

УДК 551.242.1

## НОВЕЙШЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЮЖНОГО БОРТА КАНДАЛАКШСКОГО ГРАБЕНА

© 2022 г. И. В. Бондарь<sup>а</sup>, \*, Н. А. Гордеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

\*e-mail: bond@ifz.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 31.07.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

В ходе полевых работ 2019–2021 гг. на южном побережье Кандалакшского залива Белого моря авторами статьи был набран представительный материал для тектонофизических исследований – замеры пространственной ориентировки геологических стресс-индикаторов: зеркал скольжения, отрывов, жил и трещиноватости. Для анализа собранного материала был применен комплекс тектонофизических методов, а именно метод катакластического анализа разрывных смещений, структурно-парагенетический и структурно-геоморфологический методы и программа SimSGM, а также анализ трещиноватости. Получены данные о напряженном состоянии по всему Кузокоцкому архипелагу и прилегающим территориям пролива Великая Салма. Методом катакластического анализа получено 10 локальных стресс-состояний, структурно-парагенетическим методом – 11, и структурно-геоморфологическим методом – 10. На территории полуострова Киндо, о. Великий и Кузокоцкого архипелага реконструированы разновозрастные локальные стресс-состояния, которые были привязаны к тектонической истории Кандалакшского грабена. Выявлены вариации напряженно-деформированных состояний для различных участков, предложена гипотетическая модель поэтапной эволюции от северо-западного сжатия к северо-восточному на протяжении новейшего тектонического этапа. Локальные стресс-состояния подтверждают наличие условий трансенсии в приосевой части рифтогенных структур пролива Великой Салмы. Выявление источников напряжения позволило актуализировать историю развития Кандалакшского грабена. По расширенной базе данных о трещиноватости и других геологических стресс-индикаторов возможно будет выйти на региональные геодинамические режимы, что в свою очередь актуально при прогнозировании землетрясений.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, зеркала скольжения, трещиноватость, неотектоника, локальное стресс-состояние, геологические стресс-индикаторы, источники напряжения, Кандалакшский залив, пролив Великая Салма

DOI: 10.31857/S2587556622060036

### ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Белое море, и в частности южный берег Кандалакшского залива, уже на протяжении длительного времени привлекает внимание ученых самых разных направлений: геологов, геоморфологов, геофизиков, географов, биологов и других. Такой интерес объясняется, вероятно, уникальностью этой крупной региональной тектонической структуры, что подтверждается наличием учебных баз на побережье Белого моря для проведения студенческих практик, в том числе с привлечением иностранных студентов.

Несмотря на большое количество работ по данному району, в этой статье впервые проведен анализ детальных полевых тектонофизических материалов, которые были собраны непосредственно авторами статьи в ходе полевых исследований. Тем не менее, стоит кратко оха-

актеризовать ряд работ, близких по тематике. Помимо крупных исследований о тектонике и геодинамике Беломорского региона (Балуев и др., 2012; Евзеров и др., 2014; Колодяжный и др., 2019; Колька и др., 2019; Морозов и др., 2019; Николаева и др., 2019), в первую очередь стоит упомянуть работу (Sim et al., 2011), в которой дистанционными тектонофизическими методами произведены реконструкции палеонапряжений почти на весь Балтийский щит, и в частности на Кандалакшский залив. Из детальных работ, затрагивающих территорию исследования, следует отметить работу С.Б. Николаевой (2019), в которой рассматриваются палеосейсмодислокации в районе Ковды, и, в частности, анализируется трещиноватость. В исследовании И.Г. Авенариус (2008) были проведены подробные морфоструктурные работы и охарактеризованы практически все ключевые участки побережья Белого моря, обнаружено

большое количество сейсмодислокаций и голоценовых сейсморов. А.В. Баранской с соавторами (2015) южный берег Канадалкшского залива был поделен на блоки, и в пределах каждого блока реконструировано положение оси максимального сжатия. Сотрудниками кафедры динамической геологии Геологического факультета МГУ (Косевич, Романовская, 2014) был проведен подробный линеаментный анализ дистанционными и полевыми методами на некоторые участки побережья. Коллективом авторов во главе с Е.С. Горбатовым (2017) проведены детальные палеосейсмологические исследования полуострова Киндо, в результате которых определено возможное положение эпицентра палеоземлетрясения, а также направление максимального сейсмического воздействия.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Район исследования расположен на севере Карибии, на южном побережье Белого моря. В геологическом строении изучаемого района принимают участие архейские и протерозойские образования, почти повсеместно перекрытые чехлом четвертичных образований (Астафьев и др., 2012). Наиболее широко развит хаутоварский надгоризонт среднего лопия верхнего архея (рис. 1). Он представлен двумя комплексами: 1) мигматит-плагиогранитный комплекс развит практически повсеместно и сложен мигматитами, гнейсоплагиогранитами, гнейсотоналитами и гранодиоритами; 2) беломорский метаморфический комплекс развит в центральной и западной части исследуемого района и состоит из лоухского и хетоламбинского подкомплексов, протягивающихся широкой полосой параллельно Канадалкшскому заливу с юго-востока на северо-запад. Лоухский подкомплекс представлен биотитовыми и гранат-биотитовыми гнейсами, а хетоламбинский — биотит-амфиболовыми и амфиболовыми гнейсами.

В основном все крупные тектонические нарушения имеют северо-западное и субширотное простирание, из которых первое является доминирующим, формируя продольные блоки, параллельные побережью, а второе — диагональную делимость этих продольных зон. Тектонические нарушения этих же генеральных направлений, играют ведущую структурно-формирующую роль и на более детальном уровне (см. рис. 1б), где фиксируются разрывные нарушения, отделяющие архипелаг от материковой части к югу и от Кузокоцкого полуострова к востоку (Балуев и др., 2012).

Новейшие структуры в большей степени унаследованы. Впадина Канадалкшского залива Белого моря, являющаяся зоной современного грабенообразования, пространственно подразделяется на унаследованную юго-восточную часть (Кандалакшский грабен), где активизированы

древние рифейские структуры позднепротерозойского палеорифта, и новообразованную в поздне-последледниковый период северо-западную (Колвицкий грабен). Грабены разделены межвпадинной перемышкой, где происходит перенос напряжений растяжения с ЮЗ борта в южной части рифтовой зоны на СВ в северной (Балуев и др., 2012) и расположенной в непосредственной близости (5–10 км к западу) от Кузокоцкого архипелага.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

