

УДК 551.24.03

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА****А. В. Муровская, В. Г. Бахмутов***Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, email: murovskaya@gmail.com*

**Реферат.** Цель статьи – описать и проанализировать деформации мезоуровня (трещины отдельности, зеркала скольжения, складки и др.) в разновозрастных породных комплексах Западной Антарктики, восстановить соответствующие им поля напряжений и определить этапы деформации. В работе были использованы общеизвестные приемы структурной геологии и методы тектонофизики: структурно-парагенетический (реконструкция поля напряжений по системам сопряженных трещин) и кинематический (по тектоническим зеркалам с бороздами). На 105 пунктах наблюдения были измерены ориентировки 3246 трещин отдельности, 23 тектонических зеркал, 126 даек, 53 кварцевых жил и описаны другие деформационные структуры. Для каждого пункта или группы пунктов наблюдения выполнена реконструкция тензора напряжения, а для архипелага Аргентинские острова построена схема площадного распределения ориентировки тензора напряжений. Определено региональное поле напряжения с горизонтальной СВ-ЮЗ ориентировкой оси сжатия и горизонтальной СЗ-ЮВ ориентировкой оси растяжения. Ориентировка оси растяжения вкрест основных рифтогенных структур региона позволяет связать их формирование с этапом растяжения, который, возможно, начался в раннем кайнозое. Условия для растяжения континентальной литосферы могли появиться в раннем кайнозое в результате отрыва слэба субдуцирующей плиты. Деформация сжатия проявлена в меньшей степени и связана, в основном, с габброидами. Этап сжатия предшествовал этапу растяжения и, возможно, совпал по времени с периодом кристаллизации габброидных массивов в позднем мелу. Выявлены аномалии в ориентировке регионального поля напряжений, которые, очевидно, связаны с поворотом в горизонтальной плоскости сопряженных трещин в зонах сдвигов и могут служить их индикаторами. Для о. Галиндез, где выполнен большой объем измерений, реконструированы локальные поля напряжений и связанные с ними вертикальные перемещения. Выявлен унаследованный характер разрывных нарушений. Показано, что при формировании дайки и кварцевые жилы использовали более древние системы разрывов, а современные разрывы реализуются по существующим дайкам и контактам различных породных комплексов.

**Попередні результати польових тектонофізичних досліджень в районі західного узбережжя Антарктичного півострова.****Г. В. Муровська, В. Г. Бахмутов**

**Реферат.** Мета статті – описати та проаналізувати деформації мезорівня (тріщини окремістості, дзеркала ковзання, складки та ін.) в різновікових породних комплексах Західної Антарктики, відновити відповідні їм поля напружень і визначити етапи деформації. У роботі були використані загальновідомі прийоми структурної геології та методи тектонофізики: структурно-парагенетичний (реконструкція поля напружень по системах сполучених тріщин) і кінематичний (по тектонічних дзеркалах з бороздами). На 105 пунктах спостереження були виміряні орієнтування 3246 тріщин, 23 тектонічних дзеркал, 126 дайок, 53 кварцових жил та описані інші деформаційні

структуры. Для каждого пункта або групи пунктів спостереження була виконана реконструкція тензора напруження, а для архіпелагу Аргентинські острови побудована схема площинного розподілу орієнтувань тензора напруження. Визначено регіональне поле напруження з горизонтальною ПнС-ПдЗ орієнтованою віссю стиснення і горизонтальною ПнЗ-ПдС орієнтованою віссю розтягнення. Положення осі розтягнення вхрест основних рифтогенних структур регіону дозволяє зв'язати їх формування з етапом розтягнення. Умови для розтягування континентальної літосфери могли з'явитися в ранньому кайнозой в результаті відриву слєбу плити, що занурюється. Деформація стиснення проявлена меншою мірою і пов'язана, в основному, з габброїдами. Етап стиснення передував етапу розтягування і, можливо, збігся за часом з періодом кристалізації габброїдних масивів у пізній крейді. Виявлено аномалії в орієнтуванні регіонального поля напружень, які, очевидно, пов'язані з поворотом в горизонтальній площині сполучених тріщин в зонах здвигів і можуть служити їх індикаторами. Для о. Галіндез, де виконано великий обсяг вимірювань, реконструйовані локальні поля напружень і пов'язані з ними вертикальні переміщення. Виявлено ускладнений характер розривних порушень. Показано, що дайки і кварцові жили використовували давніші системи розривів, а сучасні розриви реалізуються вздовж існуючих дайок і контактів різних породних комплексів.

