ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
им. Н. А. ШИЛО
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК
(СВКНИИ ДВО РАН)

На правах рукописи

УДК 551.24

КОНДРАТЬЕВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ

Сравнительный анализ тектонических напряжений в структурах позднего мезозоя и кайнозоя в Северном Приохотье

Специальность 25.00.03 —
«Геотектоника и геодинамика»
Диссертация на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук
профессор Владимир Николаевич Смирнов

Магадан — 2019

Оглавление

Введение **4**

1 Основные тектонические структуры Северного Приохотья **9**

1.1 Позднемезозойские орогенные складчатые структуры 11

1.2 Вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги . . . 12

1.3 Хасынское звено Охотско-Чукотского вулканогенного пояса . . . 12

1.4 Кайнозойские впадины 13

1.5 Неотектоническая структура 14

2 Методы исследования **19**

2.1 Основные понятия тектонофизики 19

2.2 Основные методы анализа тектонической трещиноватости 22

2.2.1 Метод анализа трещин М. В. Гзовского 22

2.2.2 Кинематический метод О. И. Гущенко 24

2.2.3 Статистический метод П. Н. Николаева 26

2.2.4 Метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) 28

2.2.5 Комплексный метод анализа тектонической трещиноватости К. Ж. Семинского 30

2.2.6 Определение общего поля напряжений по данным локальных стресс-состояний методом Л. А. Сим 31

2.3 Новые методические разработки, сделанные в ходе подготовки диссертации 32

2.3.1 Дополнительный статистический критерий оценки достоверности выбора сопряженных плоскостей 33

2.3.2 Программа Pyfrct 39

2.3.3 Цифровой геологический компас 41

3 Результаты изучения тектонической трещиноватости на опорных участках 50

3.1 Мезозойские складчатые структуры 53

3.1.1 Участок «Хета» 54

3.1.2 Участок «Армань» 57

3.1.3 Участок «Магадавен» 59

3.2 Вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги . . . 64

3.2.1 Участок «Хасын» 64

3.2.2 «Участок Ойра» 66

3.2.3 Участок «Магадан-1» 68

3.3 Вулканоструктуры ОЧВП 74

3.3.1 Участок «Дондычан» 74

3.3.2 Участок «Колхида» 76

3.3.3 Участок «Нелькандж а» 78

3.3.4 Участок «Ола» 81

3.3.5 Участок «Карамкен» 85

3.4 Кайнозойские впадины 90

3.4.1 Участок «Магадан-2» 90

4 Особенности напряженного состояния в разных тектонических структурах Северного Приохотья 94

4.1 Геодинамические типы напряженных состояний Северного Приохотья 94

4.2 Зоны влияния активных разломов 98

4.3 Напряжённые состояния, соответствующие главным тектоническим структурам Северного Приохотья 101

4.4 Анализ сочетания типов напряжений 103

Заключение 109

Список иллюстраций 111

Список таблиц 117

Список литературы 118

Введение

Актуальность темы Территория Северного Приохотья расположена в области динамического взаимодействия Евразийской и Северо-Американской литосферных плит и Охотской микроплиты, выделяемых на основе современных сейсмических данных. Она имеет сложное геологическое строение, обусловленное развитием в течение мезозоя и кайнозоя разнообразных тектонических структур: складчатых, вулканогенных, плутонических, новейших орогенных поднятий и впадин.

Несмотря на достаточно подробную геологическую изученность Северного Приохотья, вопросы развития тектонических деформаций в разновозрастных структурах мезозоя и кайнозоя изучены очень слабо. Территория Северного Приохотья находится в пределах юго-восточного фланга сейсмического пояса Черского, однако поле тектонических напряжений практически не исследовано. Это обусловлено преобладающим низким энергетическим классом происходящих здесь землетрясений, а также редкой сетью сейсмостанций, не позволяющей получать достоверные данные для анализа механизмов очагов слабых землетрясений. Вместе с тем актуальность заявленной проблемы высокая. Она определяется в первую очередь тем обстоятельством, что на рассматриваемой территории расположено большинство населенных пунктов Магаданской области и сосредоточена бóльшая часть производственной, энергетической и транспортной инфраструктуры, что требует надежных обоснований сейсмической опасности этого региона. Кроме того, исследования напряженного состояния земной коры имеют важное теоретическое значение при разработке геологических критериев сейсмичности и прогнозировании зон возникновения очагов сильных землетрясений.