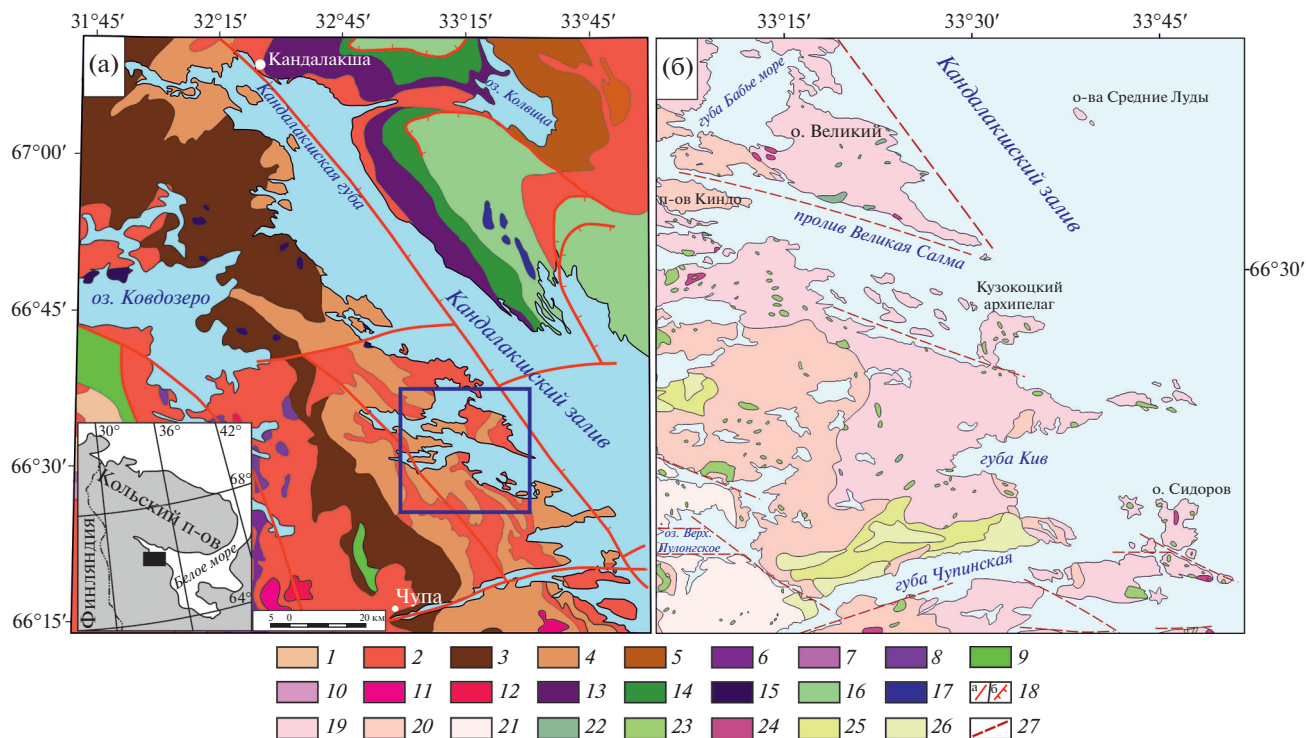
Исходными данными для исследования являются замеры пространственной ориентировки геологических индикаторов деформаций, полученные с помощью геологического компаса непосредственно при полевом изучении различных обнажений. Пространственная ориентировка геологических индикаторов деформаций описывается элементами залегания (азимут падения и угол падения), по которым однозначно определяются их положение в пространстве.

В 2019 и 2021 гг. авторы принимали участие в совместной экспедиции сотрудников ИФЗ РАН, ГИН РАН, ИГ РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова на южный берег Белого моря. Изучены полуостров Киндо, о. Великий и острова Кузокоцкого архипелага.

Изучение тектонических напряжений проводилось с помощью метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого (2017). Для расчета использовалась программа STRESSgeol. Исходными данными для расчета являются полевые замеры пространственной ориентировки зеркал скольжения. Метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений и форма эллипсоида деформаций.

Структурно-парагенетический метод применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением 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 о разных этапах деформирования.

Исследование распределения плотностей трещиноватости производилось в программе Stereonet. В качестве входных данных использовались ориентировки полюсов плоскостей трещиноватости — азимут и угол падения. Выходными данными являются азимуты простираний и углы падения плотности полюсов трещин и розы диаграммы по полюсам трещин. Эти данные позволяют проводить качественный анализ распределения трещиноватости и выявления трендов ее развития для



**Рис. 1.** Геологическая карта района исследования по материалам государственного геологического картирования масштабов 1 : 1 000 000 (Астафьев и др., 2012) (а), 1 : 200 000 (Государственная ..., 1959) (б). Синим квадратом показан район детальных исследований. 1 – ранний-поздний архей, саамий-лопий; 2–9 – мигматит-плагиогранитный комплекс, 3 – Лоухский подкомплекс, 4 – Хеталамбинский подкомплекс, 5 – Южно-кольский подкомплекс, 6 – Верхнеозерская свита, 7 – Тикшеозерская серия, 8 – Поньгомский plutонический комплекс, 9 – Каликорвинский метаморфический комплекс; 10–12 – поздний архей, поздний лопий: 10 – Визаварская свита, 11 – Кочкомо-лобашский plutонический комплекс, 12 – Позднегимольские plutонические комплексы; 13–15 – ранний протерозой, ранний карелий: 13 – Кандалакшская толща, 14 – Колвицкий габброанортозитовый комплекс, 15 – Куземский лерцолит-габброноритовый комплекс; 16–17 – ранний протерозой, поздний карелий: 16 – Порьегубский метаморфический комплекс, 17 – Райнечоррский вебстерит-клинопироксеновый комплекс малых тел; 18 – разрывы: а – неустановленной кинематики, б – сбросы; 19–21 – поздний архей: 19 – Керетская толща, 20 – Хетоламбинская толща, 21 – интрузии друзитовой серии; 22–24 – интрузивные образования: 22 – пегматитовые жилы; 23 – кварцевые жилы; 24 – постархейские дайки миндалекаменных щелочных порфритов, пикритов; 25–26 – четвертичные отложения: 25 – верхний отдел, морские пески, 26 – современный отдел, торфяники; 27 – предполагаемые разрывы.

установления парагенетических связей с региональными структурами. Все стереограммы, показанные в тексте статьи отображают плотности и розы-диаграммы по полюсам трещин.