#### **Preliminary results of a field tectonophysical study in the West coast of Antarctic Peninsula.**

A.V. Murovskaya, V.G. Bakhmutov

**Abstract.** The purpose of the paper is to describe and analyze deformations of the mesolevel (joints, slickensides, folds and etc.) in the West Antarctica rock complexes of different age, to reconstruct the conformity stress fields and to identify deformation stages. We used the conventional structural geology techniques and methods of tectonophysics: structural-paragenetic (reconstruction of stress field by system of conjugated fractures) and kinematic (by slicken-sides). Totally 3246 joints, 23 slicken-sides, 126 dykes and 53 quartz veins were measured and other deformation structures were described at 105 observation points. For each observation point or group of points the stress tensor has been reconstructed, and for Argentine Islands areal distribution of the stress tensor orientations has been plotted. The regional stress field with horizontal NE-SW compressional axis and the horizontal NW-SE extensional axis has been identified. The orientation of the extensional axis across the strike of main rift structures allows us to relate their origination with extensional deformation stage. The conditions for extension of continental lithosphere could appear in the Early Cenozoic as a result of slab isolation during plate subduction. The compressional deformations are less and associated mainly with gabbros. The compressional stage preceded by extensional one and, probably, coincided in time with crystallization of gabbro massifs in Late Cretaceous. The anomalies in orientation of regional stress field have been revealed. They are associated with rotation of conjugate fracture in horizontal plane in the shear zones and can serve as their indicators. A lot of measurement on Galindez Island allowed to us reconstructed the local stress fields and the associated vertical movements. Inherited character of the fractures is revealed. It is shown that dikes and quartz veins use older system of discontinuities, whereas modern fractures are implemented on the existing dikes and contacts of various rock complexes.

**Key words:** West Antarctica, tectonophysics, earth crust, rock deformation.

#### **Вступление**

Антарктический полуостров (АП) представляет собой магматическую дугу, сформированную вдоль юго-западной части палео-тихоокеанской окраины при распаде суперконтинента Гондвана (Бахмутов, Егорова, 2009; Yegorova et al., 2011 и ссылки в них).

Тектоническая эволюция южной Атлантики, пролива Дрейка и прилегающего тихоокеанского сектора определялась взаимодействием между Южно-Американской и Антарктической плитами. Раскрытие пролива Дрейка происходило в конце олигоцена – начале плиоцена во время формирования тектонической структуры дуги Скоша. Последняя образовалась в результате спрединга морского дна, что привело к образованию новой океанической коры между двумя плитами – плитой Скоша и Сендвичевой плитой. Континентальная кора, которая соединяет Южную Америку и Антарктический полуостров, разбита на большое количество отдельных блоков (фрагментов). Основные тектонические структуры региона хорошо отражаются на картах рельефа морского дна и аномалий силы тяжести, построенных по данным спутниковой альтиметрии (Yegorova et al., 2011).

В западноантарктическом секторе протяжении позднего мезозоя – кайнозоя происходила субдукция плиты Феникс под блок АП, активность которой постепенно уменьшается в направлении ЮЗ – СВ (Jin et al., 2002 и ссылки в ней). Район наших исследований (к югу от о. Анверс) относится к пассивному сегменту континентальной окраины АП, где тектоническая активность завершилась в позднем миоцене – раннем плиоцене.

В данной работе мы представляем результаты полевых тектонофизических исследований, проведенных на территории к югу от острова Анверс. Район исследований включает архипелаг

Аргентинские острова и прилегающие к нему архипелаги западного побережья Антарктического полуострова (рис.1).