На рассматриваемой территории выявлены разнообразные рудные месторождения золота, серебра, олова и других металлов. В связи с этим актуальной является задача изучения структуры рудных полей и месторождений региона

в целях оптимизации поисков и разведки рудных тел на основании данных о полях тектонических напряжений.

Цель диссертационной работы: определение и анализ тектонических напряжений в разнородных и разновозрастных структурах, возникших на разных этапах тектонической эволюции территории Северного Приохотья.

Задачи исследования

1. Изучение тектонической трещиноватости, зеркал скольжения, разрывных нарушений и других дислокационных элементов на опорных участках мезозойских и кайнозойских тектонических структур Северного Приохотья.
2. Восстановление локальных стресс-состояний на каждом изученном участке на основе парагенетического анализа тектонической трещиноватости и разрывных структур более высокого ранга.
3. Определение региональных тектонических напряженых состояний, характерных для выделенных этапов развития Северного Приохотья.

Личный вклад Основу диссертационной работы составили данные личных полевых наблюдений, собранные автором в 2006–2016 гг. на территории Северного Приохотья. Материалы представлены документацией естественных обнажений, замерами тектонической трещиноватости, элементами залегания и кинематики разрывных и складчатых структур. При осуществлении массовых замеров элементов залегания трещин использовалась авторская разработка — цифровой геологический компас, позволяющий с высокой скоростью и большой точностью производить указанные измерения.

Обработка и анализ данных осуществлялись автором лично. Постановка задач формулировалась при совместных обсуждениях с проф. д. г. н. В. Н. Смирновым.

Защищаемые положения

1. Для складчатых структур Армано-Вилигинского синклинория характерны четко выраженные напряженные состояния типа горизонтальный

сдвиг с осью сжатия в субширотном направлении (аз. 67, угол 12) и растяжения в субмеридиональном направлении (аз. 161, угол 19).

2. Структурам Удско-Мургальской дуги свойственны напряженные состояния типа горизонтальное растяжение со сдвигом с осью сжатия в северо-восточном направлении (аз. 259, угол 29) и осью растяжения — в северо-западном (аз. 152, угол 26).

3. Вулканоструктуры Хасынского звена ОЧВП характеризуются изменчивыми напряженными состояниями с вариациями геодинамического типа от преобладающего горизонтального растяжения до горизонтального сдвига.

4. Для кайнозойских впадин миоцен-плиоценового возраста характерны напряженные состояния типа горизонтальный сдвиг с осью сжатия в северо-восточном направлении (аз. 214, угол. 29) и осью растяжения в северо-западном направлении (аз. 121, угол. 04).

5. Характер напряжённого состояния на территории Северного Приохотья связан с разновозрастными тектоническими структурами и в первую очередь определяется именно ими.

Научная новизна. Впервые для территории Северного Приохотья получен обширный материал по характеру тектонической трещиноватости, исследованной в естественных обнажениях различных тектонических зон. На основании проведенных работ восстановлены геодинамические обстановки деформирования геологических структур мезозойского и кайнозойского возраста.

Анализ собранных данных позволил с помощью геолого-структурных исследований выявить особенности формирования трещинной сети, полей тектонических напряжений в терригенных породах позднеюрско-раннемелового возраста складчатых структур Армано-Вилигинского синклинория (АВС), позднеюрско-раннемеловых осадочных и вулканических породах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской вуканической дуги (УМД), в верхнемеловых вулканитах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) и в миоцен-плиоценовых континентальных осадках неотектонических впадин.