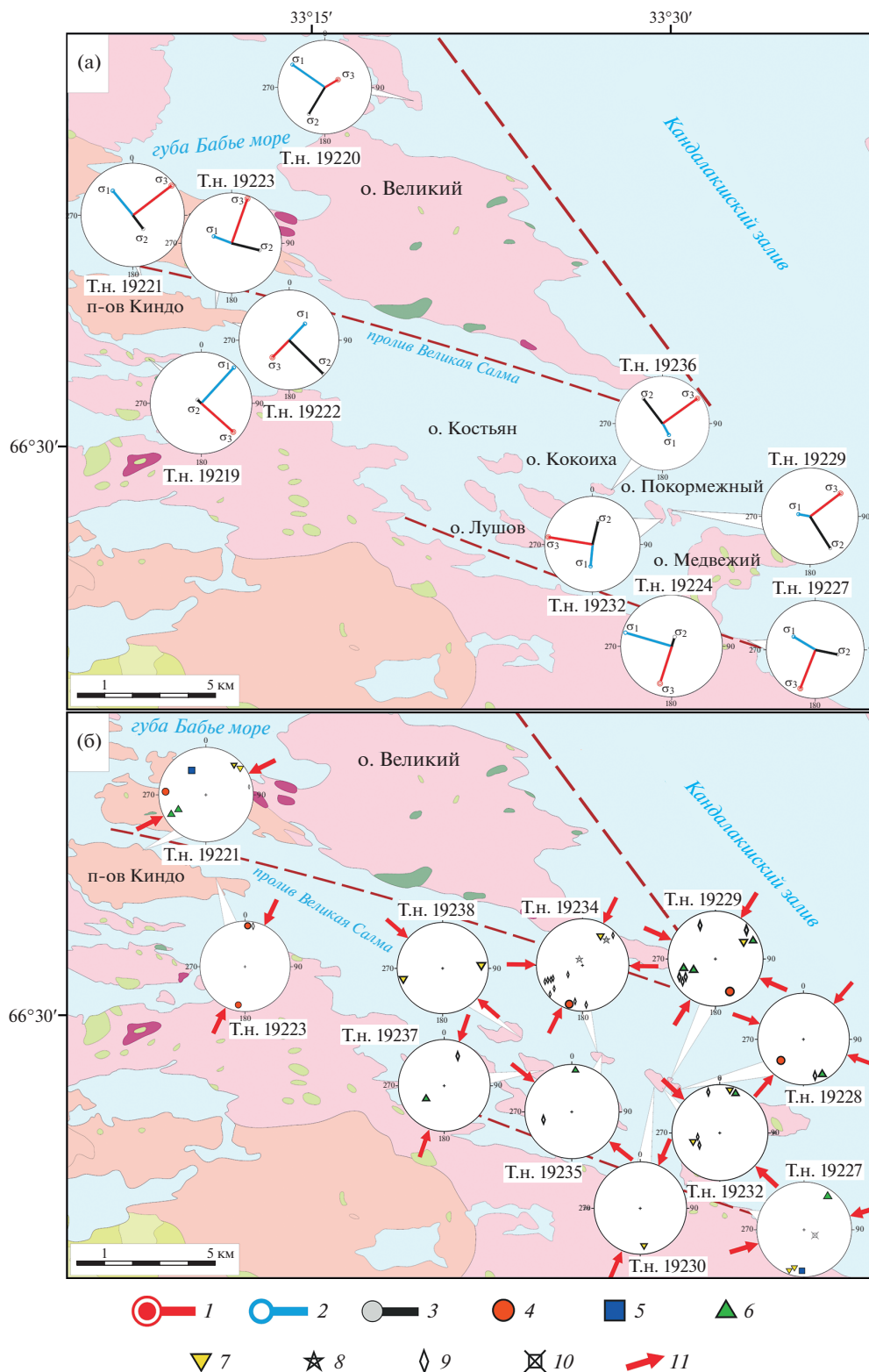
Авторами статьи использован инновационный продукт SimSGM (Гордеев, 2019), позволяющий реконструировать локальные стресс-состояния по космическим снимкам, топографическим картам или картам высот. В SimSGM реализован и усовершенствован метод реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений (структурно-геоморфологический метод) (Сим, 1991, 2000). В методе используются данные о разрывах или линейно-амбипланном анализе, в области которых дешифрируются мелкие прямолинейные элементы рельефа, совокупность расположения которых позволяет установить сдвиговую составляющую по разрывам, направления действующих напряжений и осложняющую обстановку (дополнительного сжатия или дополнительного растяжения).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В каждой точке наблюдения была произведена реконструкция с помощью структурно-парагенетического метода. Если количество измеренных зеркал скольжения в точке наблюдения больше 4, то применялся также метод катакластического анализа.

На полуострове Киндо получены 4 локальных стресс-состояния (рис. 2). Ось максимального сжатия ориентирована в северо-восточном или северо-западном направлении, углы погружения в основном пологие. Ось максимального растяжения погружается на юго-восток или юго-запад, углы погружения, наоборот, крутые.

На северном побережье о. Великий ось максимального сжатия субвертикальна, а ось максимального растяжения полого погружается на юго-восток.



**Рис. 2.** Результаты реконструкции на район полуострова Киндо и Кузокоцкого архипелага методом катакластического анализа разрывных смещений (а) (Ребецкий и др., 2017) и структурно-парагенетическим методом (б) (Расцветаев, 1987). 1–3 – главные оси напряжения: 1 – ось максимального сжатия, 2 – ось максимального растяжения, 3 – промежуточная ось; 4–9 – полюса плоскостей зеркал скольжения: 4 – взбросовой кинематики, 5 – сбросовой кинематики, 6 – праводвиговой кинематики, 7 – леводвиговой кинематики, 8 – неопределенной кинематики с вертикальным смещением, 9 – неопределенной кинематики с горизонтальным смещением, 10 – отрывные структуры; 11 – ориентировка оси максимального сжатия, реконструированная структурно-парагенетическим методом.

В районе островов Кузокоцкого архипелага рассчитано 5 локальных стресс-состояний методом катакластического анализа и 10 локальных стресс-состояний структурно-парагенетическим методом.

В западной части Кузокоцкого архипелага наблюдается три направления оси максимального сжатия. В основном это северо-западное или северо-восточное сжатие, лишь в точке наблюдения (далее т.н.) № 19234 – субширотное. Ось максимального растяжения субвертикальна и реконструирована лишь в двух т.н.

В восточной части Кузокоцкого архипелага реконструировано три положения оси максимального сжатия: северо-западное, северо-восточное и субширотное. Ось максимального растяжения практически везде субвертикальна, за исключением т.н. № 19224 и 19227. В них ось мак-

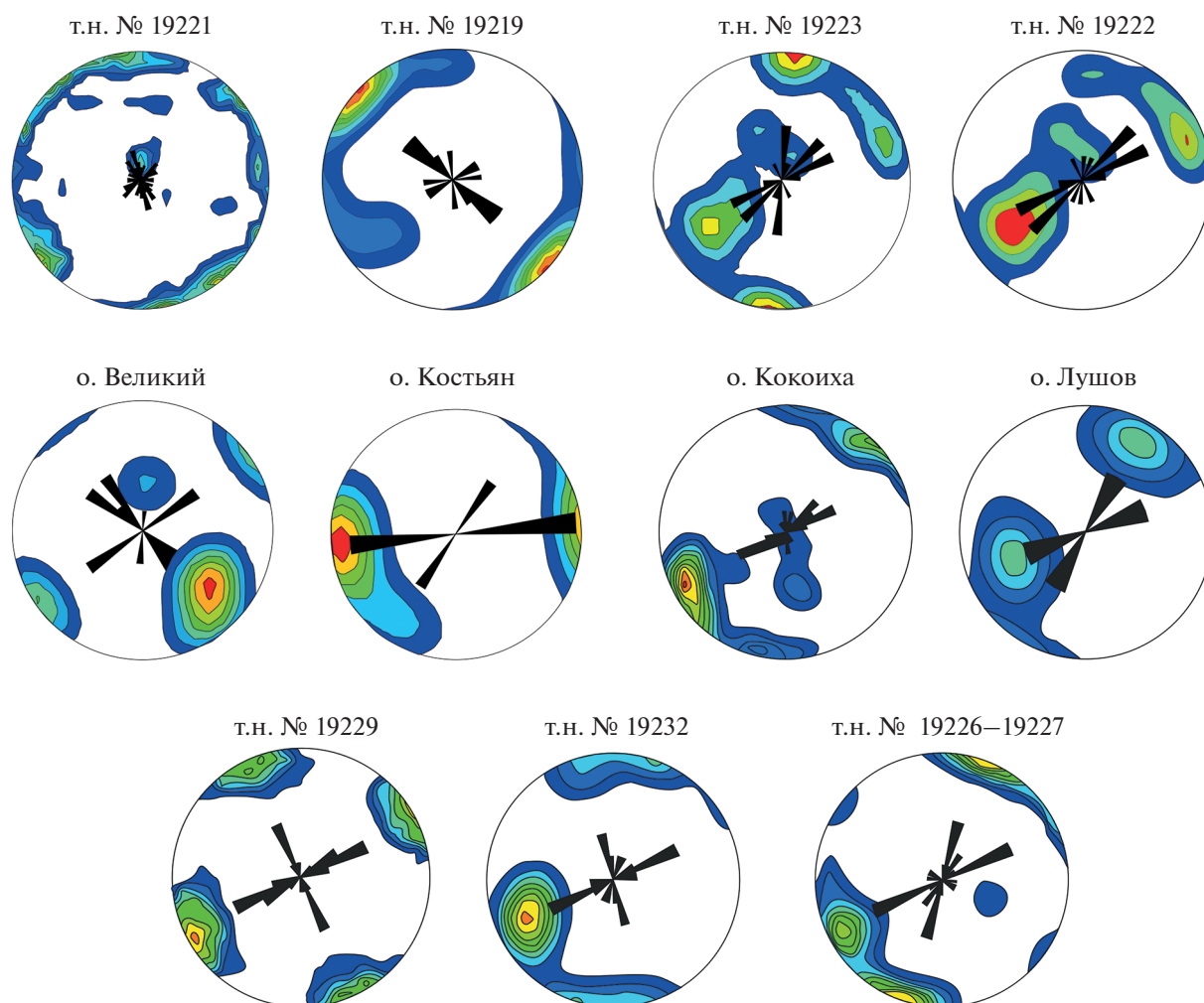
симального растяжения ориентирована в юго-восточном направлении.

