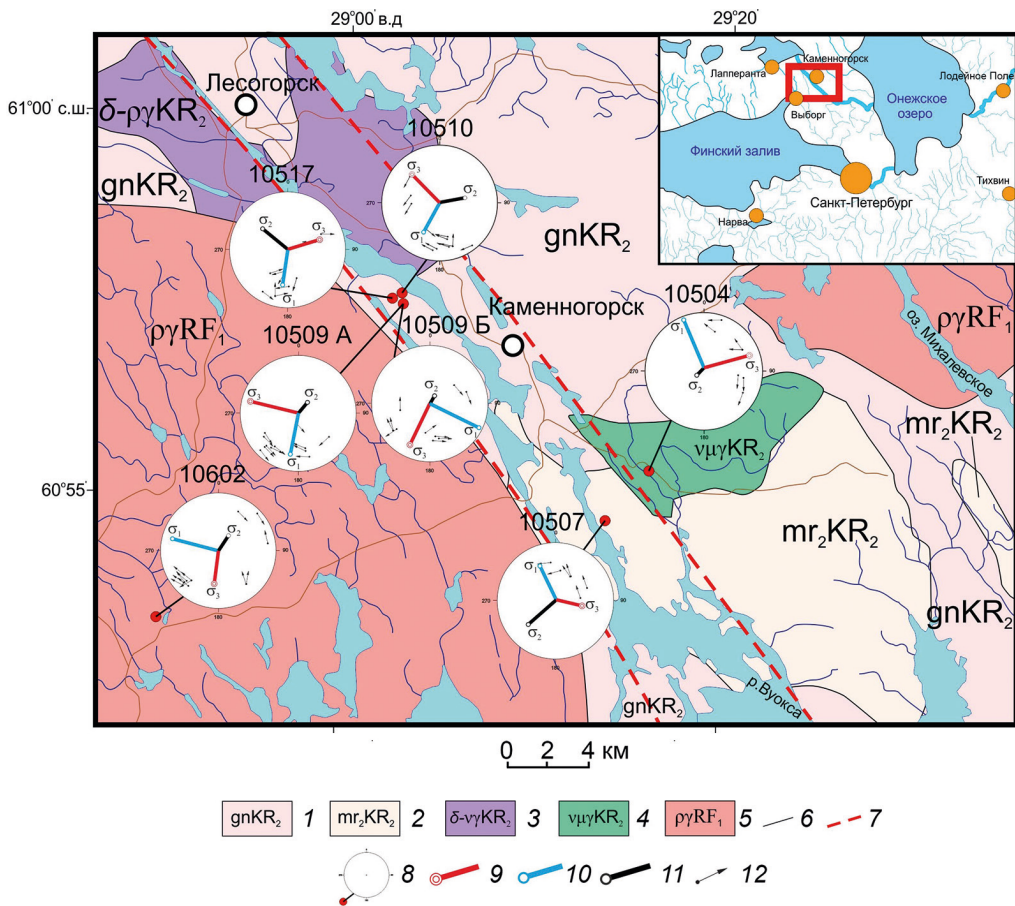


Рис. 7. Схема с ориентировками осей главных напряжений в районе Вуоксинской разломной зоны:

1 — метаморфические комплексы нижнего протерозоя; 2 — плутоно-метаморфические комплексы нижнего протерозоя (мигматит-граниты); 3 — интрузивные породы нижнего протерозоя (габбро, монцогаббро, диориты, монцониты, сиениты, граниты); 4 — интрузивные породы нижнего протерозоя (габбро, габбродиориты, реже граниты); 5 — интрузивные породы нижнего рифея (граниты-рапакиви); 6 — геологические границы; 7 — зона Вуоксинской разломной зоны; 8 — точки наблюдения (красный круг) и диаграммы положения главных осей напряжения (стереографическая проекция верхней полусферы); 9 — ось максимального сжатия; 10 — ось максимального растяжения; 11 — промежуточная ось; 12 — полюс к плоскости зеркала скольжения, стрелкой показано направление смещения висячего блока.

Для создания схемы использованы данные геологической карты масштаба 1:500 000 Р-36-В (atlaspacket.vsegei.ru, n. d.) с изменениями

субгоризонтальных осей максимального сжатия и растяжения говорит о том, что региональное поле напряжений Вуоксинской зоны близко к типу напряженного состояния горизонтального сдвига, что характерно для региональных полей напряжений на Карельском и Ковдорском полигонах Балтийского щита (Сим, 2000; Сим и др., 2011). Коэффициент Лоде — Надаи для всех сделанных локальных определений близок к нулю, что определяет деформирование в условиях чистого или простого сдвига.