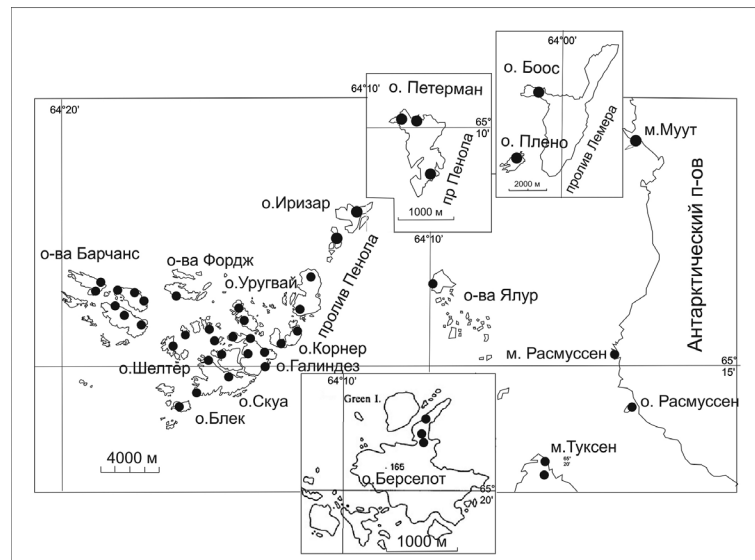


Рис.1. Карта района работ с пунктами тектонофизических наблюдений.

Целью исследований было описать и проанализировать деформации мезоуровня (трещины отдельности, зеркала скольжения, складки и др.) в породных комплексах разного возраста, восстановить соответствующие им поля напряжений и определить этапы деформации.

В работе были использованы общеизвестные приемы структурной геологии и методы тектонофизики: структурно-парагенетический (реконструкция поля напряжений по системам сопряженных трещин) и кинематический (по тектоническим зеркалам с бороздами) (Гинтов и др., 2013 и ссылки в ней). Построение стереограмм, обработка и интерпретация данных были выполнены с использованием компьютерных программ – StereoNett (2.46) и Win-Tensor (1.4.19). На 105 пунктах наблюдения (п. н.) были измерены ориентировки 3246 трещин отдельности, 23 тектонических зеркала, 126 даек, 53 кварцевых жил и описаны другие деформационные структуры.

## 2. Краткие геологические сведения

Породы, слагающие изученную территорию, представлены двумя группами – интрузивными образованиями батолита Антарктического полуострова (AP batholiths) мезо-кайнозойского возраста и вулканогенными породами Антарктического полуострова (AP Volcanic Group) верхнеюрского возраста. В районе работ вулканиды представлены, в основном, андезитовыми лавами и пирокластическими породами, а интрузивные породы – габброидами и гранитоидами (Бахмутов и др., 2013 и ссылки в ней).

По данным батиметрии архипелаг Аргентинские острова можно выделить как отдельный тектонический блок, который разбит разломами на небольшие фрагменты (Greku et al., 2006). Аргентинские острова отделены от Антарктического полуострова проливом Пенола, который заложен по зоне тектонического разлома.

## 3. Результаты реконструкции ориентировок осей тензора напряжения

Для каждого пункта наблюдения (п.н.) или группы п.н. были восстановлены ориентировки осей сжатия и растяжения, которые вынесены на стереограммы отдельно для пород вулканической группы и пород батолита (рис. 2).