Разработан дополнительный статистический критерий χ^2, который повышает надежность выделения сопряженных трещин и установлено его пороговое значение для территории Северного Приохотья ($\chi^2 > 100$).

Теоретическая и практическая значимость работы Информация о современном поле напряжений имеет важное значение в связи с оценкой сейсмической опасности территории Магаданской области.

Анализ тектонической трещиноватости имеет практическое значение при изучении структуры рудных полей и месторождений.

Разработанное в рамках работы над диссертацией устройство «Цифровой геологический компас» может быть использовано для выполнения разнообразных работ по изучению геологических структур.

Апробация работы Результаты исследований докладывались и обсуждались на: Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2009 г.); научном симпозиуме «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири» (г. Хабаровск, 2010 г.); Молодежной школе-семинаре «Современная тектонофизика. Методы и результаты» (г. Москва, 2011, 2015 г.); Всероссийской тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (г. Москва, 2012 г.); Секции тектонофизики Научного Совета по Проблемам Тектоники и Геодинамики при ОНЗ РАН (г. Москва, 2018 г.); 50-м Тектоническом совещании (г. Москва, 2018 г.); Всероссийской конференции «Чтения памяти академика К. В. Симакова» (2007, 2009, 2013 г.); Межрегиональной молодежной конференции «Научная молодежь — Северо-Востоку России» (2007, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 г.), а также на ряде семинаров СВКНИИ ДВО РАН.

Количество опубликованных автором или при его участии научных работ — 30, из них по теме диссертации — 15 (в том числе 6 статей в изданиях из списка ВАК).

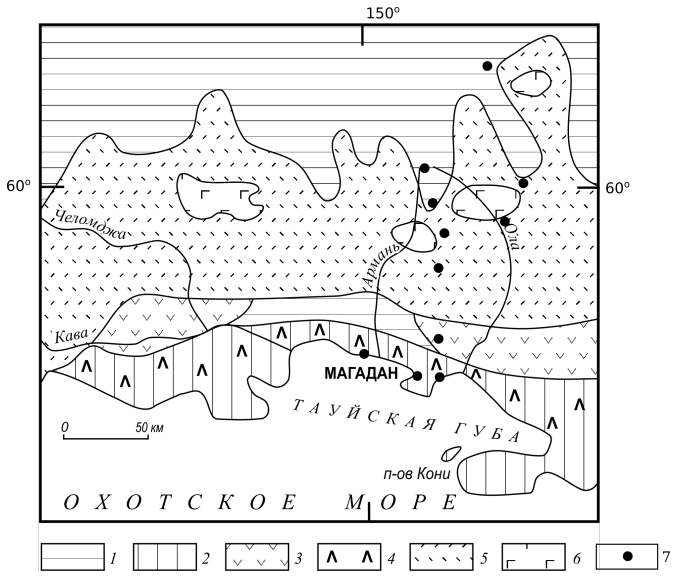
Объем и структура работы. Диссертация общим объемом 127 страниц состоит из 4 глав, введения, заключения, иллюстрирована 56 рисунками и 11 таблицами. Список литературы включает 87 наименований. Работа выполне-

на в лаборатории геологии кайнозоя и палеомагнетизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д. г. н. В. Н. Смирнову за постановку темы, советы и консультации, совместные полевые и камеральные работы, С. Д. Шведову, П. П. Колегову и к. г.-м. н. О. Ю. Глушковой за совместно проведенные полевые работы и лабораторные исследования. Особую благодарность автор адресует д. г.-м. н. В. В. Акинину, чл.-корр. Н. А. Горячеву, д. г.-м. н. И. Л. Жулановой, д. ф.-м. н. Ю. Л. Ребецкому, д. г.-м. н. Л. А. Сим, к. г.-м. н. Т. Ю. Тверитиновой, д. г.-м. н. В. Г. Трифонову, д. г.-м. н. Н. Б. Кузнецову за обсуждение работы и консультации.