На северном побережье о. Великий, плоскости трещин имеют субвертикальное положение, простираются на северо-запад и подавляющим количеством северо-восточного простираения (рис. 3).

На п-ове Киндо и о. Лушов, Коккоиха, Покормежный, Медвежий измерены субвертикальные плоскости трещин отчетливо выделяется север-северо-западный максимум простираения системы трещин под углом  $45^\circ$  и  $80^\circ$ , образующих тупой угол в зенит.

На южном побережье губы Кислая максимум простирающихся трещин ориентирован субвертикально на северо-восток с острым углом в зенит для всей системы.

На о. Костьян развита система трещин субвертикального положения и субмеридионального простираения.



**Рис. 3.** Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие: полюса к плоскостям тектонических трещин с их плотным распределением. Красным цветом – высокая плотность, синим цветом – низкая плотность.

Помимо выделенных направлений, слабое проявление северо-восточной трещиноватости свойственно всему архипелагу.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кандалакшский грабен на новейшем и современном этапе развития представляет собой структуру растяжения, с ориентировкой оси максимального растяжения поперек оси грабена (Sim et al., 2011). Тектоническая впадина современного Кандалакшского залива наследует структуру растяжения, образованную в среднем рифее. Но на протяжении всей своей геологической истории Кандалакшская структура не всегда была зоной растяжения (Колодяжный и др., 2019). Образовавшись в среднем рифее как система растяжения в виде щелевидных грабенов, в позднем рифее появилась правосдвиговая компонента. В конце позднего рифея произошла переориентировка напряжений и до раннего венда структура развивалась как левый сдвиг, возможно, с элементами транспрессии. В раннем венде снова произошла смена напряжений, сменилось и движение по оси структуры на правый сдвиг, при продолжающемся сжатии (транспрессия). С позднего девона до неоплейстоцена происходили правосдвиговые движения с растяжением, а с неоплейстоцена до настоящего времени развитие грабена происходит с преобладанием растягивающих напряжений.

Активность структуры до ледниковых периодов оценить сложно. С другой стороны, не вызывает сомнения, что в период с поздне-постледниковья до сегодняшнего дня структура активно развивается (Балуев и др., 2012; Колька и др., 2019). Отчетливые следы палеоземлетрясений встречены во всех основных частях Беломорского региона – в Кандалакшском, Двинском и Онежском заливах, а также в районе Горла Белого моря (Авенариус, 2008; Горбатов и др., 2017; Никонов, Шварев, 2016<sup>1</sup>). Современная сейсмичность наблюдается, в основном, к западу и юго-западу от Кандалакшского грабена с гипоцентрами землетрясений до 20 км. В пределах самого Кандалакшского грабена зафиксировано три землетрясения на юго-западном борту залива (Морозов и др., 2019).

Точный возраст реконструированных полей напряжения определить затруднительно, можно лишь предполагать, что при такой интенсивности и разнонаправленности движений древние (образованные до новейшего времени) зеркала скольжения имеют очень малый шанс сохраниться. Смена полей напряжения, и, соответственно, изменение направления подвижек в горных поро-

дах могли привести к тому, что большинство зеркал скольжения обновлялись. К тому же практически все точки наблюдения были сделаны в пределах сейсморазрывов, активизированных в новейшее время, о чем говорит отсутствие следов ледниковой обработки на их бортах.

В связи с этим, реконструированные поля напряжения можно считать новейшими и современными, поэтому объяснять их природу мы будем в рамках новейших и современных движений. То, что новейшие тектонические движения в исследуемом регионе очень разнообразны отмечалось и в работе (Авенариус, 2008).

Как уже было сказано, преобладают северо-восточные ориентировки оси максимального сжатия, а также запад-северо-западные и северо-западные.

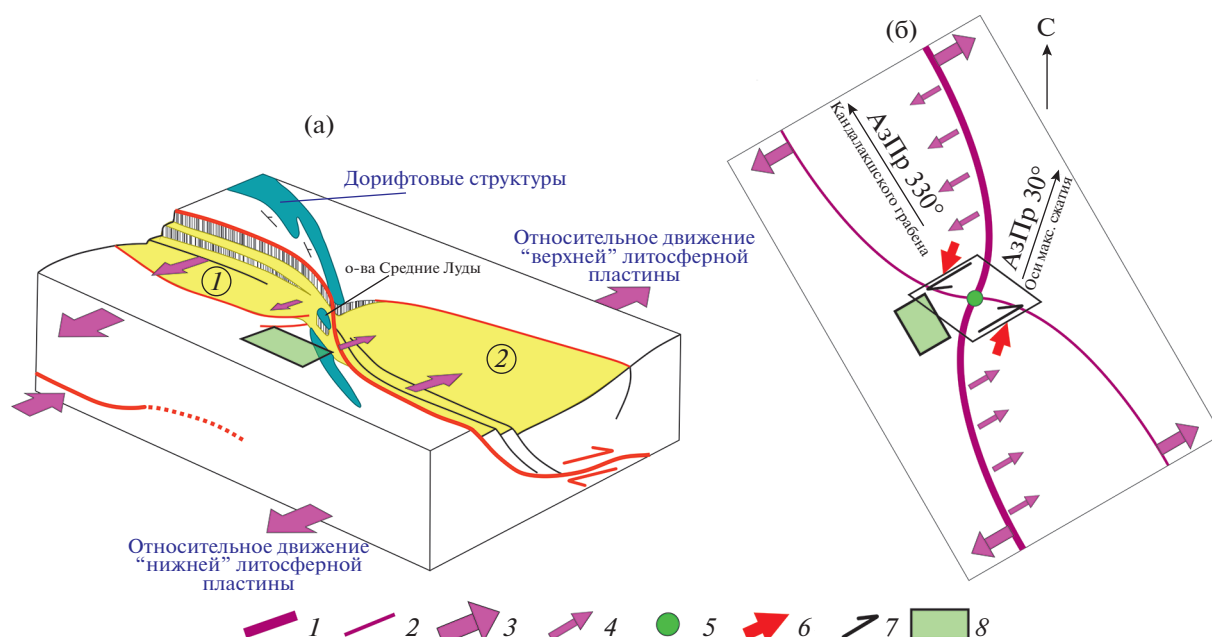
В работе (Балуев и др., 2012) установлено, что островная гряда архипелага Средние Луды (расположен на северо-восток от Кузокоцкого архипелага) является межвпадинной перемычкой, разделяющей два современных грабена на полу-грабены – Кандалакшский и Колвицкий (рис. 4а), и представляет собой зону аккомодации тектонических напряжений. В данной зоне происходит перенос напряжений растяжения с одного отрезка рифтовой зоны на другой. При этом форма главного осевого сброса имеет уже не ровную плоскость, а будет иметь вид пропеллера. Полу-грабены будут соединяться зонами аккомодации со сдвиговой деформацией.