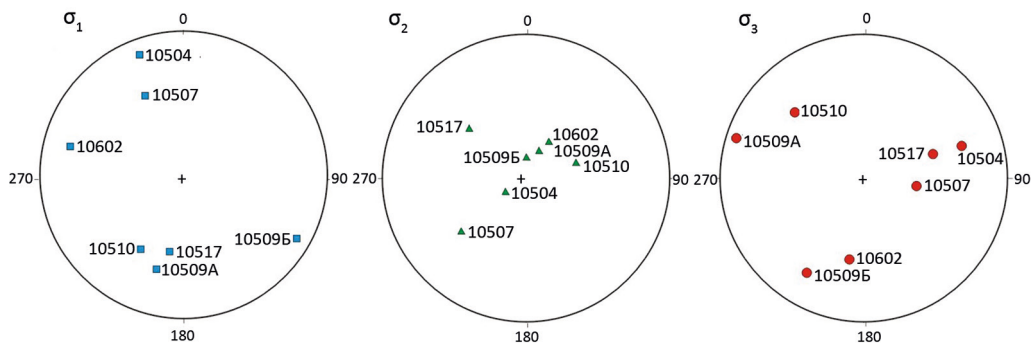


Рис. 8. Ориентировка осей главных напряжений локальных стресс-тензоров в районе Вуоксинской разломной зоны. На круговых диаграммах (стереографическая проекция верхней полусферы) показаны выходы осей главных напряжений: минимальных (σ_1) (девиаторное растяжение), промежуточных (σ_2) и (σ_3) максимальных сжимающих напряжений



Рис. 9. Тектоническая трещиноватость (без видимой кинематики смещений) в карьере строительных материалов северо-западнее Каменногорска

По массовым замерам тектонической трещиноватости (рис. 9) в районе исследования проведено определение падения плоскости сместителя Вуоксинского разлома по методике В. Н. Даниловича (Данилович, 1961). Согласно этой методике на круговой диаграмме полюсов трещиноватости, измеренных в горных породах в зоне разлома, выделяется пояс — дуга большого круга, объединяющая крупные максимумы трещиноватости. Точка полюса пояса трещиноватости соединяется дугой большого круга с двумя точками (А и Б) простирания разлома, нанесенного на