Глава 1. Основные тектонические структуры Северного Приохотья

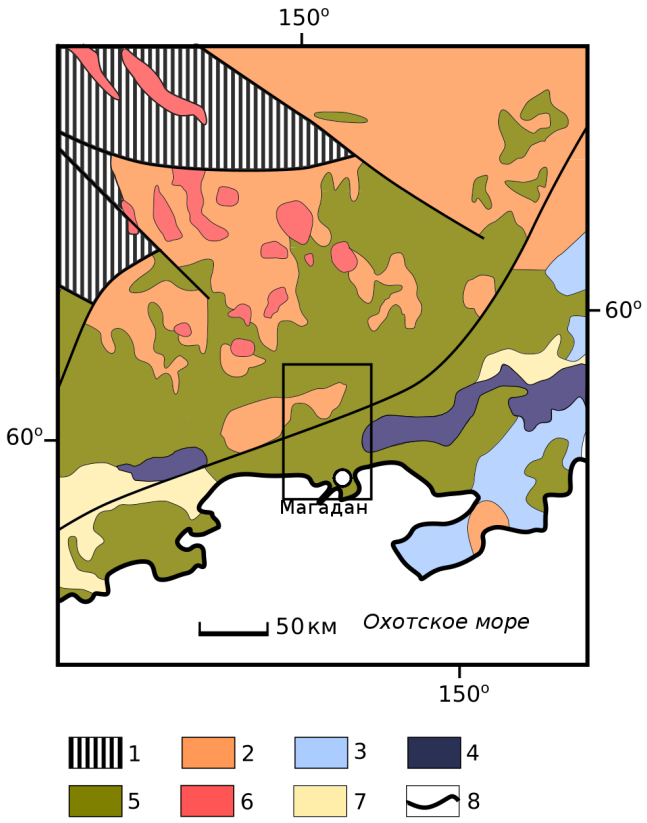
В Северном Приохотье выделяются четыре структурных яруса, в разной степени распространенные на территории региона (см. рисунок 1.1): 1) позднеюрско-раннемеловые орогенные складчатые структуры Яно-Колымской и Кони-Тайгоносской систем; 2) окраинно-континентальные позднеюрско-раннемеловые осадочные и вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги; 3) меловые вулкано-тектонические структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса; 4) кайнозойские межгорные впадины [Корольков и др., 1992; Котляр, Русакова, 2004 и др.].



1 — складчатые структуры Яно-Колымской системы; 2 — складчатые структуры Кони-Тайгоносской системы; 3 — континентальные вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги; 4 — Удско-Мургальский пояс; 5 — вулкано-тектонические структуры ОЧВП; 6 — Хакаринско-Энмываамская цепь позднемелового континентального вулканизма; 7 — изученные участки.

Рисунок 1.1 Тектонические структуры Северного Приохотья. По [Котляр, Русакова, 2004]:

В геодинамической интерпретации позднемезозойской структуры региона выделяются (см. рисунок 1.2): Вилигинский террейн (фрагмент позднепермского-юрского задугового бассейна); Кони-Тайгоносский террейн (фрагмент позднепалеозойско-раннемезозойской островной дуги); Удско-Мургальская островодужная истема (юра-ранний мел); Охотско-Чукотский надсубдукционный вулканогенный пояс мелового возраста; позднеюрско-меловые коллизионные гранитоиды [Геодинамика, магматизм ..., 2006].



1 — Верхоянская пассивная окраина (палеозой - ранний мел); 2 — Вилигинский террейн (фрагмент позднепермского триасового и юрского задугового бассейна); 3 — Кони-Тайгоносский террейн (фрагмент позднемезозойской-раннемезозойской островной дуги); 4 — Удско-Мургальская островодужная система (юра - ранний мел) 5 — надсубдукционный вулканический пояс мелового возраста; 6 — позднеюрские-меловые коллизионные гранитоиды; 7 — кайнозоские осадочные бассейны; 8 — разломы. Рамкой выделено положение изученной территории.