Таким образом, исследуемый район, возможно, находится в зоне влияния сдвиговых деформаций, при этом движения в зоне аккомодации будут происходить по типу простого левого сдвига (рис. 4б). Следовательно, ось максимального сжатия будет иметь простирание около 30° (север-северо-восточное сжатие), при простирании оси Кандалакшского залива 330°. Соответственно, северо-восточное направление оси максимального сжатия в пределах Кузокоцкого архипелага и п-ова Киндо вероятнее всего связано с современным развитием Кандалакшской структуры.

Вторым источником напряжений в исследуемом районе является, очевидно, структура пролива Великая Салма. Пролив представляет собой линейную депрессию. Максимальные глубины по оси пролива постепенно увеличиваются от 40 м у начала пролива до 140 м у его соединения с открытым морем. По оси пролива выделяется несколько впадин с глубинами более 100 м, разделенных порогами (Маев и др., 2010). Ячеистое строение рельефа фундамента свидетельствует как о первично-тектоническом происхождении дна пролива, так и о значительной дифференцированности движений.

Активность этой тектонической зоны сохранилась вплоть до настоящего времени, о чем сви-

<sup>1</sup> <https://ifz.ru/nauka/fundamentalnyie/goloczenovaya-tektonicheskaya-aktivnost-i-sejsmichnost-belomorskogo-bassejna/> (дата обращения 12.04.2022).



**Рис. 4.** Принципиальная кинематическая схема сегментации северо-западного фланга Онежско-Кандалакшской рифтовой зоны (а): молодой Колвицкий грабен (1) и древний, но обновленный Кандалакшский грабен (2), разделенные межвпадинной перемычкой архипелага Средние Луды. План-схема сегментации северо-западного фланга Онежско-Кандалакшской рифтовой зоны (б). 1 – главный граничный сброс; 2 – второстепенный граничный сброс; 3 – направление растяжения Кандалакшского грабена; 4 – направление падения плоскости сбросов; 5 – межвпадинная перемычка, о-ва Средние Луды; 6 – ориентировка главных осей напряжения при левосдвиговом смещении (параллелепипед показан для наглядности); 7 – направление смещения; 8 – район исследования. Составлено по (Балуев и др., 2012) с изменениями.

детельствует современная сейсмичность на суше на продолжении Ругозерской губы (Авенариус, 2008), а также наличие большого количества палеосейсмодислокаций вдоль этой зоны (Мараханов, Романенко, 2014).

Активное погружение дна пролива связано с наличием растягивающих напряжений, действующих перпендикулярно проливу: ось максимального растяжения ориентирована в север-северо-восточном направлении с азимутом простирания  $\sim 15^\circ$ , а ось максимального сжатия, соответственно, в запад-северо-западном направлении с азимутом простирания  $\sim 285^\circ$ . Такие ориентировки зафиксированы на островах Покормежный и Медвежий, а также на луде Авенариус.

Западнее в пределах Кузокоцкого архипелага и на п-ове Киндо зафиксированы также оси максимального сжатия северо-западного сжатия с азимутом простирания  $\sim 310^\circ$ . Как отмечено в (Авенариус, 2008; Маев и др., 2010), дно пролива не имеет прямой осевой впадины, а разделено на сегменты, и новейшие движения при развитии этой структуры имели дифференцированный характер. При этом сегменты повернуты друг относительно друга. Этим можно объяснить небольшие различия в направлении оси максимального

сжатия, например, на островах Костьян–Коккоиха и Покормежный–Медвежий (рис. 5). В общем поле напряжения запад-северо-западного сжатия эти дифференцированные движения вносили свои коррективы.

В то же время, как отмечено в работе (Евзоров и др., 2014), в Беломорской котловине среди неотектонических разрывных нарушений доминируют сдвиги. То есть вероятнее всего, что пролив Великая Салма развивается не просто как структура растяжения, а со сдвиговой компонентой.

Для района пролива Великая Салма нами была проведена реконструкция положения главных осей напряжения с помощью структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим (1991) (рис. 6). Полученные результаты показывают наличие правосдвиговой компоненты, ориентировка оси максимального сжатия при этом имеет запад-северо-западное направление. Таким образом, полученное нами поле напряжения северо-западного сжатия связано именно с развитием этой структуры в условиях дополнительного растяжения с правосдвиговой компонентой (транстенсия). Этим же объясняется смещение сегментов дна пролива друг относительно друга.

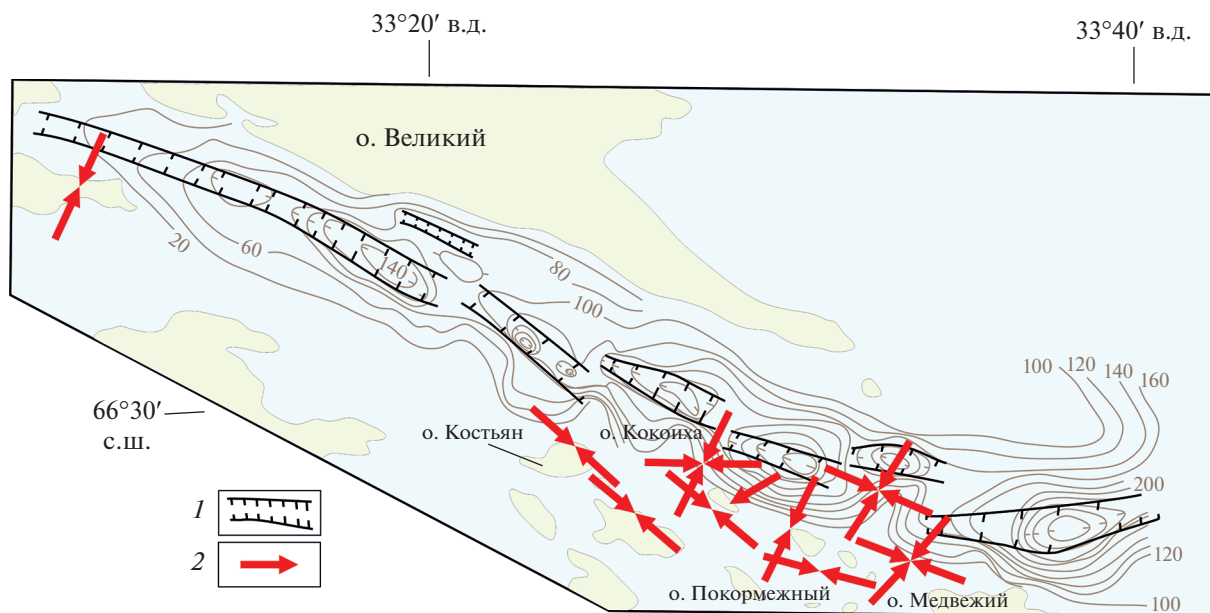


Рис. 5. Рельеф дна пролива Великая Салма, положение грабен и ориентировки осей максимального сжатия. 1 – Грабены; 2 – оси максимального сжатия. Составлено по (Маев и др., 2010).