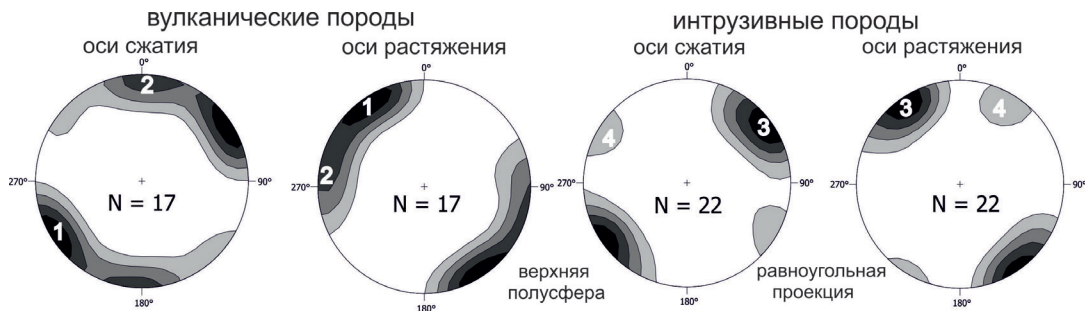


Рис. 2. Ориентировки осей сжатия и растяжения для вулканических и интрузивных пород. Одинаковыми цифрами обозначены соответствующие друг другу оси сжатия и растяжения.

Поле с горизонтальными осью сжатия ориентированной ЮЗ  $220^{\circ}$ – $240^{\circ}$  и соответствующей ей осью растяжения СЗ  $310^{\circ}$ – $330^{\circ}$  простирания (максимумы 1 и 3) является наиболее проявленным и общим для обеих групп пород.

В породах интрузивного комплекса реконструировано также «обратное» поле с СЗ  $300^{\circ}$  ориентировкой оси сжатия и СВ  $40^{\circ}$  простиранием оси растяжения (максимум 4), а в вулканогенных породах восстановлено поле с субмеридиональной осью сжатия и субширотной осью растяжения (максимум 2).

На острове Галиндез в 16 п. н. измерены 564 трещины. На рис. 3 показана обобщенная стереограмма концентрации полюсов всех трещин, наклонных и пологопадающих разрывов с углами падения меньше  $65^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  соответственно.

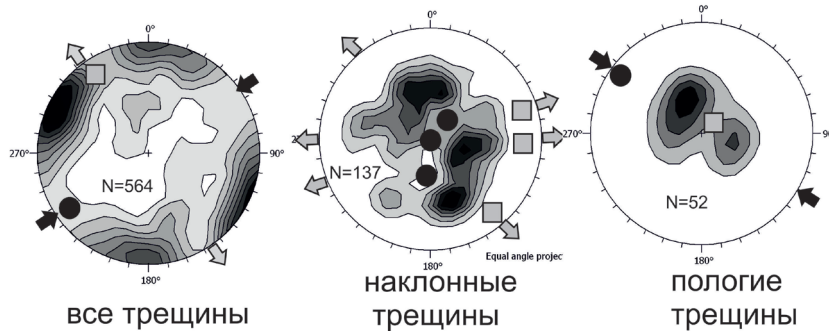


Рис. 3. Полюса сопряженных трещин и главные оси тензора напряжений для о. Галиндез. Черный кружок и черные стрелки маркируют ось сжатия, серый квадрат и серые стрелки – ось растяжения.

На стереограмме всех трещин выделяются два максимума, угол между которыми составляет  $60^{\circ}$ . Ось растяжения находится на биссектрисе острого угла между ними, ее ориентировка СЗ  $320^{\circ}$ , а ось сжатия – на биссектрисе тупого угла (ее ориентировка ЮЗ  $230^{\circ}$ ). На стереограмме наклонных трещин восстановлены три поля напряжения с субгоризонтальными положениями оси растяжения и субвертикальным положением оси сжатия.

Две группы трещин с углами падения меньше  $40^{\circ}$  наклонены в противоположных направлениях: на ЮВ и на СЗ. Для них восстановлена горизонтальная СЗ  $305^{\circ}$  ось сжатия и вертикальная ось растяжения.

В группе Аргентинских островов деформации в интрузивных породах изучались на островах Барчанс (19 п.н.) и Фордж (2 п.н.), сложенных преимущественно гранодиоритами. Восстановленное поле напряжений характеризуется субгоризонтальными осями ЮЗ сжатия и СЗ растяжения (рис. 4) и имеет выдержанный характер для всех п.н.

Сравнение ориентировок трещин отдельности, кварцевых жил и основных даек показывает унаследованность последних (рис. 4Б, 4В).