Рисунок 1.2 Фрагмент тектонической карты Дальнего востока России. По [Геодинамика..., 2006] с дополнениями:

1.1 Позднемезозойские орогенные складчатые структуры

Позднемезозойские складчатые структуры, принадлежащие Кони-Пьягинскому звену Кони-Тайгоносской складчатой системы и юго-восточному флангу Яно-Колымской системы, разделены Челомджа-Ямским глубинным разломом. Эти складчатые системы имеют примерно одинаковый возраст, но вещественный и фациальный состав их существенно различаются:

Юго-восточный фланг Яно-Колымской складчатой системы сложен непрерывно залегающими терригенно-осадочными отложениями, имеющими возраст от перми до верхней юры. Отложения представлены преимущественно алевролитами с появлением в верхнем триасе и нижней юре горизонтов песчаников и туфопесчаников. Одним из структурных свойств Яно-Колымской складчатой системы является ее преимущественно северо-западная ориентировка в отличие от субширотной ориентировки Кони-Тайгоносской системы.

На изученной территории выделяется Армано-Вилигинский синклинорий, сложенный терригенными отложениями юрского возраста, смятыми в линейные и брахиморфные складки, нарушенные сбросо-сдвигами субширотного и северо-восточного простирания [Кузнецов, 2007]. Перемещение масс пород во время складкообразования, судя по конфигурации складок, происходило в южном или юго-западном направлении.

Кони-Пьягинское звено Кони-Тайгоносской складчатой системы, согласно [Умитбаев, 1986], сложено терригенно-вулканогенной толщей позднетриасового - юрского возраста, в которой отмечается обилие лавовых разностей базальтового и андези-базальтового состава. В верхней части присутствуют вулканогенно-осадочные толщи позднеюрско-раннемелового возраста, в составе которых принимают участие покровы и слои измененных андезитов, базальтов и их туфов и игнимбритов, а также углисто-глинистых сланцев и каменных углей. Формирование складчатой структуры завершилось в орогенную стадию развития в конце баррема — апте. В этой системе, так же как и в Яно-Колымских мезозоидах, в орогенных прогибах вдоль разломов в апте и альбе накапливались континентальные осадки, образовались каменные угли, а также проявился средний и кислый вулканизм [Корольков, 1992].

1.2 Вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги

Вдоль южного, прибрежного края Северного Приохотья прослеживается линейная структура Удско-Мургальской вулканической дуги, которая сложена известково-щелочными вулканитами берриас-валанжинского возраста [Котляр, Русакова, 2004; Русакова, 2009] и комплексом терригенных формаций. Обособленный комплекс терригенно-вулканогенных формаций с несогласием перекрывает структуры Яно-Колымской и Кони-Тайгоносской систем. Тектоническая специфичность и история геологического развития позволяют отнести эти образования к структурам Удско-Мургальского окраинно-континентального пояса [Горячев, 2005].

На описываемой территории отложения пояса представлены несогласно залегающими на складчатом основании верхнеюрско-нижнемеловыми образованиями момолтыкичской свиты, кирикской и нанкалинской толщами, сложенными андезитами, андезибазальтами, базальтами и их туфами, туфоконгломератами, туфопесчаниками с прослоями пластов каменного угля на отдельных горизонтах [Аноров и др., 2001]. Описываемый фрагмент Удско-Мургальской дуги в диссертации назван Хасыно-Момолтыкичской зоной. Сюда также относится и крупный Магаданский гранитодный массив, хотя время становления его сложной структуры выходит за рамки формирования верхнеюрско-нижнемелового комплекса терригенно-вулканогенных формаций.

1.3 Хасынское звено Охотско-Чукотского вулканогенного пояса

Вулканические образования Хасынского звена ОЧВП простираются в широтном направлении на большом расстоянии в виде полосы шириной до 150 километров и залегают на структурах Яно-Колымской и Кони-Тайгоносской мезозойских складчатых систем и вулкано-тектонических комплексах Удско-Мургальской дуги. Вулканиты пояса накапливались в интервале времени от среднего альба до середины кампана [Акинин, 2012].