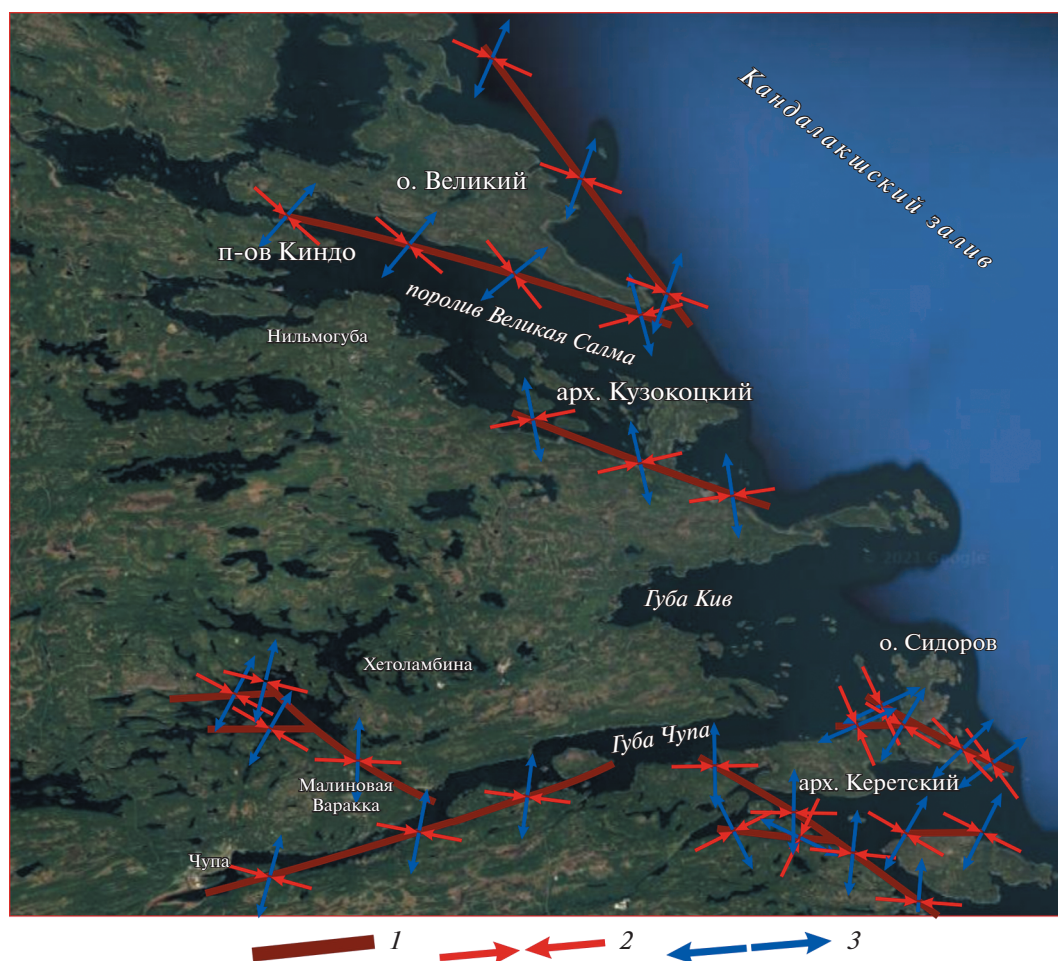


Рис. 6. Реконструкция положения главных осей напряжения с помощью структурно-геоморфологического метода (Сим, 1991) в программном обеспечении SimSGM. 1 – главные оси напряжения, 2 – оси максимального сжатия, 3 – оси максимального растяжения.



Что касается локального стресс-состояния в т.н. № 19227, то она находится в пределах предполагаемого разрывного нарушения (см. рис. 2). Согласно реконструкции структурно-геоморфологическим методом (Сим, 1991), это разрывное нарушение является левым сдвигом, с ориентировкой оси максимального сжатия в восток-северо-восточном направлении, что согласуется с результатами структурно-парагенетического метода.

По простираниям трещиноватости рассматриваемого региона подчеркивается общий тренд ориентировки всех глобальных структур на СЗ простирание (Баранская и др., 2015; Косевич, Романовская, 2014) (см. рис. 4). Измеренная в полевых условиях трещиноватость позволяет выделить локальные оперяющие структуры к сейсмодислокациям и грабенам островов Кокоиха, Покормежный и Медвежий. По распределению плотностей полюсов трещин можно предположить о преобладании присдвиговых трещин над другими типами; таким образом, выделяются группы R и R' сколов в сопровождении небольшого количества отрывов. Некоторые трещины имеют минеральные корочки, что говорит о сравнительно большом возрасте формирования этих трещин. Однозначно отрывных трещин наблюдалось немного. Если судить строго по расположению плоскостей трещин, то оси сжатия для большинства точек пролива Великая Салма лежат в северо-западных румбах. На основании вышесказанного, авторы выдвигают предположение, что реконструируемые поля напряжений имеют следующую хронологическую последовательность: начиная с этапа развития полуграбенов переменной полярности – Колвицкий и Кандалакшский рифты – формируется поле напряжения северо-западного сжатия, которое вынуждает формироваться поперечные сейсморвы на островах Кузокоцкого архипелага север-северо-западного простирания (Бондарь, Гордеев, 2021). В то же время появляется основной рисунок трещиноватости, после чего начинает раскрываться первоначальная структура рифта пролива Великая Салма. Далее вследствие развития вращательных движений против часовой стрелки (Колодяжный и др., 2019) в области островов Средние Луды по локальным точкам развиваются деформации в поле напряжения северо-восточного сжатия, трещиноватость обновляется, по древней системе трещин формируются зеркала скольжения.

Таким образом, возраст реконструируемых структурно-геоморфологическим методом напряжений приурочен к неоплейстоцену, времени, когда развивается Кандалакшский и Колвицкий грабены по северо-западной оси раскрытия

вместе с заложением рифта пролива Великая Салма. Затем начинает преобладать поле напряжения северо-западного сжатия и формируется сеть трещиноватости, характеризующаяся, в основном, как типичные сколы Риделя. Реконструкции, полученные структурно-парагенетическим методом Л.М. Расцветаева, структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим и некоторые реконструкции, полученные методом катакластического анализа (ось сжатия простирается в северо-западных румбах), имеют возраст неоплейстоцен-голоцен. И подавляющее количество реконструкций, полученных методом катакластического анализа, и некоторые, полученные структурно-парагенетическим методом (с северо-восточным простиранием оси максимального сжатия) имеют самый молодой возраст, так как отражают движения полуграбенов переменной полярности Колвицкого и Кандалакшского грабенов с общей осью вращения в области о. Средние Луды и направлением вращения против часовой стрелки. Подобное строение модели новейшей тектоники создает наведенные напряжения северо-восточного простирания в районе Кузокоцкого архипелага и способствует развитию поперечных структур (сейсморазрывы) на островах и большого количества псевдо-трансформных смещений северо-восточного простирания на дне пролива Великая Салма. Возраст реконструируемых напряжений – голоцен. В таких условиях уже заложенная трещиноватость не прекращает свое развитие, а повторно активизируется в виде сколовых трещин R' в структурах сейсмодислокаций, так как ориентируется она уже под углом  $65^{\circ}$ – $80^{\circ}$  по направлению основного сжатия.