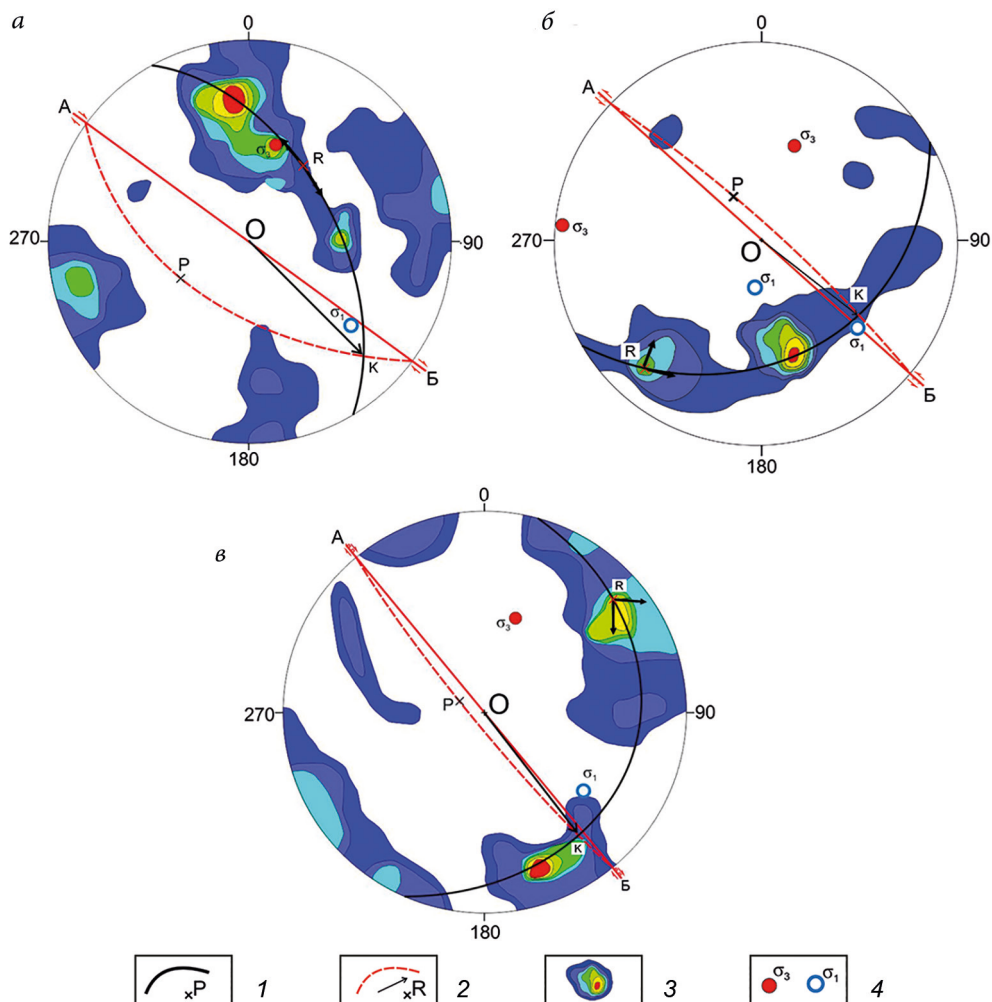


Рис. 10. Пояса трещиноватости в районе Вуоксинской разломной зоны:

а — точки наблюдения № 10501, 10502 и 10507; б — № 10509, 10510 и 10517; в — № 10504 и 10518.

На круговых диаграммах (стереографическая проекция верхней полусферы) показаны: 1 — пояс тектонических трещин и его полюс Р; 2 — плоскость разлома, полюс к плоскости разлома R и линия главного перемещения по нему; 3 — изолинии плотности трещин (синими тонами показана наименьшая плотность, красными — наибольшая); 4 — оси главных нормальных напряжений одного из вариантов регионального поля напряжений: минимальных (σ_1) (девиаторное растяжение) и максимальных (σ_3) сжимающих напряжений

внешний круг стереограммы. Эта дуга АКБ является плоскостью разлома, а точка пересечения плоскости разлома и пояса трещиноватости (точка К) является точкой выхода линии перемещения (КО) по разлому. На рис. 10 показаны восстановленные варианты положения плоскости сместителя разлома по замерам тектонической трещиноватости в разных точках наблюдения.

На первой стереограмме слева (рис. 10, точки наблюдения № 10501, 10502 и 10507) плоскость сместителя падает на северо-восток (Аз Пд $38 \angle 50$), в двух дру-

гих группах точек плоскость разлома имеет северо-западное простирание и крутое падение в противоположные стороны для каждой из группы точек. Общим для всего разлома является пологое положение линии перемещения на плоскости разлома, свидетельствующее о преобладании сдвиговой компоненты.

На всех круговых диаграммах нанесена наиболее вероятная ось максимального сжатия регионального поля напряжений с использованием принципа отсутствия в этой части стереограммы осей растяжения локального уровня (см. рис. 8). При таком положении оси максимального сжатия по плоскостям разлома с падением на северо-восток в точках наблюдения № 10501, 10502 и 10507 определяется правый сдвиг с незначительной взбросовой компонентой перемещений. Вектор перемещения, нанесенный в точку полюса разлома, находится в створе острого угла между двумя дугами больших кругов, соединяющих точку полюса разлома с осями сжатия и растяжения. В группе точек наблюдения № 10509, 10510 и 10517 (рис. 10, б) по определенной по поясу трещиноватости плоскости разлома с крутым падением на юго-запад относительное смещение определяется уже как левосдвиговое.

4. Заключение

Полученная изменчивость направлений максимального сжатия соотносится с зоной «неустойчивых тектонических напряжений», выделенной ранее для Восточно-Европейской платформы. В зоне Вуоксинского разлома всего семь определений локальных стресс-состояний, которые не дают возможности однозначного определения регионального поля напряжений. Допускается, что это обусловлено вхождением данного участка Балтийского щита в зону с двойными (неустойчивыми) ориентациями осей сжатия. В этой зоне, расположенной вдоль побережья Финского залива (Сим, 2000), разломы близкого простирания могут быть как правыми, так и левыми сдвигами. Ориентация оси максимального сжатия в этой области может меняться от меридиональной до субширотной, что предположительно вызвано поочередной активизацией меридионального Ботнического и широтного Финского заливов (Сим, 2000). Двойные неустойчивые ориентировки осей сжатия в этом районе подтверждаются известными механизмами очагов землетрясений региона: в Осмуссаарском событии восстановлена широтная ось сжатия, а в Калининградских — меридиональная.