Типичный стратиграфически полный разрез вулканитов ОЧВП наблюдается в Арманской вулканоструктуре на правобережье р. Хаканджа [Акинин и Миллер, 2011]. По данным указанных авторов в основании разреза залегают вулканогенно-осадочные породы (туфы песчаников, туфы алевролитов и туфы конгломератов) арманской свиты, которые фациально замещаются пропилитизированными лавами, брекчиями и туфами андезитов нараулийской толщи. Их видимая мощность более 100 м. Нараулийская толща перекрывается пропилитизированными кислыми туфами и лавами хольчанской свиты мощностью около 50 м. Вверх по разрезу они замещаются двупироксеновыми андезитами улынской свиты мощностью около 50 м. Выше залегают кислые игнибриты ольской свиты. Завершают разрез оливин-плагиоклазовые базальты мыгдыкитской свиты мощностью около 300 м, образующие полого наклоненное (10–15°) плато.

Вулканиты ОЧВП образуют разнообразные структуры: стратовулканы, кальдеры оседания и взрывные купольные структуры, а также субвулканические интрузии и дайки. Среди них часты структуры центрального типа, обладающие радиально-концентрической системой разломов. Базальтовые покровы мыгдыкитской свиты образуют обширные плато. Для всех вулканоструктур характерна закономерная приуроченность к магмоподводящим разломам субширотного, северо-восточного и субмеридионального простирания.

1.4 Кайнозойские впадины

Вдоль прибрежной зоны располагается Тауйско-Ямская система межгорных впадин, которые представляют собой широтно ориентированные грабены с амплитудами погружения по сбросам от нескольких сотен метров до 2 км и более. Их размеры в плане варьируют в широких пределах: от нескольких километров в поперечнике (Балахапчинская впадина близ Магадана с неоген-четвертичными осадками мощностью более 600 м) до 150 км в длину и 50 км в ширину (Кава-Тауйская впадина) [Смирнов, 2006].

В составе кайнозойских впадин установлены разнообразные по происхождению и условиям залегания кайнозойские отложения большого возрастного

диапазона — от середины палеогена до голоцена. Палеогеновые и неогеновые осадки изучались в основном с помощью буровых скважин при выполнении поисковых работ на уголь и нефть [Иванов, 1980].

Согласно этим данным, в Кавинско-Тауйской впадине позднеэоценовый возраст имеет вскрытая буровой скважиной вулканогенно-осадочная толща мощностью более 67 м. Отложения представлены переслаивающимися туфами, туфобрекчиями, туфоалевролитами. Выше залегают эоцен-олигоценовые, олигоцен-миоценовые и плиоцен-эоплейстоценовые терригенные отложения общей мощностью до 1700 м.

В Ланковской и Сигланской впадинах также установлены эоцен-олигоценовые отложения, которые представлены песчаными галечниками с прослоями песков, включающих углистый детрит, иногда они содержат слои глин. Мощность достигает 150 м. Ранне-среднемиоценовые нерасчлененные отложения в Сигланской и Ланковской впадинах большей частью представлены переслаиванием углистых глин, песков и пластов бурого угля. Мощность последних варьирует в широких пределах и достигает 40 м. Общая максимальная мощность отложений 430 м.

В Магаданской впадине позднемиоценовый возраст имеет нагаевская толща, сложенная ритмично слоистыми алевролитами, песками с прослоями лигнитов и бурых углей. Мощность до 110 м. Выше залегает слой галечников и конгломератов плиоценового возраста мощностью до 20 м, которые выделены под названием «наднагаевские галечники» [Гриненко и др., 1998].

Поздний миоцен-плиоценовые толщи обнажаются в береговых обрывах бухт Нагаева и Гертнера и оказались доступными в качестве объекта для геолого-структурных исследований.