Возраст реконструируемых напряжений, по видимому, можно связать с формированием современной структуры Кандалакшского грабена (Балуев и др., 2012; Колодяжный, 2019) и с моментом развития полуграбенов обратной полярности Колвицкого и Кандалакшского грабенов (конец неоплейстоцена – начало голоцена).

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты несут больше интерпретационный качественный характер, чем количественный. Это означает, что результат тем точнее, чем больше данных мы получаем и чем богаче геологический опыт автора. В связи с этим поставленная цель исследования не является совершенной и требует отзвонив заинтересованных людей о результатах данной статьи и пополнении баз данных измерений геологических стресс-индикаторов.

Комплексное применение полевых и дистанционных тектонофизических методов позволило определить вероятные источники напряжения в пределах крупного участка южного берега Белого моря от пролива Великая Салма до Чупинской губы и получить следующие результаты:

1. В районе участка исследования в новейший и современный этап действуют два источника напряжения — развитие структур Кандалакшского грабена и грабена пролива Великая Салма.

2. Зафиксированное северо-восточное сжатие связано с развитием Кандалакшского грабена по схеме, предложенной в работе (Балуев и др., 2012) — два полуграбена, которые растягиваются, соединены зоной аккомодации напряжений со сдвиговой деформацией. Данный вывод предварительный и требует дополнительного исследования с помощью математического моделирования.

3. Зафиксированное запад-северо-западное сжатие связано с развитием структуры пролива Великая Салма в условиях растяжения с правосторонней компонентой (транстенсия).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

#### FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Task of the IPE RAS.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность за организацию полевых выездов заведующему лабораторией геоморфологии Института Географии, кандидату технических наук Сергею Валентиновичу Швареву.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude for the organization of field trips to the employee of the Head of the Geomorphology Laboratory of the Institute of Geography, Candidate of Technical Sciences S.V. Shvarev.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Авенариус И.Г.* Морфоструктурный анализ при изучении культурного и природного наследия Западно-Арктического региона России. М.: Paulsen, 2008. 188 с.

*Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Воинов А.С., Горбачевич Н.Р., Журавлев В.А., Ногина М.Ю., Парамонова М.С., Проскурин Г.Ю., Рыбалко А.Е., Семенова Л.Р., Суриков С.Н., Шкарубо С.И.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Л. Q-(35), 36 — Апатиты: Объясни-

тельная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 436 с.

*Баранская А.В., Романенко Ф.А.* Дифференцированные вертикальные движения и блоковая тектоника побережий Кандалакшского залива Белого моря: Материалы IV Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (16–20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург, ФГУП ВСЕГЕИ). СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. С. 3–6.

*Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С.* Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий” м-ба 1 : 1500000) // Тр. ГИН РАН. М.: ГЕОС, 2012. Вып. 597. 104 с.

*Бондарь И.В., Гордеев Н.А.* Реконструкция палеонапряжений структурно-геоморфологическим методом Сим Л.А. по ортофотоплану высокого разрешения на о. Кокоиха (Кандалакшский залив) // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы седьмой молодежной тектонофизической школы-семинара. 2021. С. 69–72. <https://doi.org/10.21455/VIIUTphSchS>

*Горбатов Е.С., Сорокин А.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С.* Результаты детальных палеосейсмологических исследований в районе п-ова Киндо (Карельский берег Белого моря) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 3. С. 5–24. <https://doi.org/10.21455/VIS2017.3-1>

*Гордеев Н.А., Молчанов А.Б.* Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Государственная геологическая карта СССР. М-б 1 : 200000 (второе поколение). Серия Карельская. Л. Q-36-XV / отв. ред. К.А. Шуркин. Северо-Западное геологическое управление, 1959.

*Евзеров В.Я., Виноградов А.Н., Николаева С.Б.* Геодинамика беломорской котловины в голоцене // Вестн. КНЦ РАН. 2014. № 2 (17). С. 51–58.

*Колодяжный С.Ю., Балуев А.С., Зыков Д.С.* Структура и эволюция северо-запада Беломорско-Северодвинской зоны сдвига в позднем Протерозое и Фанерозое (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. 2019. № 1. С. 62–86. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019162-86>

*Колька В.В., Корсакова О.П., Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Вашков А.А.* Побережье Кандалакшского залива Белого моря: комплексные литологические, микропалеонтологические, неотектонические, геохронологические исследования лаборатории геологии и минералогии новейших отложений Геологического института КНЦ РАН в 2017–2019 годах // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и северо-запада России. 2019. № 6. С. 55–60. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10609>

- Косевич Н.И., Романовская М.А.* Линеаменты и тектоника Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 20–26.
- Лукашов А.Д.* Геодинамика новейшего времени // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Изд-во Карельского науч. центра РАН, 2004. С. 150–191.
- Маев Е.Г., Сафьянов Г.А., Фроль В.В., Зверев А.С.* Мощности осадков и рельеф коренного ложа пролива Великая Салма (Белое море) // Геоморфология. 2010. № 1. С. 59–66.
- Мараханов А.В., Романенко Ф.А.* Новые данные о послеледниковых сейсмодислокациях Северной Карелии (Карельский берег Белого моря) // Юдахинские чтения. Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в.: Материалы докладов Всерос. конф. с междунар. уч. Архангельск: Ин-т экологических проблем Севера, 2014. С. 137–140.
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Никонов А.А., Шаров Н.В., Конечная Я.В., Михайлова Я.А., Евтюгина З.А.* Современная сейсмичность беломорского региона // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 36–51.  
<https://doi.org/10.31857/S0203-03062019136-51>
- Николаева С.Б.* Послеледниковая тектоника и палеосейсмодислокации в районе участка Ковды (Кандалакшский залив Белого моря) // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Науки о Земле. 2019. № 64 (3). С. 434–453.  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.304>
- Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В.* Поздне- и послеледниковые разломы и палеосейсмонарушения в восточной части Фенноскандинавского щита: обзор и результаты исследований // Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 428–432.
- Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 225 с.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А.* Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 326–350.
- Sim L.A., Zhiron D.V., Marinin A.V.* Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. Vol. 2. Iss. 3. P. 219–243.  
<https://doi.org/10.5800/GT2011230044>

## The Neotectonic Stress–Strain State of the Southern Side of the Kandalaksha Graben

I. V. Bondar<sup>1</sup>, \* and N. A. Gordeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\**e-mail: bond@ifz.ru*

In the course of fieldwork in 2019–2021 on the southern coast of the White Sea, the authors of the article collected representative material for tectonophysical research—measurements of spatial orientation of geological stress indicators: sliding mirrors, separation, veins and fractures. To analyze the collected material, a complex of tectonophysical methods was applied, namely, the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements, the structural-paragenetic method, the structural-geomorphological method and the SimSGM program, fracture analysis. Data on the stress state throughout the Kuzokotsky Archipelago and the adjacent territories of the Great Salma Strait were obtained. By the method of cataclastic analysis, 10 local stress states were obtained, 11 by the structural-paragenetic method, and 10 by the structural–geomorphological method. On the territory of the Kindo Peninsula, Veliky Island, and the Kuzokotsky Archipelago, local stress states of different ages have been reconstructed, which were tied to the tectonic history of the Kandalaksha graben. Variations of stress-strain states for different sites are revealed. And a hypothetical model of the gradual evolution from the north-west compression to the north-east during the latest tectonic stage is proposed. Local stress conditions confirm the presence of transtension conditions in the axial part of the rift structures of the Great Salma Strait. The identification of voltage sources made it possible to update the history of the development of the Kandalaksha graben. According to the expanded database of fracturing and other geological stress indicators, it will be possible to reach regional geodynamic regimes, which in turn is useful for predicting earthquakes.