Контакт гранодиоритов с вулканиками изучался на островах Фордж и южный Барчанс. На о. Фордж, по мере приближения к контакту, в гранодиоритах увеличивается количество и размеры темных ксенолитов. На контакте вулканики подвергаются деформации (увеличивается угол падения пластов до  $50^{\circ}$  на ЮЗ  $240^{\circ}$  при типичном  $10$ – $15^{\circ}$ ) и метаморфизму.

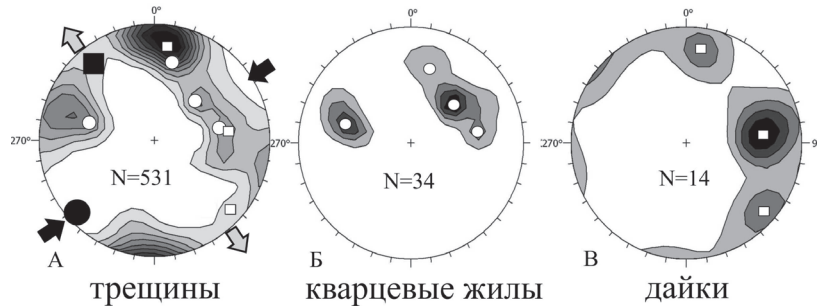


Рис. 4. А – полюса сопряженных трещин и главные оси тензора напряжений для о-вов Барчанс и Фордж; Б – полюса кварцевых жил; В – полюса даек. Максимумы концентрации для жил (белые кружки) и даек (белые квадраты) нанесены на стереограмму полюсов сопряженных трещин.

На о. Южный Барчанс в зоне контакта повсеместно развиты структуры хрупко-пластической деформации: зоны брекчирования и милонитизации, чечевидные и S-образные включения.

На о. Петерман наблюдения проводились на его СЗ оконечности, сложенной габброидами и кварцевыми диоритами, и на ЮВ побережье, где обнажаются гранодиориты.

Лейкократовые и меланократовые габброиды повсеместно прорезаны темными прожилками мелкокристаллической роговой обманки, которые заполняют сопряженные трещины ССВ  $0^{\circ}$ – $30^{\circ}$  и субширотного  $260^{\circ}$ – $280^{\circ}$  простирания, сформированные в поле ЮЗ  $230^{\circ}$  сжатия и СЗ  $320^{\circ}$  растяжения (рис. 5).

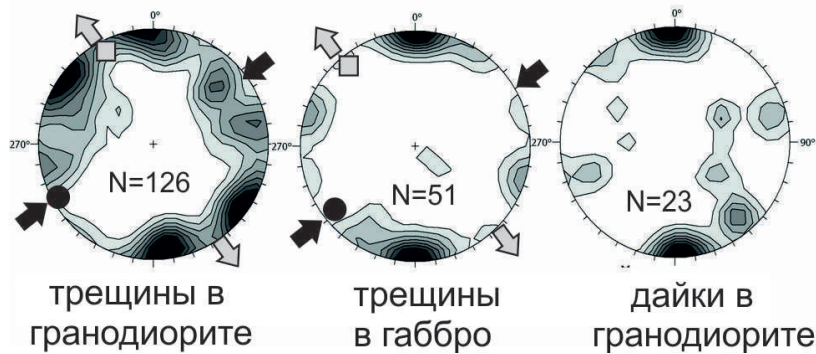


Рис. 5. Полюса трещин и даек для интрузивных пород о. Петерман.

Габбро прорывается кварцевыми гранодиоритами – светло-розовой или кремовой практически полностью кварц-полевошпатовой породой. Вблизи контакта описано разрывное нарушение в габбро, которое развивалось вдоль зольбанда крупной основной дайки.

Тело гранодиорита в зоне разлома наклонено на ЮВ на  $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$  градусов.