Полученные данные по кинематике малых структурных форм и реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород региона свидетельствуют о геодинамической обстановке горизонтального сдвига и преобладании латеральных перемещений по разрывным нарушениям. Это является существенным отличием типа напряженного состояния данной платформенной области от горноскладчатых систем Большого Кавказа и Тянь-Шаня, где среди типов напряженного состояния наравне с горизонтальным сдвигом доминирует тип напряженного состояния горизонтального сжатия (Маринин и Тверитинова, 2016; Ребецкий и др., 2016). Системы сдвиговых нарушений, фиксируемых вблизи Вуоксинской разломной зоны, говорят о близости их ориентировки с простиранием собственно этой зоны и преобладании правосдвиговой кинематики.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. А. Никонову как инициатору и руководителю проведенных полевых исследований в окрестностях пещеры Иностранцева, а также нашим коллегам С. В. Швареву, М. В. Родкину и Г. С. Бискэ.

Литература

- Балтыбаев, Ш. К., Глебовицкий, В. А., Козырева, И. В., Конопелько, Д. Л., Левченков, О. А., Седова, И. С., Шульдинер, В. И. (2000). *Геология и петрология Свеклофеннид Приладожья*. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та.
- Кофман, В. С., Селиванова, В. А. (ред.) (1971). *Геология СССР. Том 1. Геологическое описание. Ленинградская, Псковская и Новгородская области*. Москва: Недра.
- Данилович, В. Н. (1961). *Метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями*. Иркутск: Изд-во ИПИ.
- Маринин, А. В., Тверитинова, Т. Ю. (2016). Строение Туапсинской сдвиговой зоны по тектонофизическим данным. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, (1), 41–55. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-1-41-55>
- Никонов, А. А., Шварев, С. В., Сим, Л. А., Родкин, М. В., Бискэ, Г. С., Маринин, А. В. (2014). Скальные палеосейсмодетформации на Карельском перешейке (ключевой участок «пещеры Иностранцева», Ленинградская область). *Доклады РАН*, 457 (5), 591–596. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080145>
- Расцветаев, Л. М. (1987). Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. *Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2*. Москва: Изд-во ГИН АН СССР.
- Ребецкий, Ю. Л. (2007). *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. Москва: Наука.
- Ребецкий, Ю. Л., Сычева, Н. А., Сычев, В. А., Кузиков, С. И., Маринин, А. В. (2016). Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ. *Геология и геофизика*, (3), 496–520. <https://doi.org/10.15372/GiG20160303>
- Ребецкий, Ю. Л., Сим, Л. А., Маринин, А. В. (2017). *От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы*. Москва: ГЕОС.
- Светов, А. П., Свириденко, Л. П. (1991). *Магматизм шовных зон Балтийского щита*. Ленинград: Наука.
- Сим, Л. А. (2000). Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы. В: *М. В. Гзовский и развитие тектонофизики*. Москва: Наука.
- Сим, Л. А., Жиров, Д. В., Маринин, А. В. (2011). Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита. *Геодинамика и тектонофизика*, 2 (3), 219–243. <https://doi.org/10.5800/GT2011230044>
- Хазов, Р. А., Шаров, Н. В., Исанина, Э. В. (2004). Глубинное строение и металлогения Приладожья. *Геология и полезные ископаемые Карелии*, 7, 55–74.
- atlaspacket.vsegei.ru. (n. d.). *Актуализированные ГИС-пакеты оперативной геологической информации*. [online] Доступно на: <http://atlaspacket.vsegei.ru/9d6baddea096866e0> [Дата доступа 19.04.2021].
- Shvarev, S. V., Nikonov, A. A., Rodkin, M. V. and Poleshchuk, A. V. (2018). The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and softsediment deformation features. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 90, 257–273. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.009>

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.
Статья рекомендована в печать 26 февраля 2021 г.

Контактная информация:

Маринин Антон Витальевич — marinin@ifz.ru
Сим Лидия Андреевна — sim@ifz.ru
Бондарь Иван Владимирович — bond@ifz.ru

Variation of the stress-and-strain state of the Vuoksi Fault Zone area (Vyborg district)*

A. V. Marinin, L. A. Sim, I. V. Bondar

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
10, ul. B. Gruzinskaya, Moscow, 123995, Russian Federation

For citation: Marinin, A. V., Sim, L. A., Bondar, I. V. (2021). Variation of the stress-and-strain state of the Vuoksi Fault Zone area (Vyborg district). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (2), 396–412. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.211> (In Russian)