**Keywords:** stress-strain state, slickenside, fracturing, neotectonics, local stress state, geological stress indicators, stress sources, Kandalaksha Bay, Great Salma Strait

REFERENCES

- Astaf'ev B.Yu., Bogdanov Yu.B., Voinova O.A., Voinov A.S., Gorbatsevich N.R., Zhuravlev V.A., Nogina M.Yu., Paramonova M.S., Proskurin G.Yu., Rybalko A.E., Semenova L.R., Surikov S.N., Shkarubo S.I. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii* [State Geological Map of the Russian Federation]. Scale 1: 1000000. *Ser. Baltiiskaya* [Baltic Serie]. Sheet Q-(35), 36: *Apatity. Ob'yasnitel'naya zapiska* [Apatity. Explanatory Note]. St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2012, 3d ed. 436 p.
- Avenarius I.G. *Morfostrukturnyi analiz pri izuchenii kul'turnogo i prirodnogo naslediya Zapadno-Arkticheskogo regiona Rossii* [Morphostructural Analysis in the Study of Cultural and Natural Heritage of the Western Arctic Region of Russia]. Moscow: Paulsen Publ., 2008. 188 p.
- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N., Przhiyalgovskii E.S. *Tektonika Belogo morya i prilegayushchikh territorii (Ob'yasnitel'naya zapiska k "Tektonicheskoi karte Belogo morya i prilegayushchikh territorii" masshtaba 1 : 1500000)*. [Tectonics of the White Sea and Adjacent Territories (Explanatory Note to the "Tectonic Map of the White Sea and Adjacent Territories" Scale 1 : 1500000)]. Tr. GIN RAN, vol. 597. Moscow: GEOS Publ., 2012. 104 p.
- Baranskaya A.V., Romanenko F.A. Differentiated vertical movements and block tectonics of the coasts of the Kandalaksha Bay of the White Sea. In *Mater. IV Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov pamyati akademika A.P. Karpinskogo, 16–20 fevralya 2015 g.* [Proc. IV Int. Sci. Pract. Conf. of Young Scientists and Specialists in Memory of Academician A.P. Karpinsky, February 16–20, 2015]. St. Petersburg: VSEGEI, 2015, pp. 3–6. (In Russ.).
- Bondar' I.V., Gordeev N.A. Reconstruction of paleostresses by the structural-geomorphological method Sim L.A. using a high-resolution orthophotoplan on O. Kokoikha (Kandalaksha Bay). In *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty* [Modern Tectonophysics. Methods and Results]. 2021, pp. 69–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/VIIYTphSchS>
- Evzerov V.Ya., Vinogradov A.N., Nikolaeva S.B. Geodynamics of the White Sea basin in the Holocene. *Vestn. KNTs RAN*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 51–58. (In Russ.).
- Gorbatov E.S., Sorokin A.A., Marakhanov A.V., Lar'kov A.S. Results of detailed paleoseismological studies in the area of the Kindo Peninsula (Karelian coast of the White Sea). *Vopr. Inzhenernoï Seismol.*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 5–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/VIS2017.3-1>
- Gordeev N.A., Molchanov A.B. Automation of the structural-geomorphological method of reconstruction of shear tectonic stresses L.A. Sim. *Geoinformatika*, 2019, no. 2, pp. 25–33. (In Russ.).
- Kolodyazhnyi S.Yu., Baluev A.S., Zykov D.S. Structure and evolution of the north-west of the White Sea-Severodvinsk shear zone in the Late Proterozoic and Phanerozoic (East European Platform). *Geotektonika*, 2019, no. 1, pp. 62–86. (In Russ.).
- Kol'ka V.V., Korsakova O.P., Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Vashkov A.A. The coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea: complex lithological, micropaleontological, neotectonic, geochronological studies of the Laboratory of Geology and Mineralogy of the newest deposits of the Geological Institute of the KSC RAS in 2017–2019. *Rel'ef i Chetvertichnye Obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii*, 2019, no. 6, pp. 55–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10609>
- Kosevich N.I., Romanovskaya M.A. Lineaments and tectonics of the Kandalaksha Bay of the White Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 4: Geol.*, 2014, no. 4, pp. 20–26. (In Russ.).
- Lukashov A.D. Geodynamics of modern times. In *Glubinnoe stroenie i seismichnost' Karelskogo regiona i ego obramleniya* [Deep Structure and Seismicity of the Karelian Region and its Framing]. Sharov N.V., Ed. Petrozavodsk, 2004, pp. 150–191. (In Russ.).
- Maev E.G., Saf'yanov G.A., Frol' V.V., Zverev A.S. Precipitation power and relief of the root bed of the Great Salma Strait (White Sea). *Geomorfologiya*, 2010, no. 1, pp. 59–66. (In Russ.).
- Marakhanov A.V., Romanenko F.A. New data on postglacial seismic dislocations of Northern Karelia (Karelian coast of the White Sea). In *Yadakhinskie chteniya. Geodinamika i ekologiya Barents-regiona v XXI v.* [Yudakhin Readings. Geodynamics and Ecology of the Barents Region in the XXI Century]. Arkhangel'sk: Inst. Ekol. Probl., 2014, pp. 137–140. (In Russ.).
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Nikonov A.A., Sharov N.V., Konechnaya Y.V., Mikhailova Y.A., Evtyukhina Z.A. The present-day seismicity of the White Sea region. *Vulkanol. Seismol.*, 2019, no. 1, pp. 36–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019136-51>
- Nikolaeva S.B. Postglacial tectonics and paleoseismodislocations in the area of the Kovda site (Kandalaksha Bay of the White Sea). *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. Nauki o Zemle*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 434–453. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.304>
- Nikolaeva S.B., Nikonov A.A., Shvarev S.V. Late- and post-glacial faults and paleoseismic disturbances in the eastern part of the Fennoscandian Shield: review and research results. *Tr. Fersmanovskoi Nauch. Sessii GI KNTs RAN*, 2019, no. 16, pp. 428–432. (In Russ.).
- Rastsvetaev L.M. Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic disturbances. In *Problemy strukturnoi geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov* [Problems of Structural Geology and Physics of Tectonic Processes]. Moscow: GIN RAN, 1987, pp. 173–235. (In Russ.).
- Rebetskii Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy* [From Slickenside to Tectonic Stresses.

- Methods and Algorithms]. Moscow: GEOS Publ., 2017. 225 p.
- Sim L.A. The study of tectonic stresses by geological indicators (methods, results, recommendations). *Izv. Vuzov. Geol. I Razvedka*, 1991, no. 10, pp. 3–22. (In Russ.).
- Sim L.A. The influence of global tectogenesis on the newest stressed state of the platforms of Europe. In *M.V. Gzovskii i razvitie tektonofiziki* [M.V. Gzovsky and the Development of Tectonophysics]. Moscow: Nauka Publ., 2000, pp. 326–350. (In Russ.).
- Sim L.A., Zhirov D.V., Marinin A.V. Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield. *Geodyn. Tectonophys.*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 219–243.  
<https://doi.org/10.5800/GT2011230044>
- State Geological Map of the USSR*. Scale 1 : 200 000 (second generation). Karelian Ser. L. Q-36-XV. Shurkin K.A., Ed. Severo-Zapadn. Geol. Upr., 1959. (In Russ.).