Для гранодиоритов ЮВ оконечности острова характерно наличие существенного количества темноцветных угловатых включений размером от единиц до десятков см, вокруг которых во вмещающих породах развиты полосчатые ореолы. Гранодиориты прорываются многочисленными дайками основного состава. Были измерены элементы залегания 23 даек, пересекающих гранодиориты (рис. 5). Сопоставление стереограмм для трещин и даек показывает унаследованный характер последних. При внедрении дайки использовали существующие разрывы З и ЮЗ направлений.

На о. Боос исследования проводились в районе контакта андезитов и тоналитов, который проходит по крутопадающему разлому СВ  $70^{\circ}$  простирания. Вулканиды в зоне сочленения кливажированы и метаморфизованы, а в тоналитах присутствуют многочисленные темные включения, гранитные жилы и зоны ожелезнения. Далее на запад тоналиты контактируют с гранодиоритами по зоне крутопадающего разлома СВ  $40^{\circ}$  простирания. Блок с тоналитами опущен по отношению к диоритовому.

Тектонофизические наблюдения были проведены в северной части о. Берселот в интрузивных породах разного состава – габбро, гранитах и гранодиоритах. Тело полосчатого габбро по кру-



топадающему разлому контактирует с вулканитами, слагающими гористую часть острова. Полосчатость в габбро крутая с падением на ЮЗ 220° под углом 70°. Соответственно, простирание полос 310°, что параллельно зоне разлома, проходящей по контакту вулканитов и интрузивного комплекса. В полосчатом габбро описана зона смятия, возникшая в результате деформации сжатия.

Самая северная часть о. Берселот сложена гранодиоритом. Между габбро и гранодиоритом расположены несколько небольших изолированных выходов розовых гранитов и гранит-аплитов. Тела гранитов расположены в поле развития диоритов и вытянуты в СЗ направлении. Границы гранитных тел с гранодиоритами постепенные и зачастую имеют неправильную форму.

На мысе Моот интрузивные породы диоритового состава пересекаются густой сетью даек.

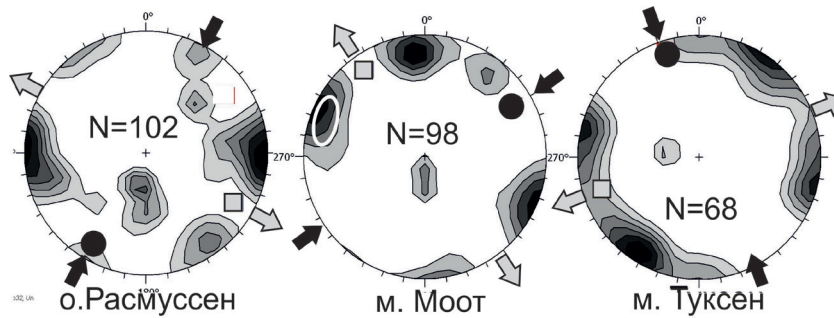


Рис. 6. Полюса трещин отдельности для о. Расмуссен, м. Моот, м. Туксен. Белым овалом отмечены полюса даек.

На рис. 6 видно, что полюса даек совпадают с полюсами трещин СВ направления, которые, очевидно, были более проницаемы для расплавов в силу своей ориентировки.

На западной оконечности мыса Туксен, который слагают измененные габброиды, зафиксированы крупные тектонические зеркала, представленные гладко отполированными плоскостями СВ и субмеридионального простирания с глубокими субгоризонтальными бороздами. Восстановленное поле напряжения характеризуется СЗ ориентировкой оси сжатия.

#### 4. Площадное распределение ориентировок главных осей тензора напряжения

Для группы Аргентинских островов ориентировки осей сжатия и растяжения были вынесены на карту (рис. 7).