1.5 Неотектоническая структура

Неотектоническая структура Северного Приохотья сформировалась в плиоцен-четвертичное время в результате мощных орогенических движений, охвативших всю территорию Северо-Востока России [Смирнов, 2013]. В течение

новейшего периода преобладали дифференцированные вертикальные поднятия амплитудой до 2000 м. В поднятия были втянуты и кайнозойские впадины, в то же время в некоторых случаях возникали небольшие новообразованные (наложенные) межгорные впадины четвертичного возраста.

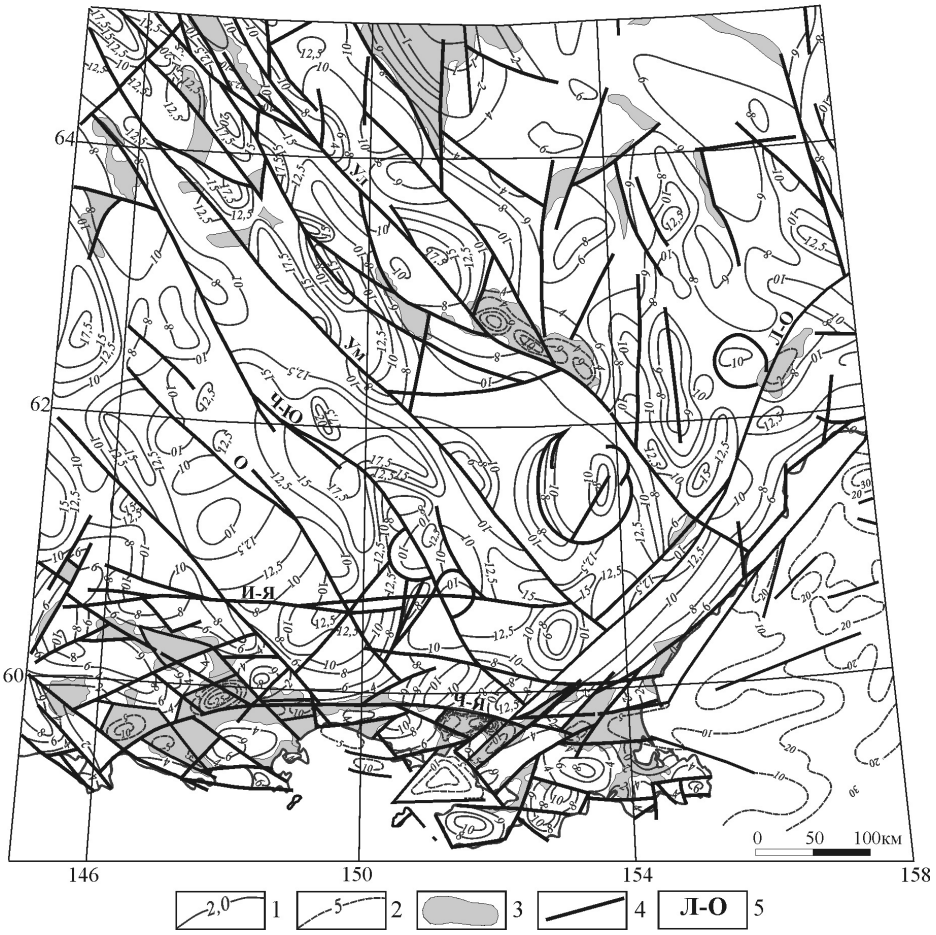
Северное Приохотье находится в области сочленения двух крупнейших тектонических структур: Яно-Колымской и Кони-Тайгоносской мезозойских складчатых систем и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Кроме того, на этой территории расположена зона динамического взаимодействия Евразийской и Северо-Американской литосферных плит и Охотской микроплиты [Hindle et al., 2006; Сурков, 2003; Сурков, 2007], которая маркируется здесь юго-восточным флангом сейсмического пояса Черского.