The stress-and-strain state of the rock massif and the kinematic type of faults of the Vuoksi fault zone (Karelian Isthmus) for the latest stage of tectonic history were determined by field tectonophysical methods. The main information was obtained from geological stress/strain indicators, which were mostly represented by measurements of minor faults and slickensides with kinematic information (the direction of relative displacement) on the fault plane. Near the Vuoksi fault zone, systems of faults with an orientation close to the strike of this regional fault structure are observed. Most widespread are strike-slip faults, whereas faults with normal or reverse displacement make up less than a quarter of the total number of faults. The *STRESS-geol* software based on the method of cataclastic analysis was used to restore stress-and-strain state. The variable orientation of the principal stress axes was determined in the studied area. The two main directions of maximum compression are NE-SW (to ENE-WSW) and NW-SE (to WNW-ESE). The axes of the maximum deviatoric extension are subhorizontal and are directed in the NNE-SSW and NW (to WNW-ESE) direction. The intermediate axis often occupies a sub-vertical position. The horizontal shear stress state type prevails for the entire zone, and lateral shear displacements are also characteristic of this fault zone. This stress state type of the studied part of the Baltic Shield is significantly different from the stress state type of orogenic belts, where, along with horizontal shear stress state type, the situation of horizontal compression stress state type dominates. The obtained variability of the directions of maximum compression in the studied area can be preliminarily correlated with the previously identified zone of “unstable tectonic stresses” of the East European Platform.

Keywords: Baltic Shield, Vuoksi fault zone, Inostrantsev Caves, tectonic stress, stress regime, tectonic pattern, slickenside, fault, tension gash, joint set.

References

- atlaspacket.vsegei.ru. (n. d.). *Updated GIS packages of operational geological information*. [online] Available at: <http://atlaspacket.vsegei.ru/9d6baddea096866e0> [Accessed 19 Apr. 2021].
- Baltybaev, Sh. K., Glebovitskii, V. A., Kozyreva, I. V., Konopel'ko, D. L., Levchenkov, O. A., Sedova, I. S. and Shul'diner, V. I. (2000). *Geology and Petrology of the lake Ladoga area Svecofennian*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press. (In Russian)
- Kofman, V. S. and Selivanova, V. A. (eds) (1971). *Geology of the USSR. Volume 1. Geological description. Leningrad, Pskov and Novgorod regions*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Danilovich, V. N. (1961). *Belt method for studying fractures associated with discontinuous displacements*. Irkutsk: IPI Publ. (In Russian)
- Marinin, A. V. and Tveritinova, T. Y. (2016). The structure of the Tuapse shear zone according to the field tectonophysical data. *Moscow University Geology Bulletin*, 71 (2), 151–166. (In Russian)
- Nikonov, A. A., Shvarev, S. V., Sim, L. A., Rodkin, M. V., Biske, Yu. S. and Marinin, A. V. (2014). Paleoseismic deformations of hard rocks in the Karelian isthmus. *Doklady Earth Sciences*, 457 (2), 1008–1013. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080145> (In Russian)

* The research was carried out with the financial support of the state task IPE RAS.

- Rastsvetaev, L. M. (1987). *Paragenetic method for structural analysis of disjunctive tectonic dislocation. Problems of Structural Geology and Physics of tectonic processes. Part 2.* Moscow: GIN AN SSSR Publ. (In Russian)
- Rebetsky, Y. L. (2007). *Tectonic stresses and strength of rock massif.* Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Rebetsky, Y. L., Sycheva, N. A., Sychev, V. N., Kuzikov, S. I. and Marinin, A. V. (2016). The stress state of the northern Tien Shan crust based on the KNET seismic network data. *Russian. Geology and Geophysics*, 57 (3), 387–408. <https://doi.org/10.15372/GiG20160303> (In Russian)
- Rebetsky, Y. L., Sim, L. A. and Marinin, A. V. (2017). *From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms.* Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Svetov, A. P. and Sviridenko, L. P. (1991). *Magmatism of the seam zones of the Baltic shield.* Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Shvarev, S. V., Nikonov, A. A., Rodkin, M. V. and Poleshchuk, A. V. (2018). The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and soft-sediment deformation features. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 90, 257–273. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.009>
- Sim, L. A. (2000). Influence of global tectogenesis on the latest stress state of Europe's platforms. In: *M. V. Gzovskii i razvitie tektonofiziki.* Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Sim, L. A., Zhiron, D. V. and Marinin, A. V. (2011). Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2 (3), 219–243. <https://doi.org/10.5800/GT2011230044> (In Russian)
- Khazov, R. A., Sharov, N. V. and Isanina, E. V. (2004). Deep structure and metallogeny of the Ladoga region. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii*, 7, 55–74. (In Russian)

Received: February 11, 2020

Accepted: February 26, 2021

Contact information:

Anton V. Marinin — marinin@ifz.ru

Lidiya A. Sim — sim@ifz.ru

Ivan V. Bondar — bond@ifz.ru