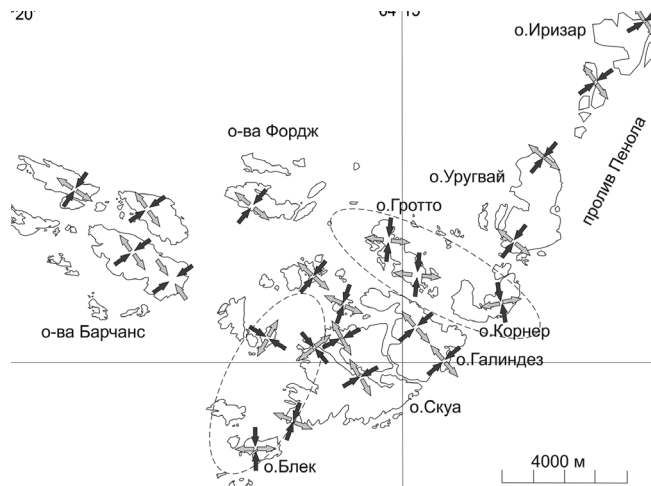


Рис. 7. Площадное распределение ориентировок тензора напряжений пород архипелага Аргентинские острова. Черные стрелки – оси сжатия, серые стрелки – оси растяжения.

Явно преобладает поле горизонтального ЮВ растяжения и горизонтального СВ сжатия, которое проявлено как в вулканических комплексах, так и в интрузивных породах.

На карте выделяются два участка, показанные овалами, где поле напряжения имеет аномальную ориентировку. Для группы Аргентинских островов аномальные зоны проходят по островам Гротто и Корнер вдоль пролива Мик и по зоне включающей острова Шелтер и Индикатор. Очевидно, что эти аномалии связаны с зонами сдвиговых разломов, где сопряженные трещины поворачиваются в горизонтальной плоскости вместе с соответствующим им тензором напряжения.

Аномальное поле также определено для габброидов м. Туксен и о. Берселот.

## 5. Интерпретация полей напряжений

Установленные на всей изученной территории поля горизонтального СВ-ЮЗ сжатия и горизонтального СЗ-ЮВ растяжения могут быть проинтерпретированы как компоненты регионального поля. Горизонтальное положение осей главных нормальных напряжений и выдержанный характера на значительной территории позволяют связать его с перемещениями плит.

Ориентировка оси растяжения вкrest основных рифтогенных структур региона позволяет связать их формирование с режимом растяжения. В таком поле в зонах разломов, ориентированным в СВ-ЮЗ направлении, будет действовать напряжение растяжения и осуществляться сбросы, как-выми и является проливы Пенола, Лемера, Герлаха, Кристал Саунд и др.

По СЗ-ЮВ направлениям будут реализоваться как правые, так и левые сдвиги. Для изученной территории таковыми являются проливы Мик, Блек, Френч и др.

«Обратное» поле с СЗ-ЮВ ориентировкой сжатия на изученной территории проявлено в меньшей степени. Структуры сжатия или транспрессии, как правило, связаны с габброидами.

Существуют локальные поля напряжений, связанные с вертикальными перемещениями. Их реконструкция показана на примере анализа трещиноватости о. Галиндез. Ориентировка разрывов сбросового типа и связанные с ними поля растяжения несколько изменяются по направлению и обеспечивают относительные вертикальные перемещения отдельных блоков. Для о. Галиндез перемещения, связанные с локальными полями растяжения, реализуются по системе горстов-грабенов с углом падения сместителей  $70-50^\circ$ . По системе таких нарушений приподнята центральная часть острова и опущены его фланги.

Две системы плоскостей, пологопадающих в противоположных направлениях, возможно, связаны со слоистостью и отражают наличие пологой складчатости, ось которой направлена СВ-ЮЗ (параллельно линии АП) и перпендикулярна напряжению сжатия.

Наиболее дискуссионным является вопрос о возрасте изученных деформаций и соответствующих полей напряжений. Для его рассмотрения необходимо привлечение всего объема геолого-геофизической информации.

Региональное поле с горизонтальной СЗ-ЮВ ориентировкой оси растяжения и СВ-ЮЗ ориентировкой оси сжатия представляется самым молодым и связанным с режимом растяжения. Режим растяжения подтверждается внедрением многочисленных даек в интрузивные породы и повсеместным развитием в рельефе суши и морского дна узких протяженных рифтогенных структур.

Что касается времени начала деформаций растяжений, его можно предположить ранне кайнозойским (на основе информации, приведенной в работе (Бахмутов и др., 2013). Авторы предположили субдукционный источник для пород ранних ассоциаций Андийского комплекса (96–88 млн. лет) и смешанный источник, с добавлением «обогащенной астеносферной компоненты» для более поздних образований (около 60 млн. лет). Это может быть связано с деструкцией океанического слэба и отрывом его части. В результате этого процесса «отката субдукции», по мнению авторов, уже в раннем кайнозое могли возникнуть условия для растяжения континентальной литосферы. Эта гипотеза хорошо согласуется с результатами тектонофизических исследований.

Деформации сжатия, наиболее отчетливо выраженные в габброидах, позволяют связать время этапа сжатия с периодом кристаллизации интрузивных тел основных пород. Изотопное датирование U-Pb методом габброидов мыса Туксен дает возраст  $88,1 \pm 1,1$  млн. лет, что соответствует времени кристаллизации габброидов первой фазы Андийского комплекса (Бахмутов и др., 2013). Таким образом, можно сделать вывод, что возраст фазы сжатия может быть проинтерпретирован как поздне меловой.

## 6. Выводы

Определено региональное поле напряжения с СВ ориентировкой оси сжатия и СЗ ориентировкой оси растяжения. Ориентировка оси растяжения вкрест основных рифтогенных структур региона позволяет связать их формирование с деформацией растяжения. Условия для растяжения континентальной литосферы могли появиться в раннем кайнозое в результате отрыва слэба субдуцирующей плиты.

Деформация сжатия проявлена в меньшей степени и связана, в основном, с габброидами. Этап сжатия предшествовал этапу растяжения и, возможно, происходил в период кристаллизации массивов габбро в позднем мелу.

Выявлены аномалии в ориентировке регионального поля напряжений, которые, очевидно, связаны с поворотом сопряженных трещин в зонах разломов и могут служить индикатором последних.

На примере о. Галиндез, где выполнен большой объем измерений, восстановлены локальные поля напряжений и связанные с ними вертикальные перемещения.

Выявлен унаследованный характер разрывных нарушений. Дайки при внедрении использовали более древние системы разрывов, а современные разрывы реализуются по существующим дайкам и контактам различных породных комплексов.

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю благодарность руководству Национального Антарктического научного центра, зимовщикам УАС «Академик Вернадский» за всестороннюю поддержку и помощь при проведении полевых работ.

## Литература

1. **Бахмутов В. Г.**, Гладкочуб Д. П., Шпира В. В. Возрастная позиция, геодинамическая специфика и палеомагнетизм интрузивных комплексов западного побережья Антарктического полуострова Геофиз. Журнал – 2013. – 3(35). – С. 3 – 30.
2. **Бахмутов В. Г.**, Егорова Т. П. Тектонические структуры Западной Антарктики и их отражение в потенциальных геофизических полях: обзор // Геофизический журнал, – 2009. Т. 31, № 1. — С.100 – 120.
3. **Гинтов О. Б.**, Муровская А. В., Мычак С. В. Полевая тектонофизика в решении проблем геодинамического развития территории Украины // Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – 4(5). – С. 281 – 299.
4. **Greku R.**, Milinevsky G., Ladanovsky Y. et al. Topographic and Geodetic research by GPS, Echo-sounding and ERS Altimetric, and SAR Interferometric Surveys during Ukrainian Antarctic Expedition in the West Antarctic // Antarctica: Contribution to global earth sciences, ed. Futterer D.K. et al., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. – 2006. – P. 383 – 390.
5. **Jin Y. K.**, Larter R. D., Kim et al. Post-subduction margin structures along Boyd Strait, Antarctic Peninsula // Tectonophysics. – 2002. – 346 (3–4). – P. 187 – 200.
6. **Join** geophysical and petrological models for the lithosphere structure of the Antarctic Peninsula continental margin // Geophys. J. Int. – 2011. – 184. – P. 90 – 110. – doi:111/j.1365–246X.2010.04867.x.