Основные черты неотектонической структуры показаны на представленном рисунке 1.3, где изображен фрагмент Карты новейшей тектоники Северной Евразии м-ба 1 : 5 000 000 [Грачев, 1997; Калинина, Смирнов, 2013]. На нем показана неотектоническая блоковая структура территории, обусловленная сетью крупных разноориентированных разломов. Дифференцированный характер движений отражен в изолиниях их суммарных амплитуд. В неотектонической структуре юго-восточного фланга СПЧ отчетливо выделяются три района с разной преобладающей ориентировкой неотектонических структур: северо-западной, субширотной и северо-восточной. Характерной особенностью новейших движений является изменчивость значений относительных амплитуд смежных блоков вдоль простирания разломов. При этом изменяются не только амплитуды, но и положение относительно разлома поднимающихся и сброшенных блоков [Калинина, Смирнов, 2016].

Главную роль в неотектонической структуре региона играют крупные зоны разломов северо-западного, северо-восточного и субширотного простираний. При этом они обнаруживают различное соотношение с тектоническими структурами: северо-западные (Улахан, Дарпир, Умарский, Чай-Юрьинский, Омчакский) наследуют мезозойские тектонические швы Яно-Колымской складчатой системы; северо-восточные (Ланково-Омолонский и др.) и субширотные (Челомджа-Ямский, Иня-Ямский) согласованы с магмоконтролирующими разломами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и наложены на складчатые структуры основания пояса. Установлено, что с указанными зонами разломов

связаны различные проявления новейшей и современной тектонической активности, в том числе сейсмической, выраженной во множестве землетрясений, зарегистрированных сейсмостанциями, и в большом количестве палеосейсмодислокаций, включая очень крупные [Смирнов, 1995, 2000; Имаев, 2000; Fujita, et al. 2009].

Наиболее важную роль в неотектонической структуре и геодинамике Северного Приохотья играют следующие разломы.



1 — тектоизогипсы (в сотнях метров); 2 — изопахиты (в сотнях метров); 3 — межгорные впадины; 4 — разрывные нарушения. 5 — главные активные разломы: Ул — Улахан, Ум — Умарский, Ч-Ю — Чай-Юрьинский, О — Омчакский, И-Я — Иня-Ямский, Ч-Я — Челомджа-Ямский, Л-О — Ланково-Омолонский.

Рисунок 1.3 Неотектоническая структура и главные активные разломы в Охотско-Колымском регионе (по [Смирнов, 1995, 2000; Калинина, Смирнов, 2017]):

Разлом Улахан северо-западного простирания — крупнейший на территории всего Охотско-Колымского региона. Он трассируется на расстояние около 1000 км от р. Индигирка на северо-западе до Охотского побережья — на юго-востоке. Им маркируется край зоны высокой сейсмичности и деформаций и, по мнению многих авторов, он является морфологически выраженной границей Северо-Американской и Евразийской плит. Разлом Улахан возник в конце перми или начале триаса и возрожден в новейшее время [Симаков, 1949]. Б. С. Мальков показал левосторонние смещения по разлому в кайнозое, достигающие 40 км, и вертикальные — 400–500 м [Мальков, 1971]. К разлому приурочено несколько очагов сильных землетрясений магнитудой до 5,4 и большое количество палеосейсмодислокаций. Наиболее известна Тирехтяхская крупная завальная плотина, расположенная вблизи Момской рифтовой впадины [Смирнов, 2000].

Челомджа-Ямский разлом (зона разломов) субширотного простирания протягивается вдоль северного побережья Охотского моря. Выделен по хорошо заметной ступени в гравитационном поле [Ващилов, 1963]. Разлом протягивается от пос. Охотск до зал. Шелихова и разграничивает Яно-Колымкую и Кони-Тайгоноскую мезозойские складчатые системы. Он активизирован в кайнозое, к нему приурочена Тауйско-Ямская система межгорных впадин эоцен-миоценового возраста [Юдин и др., 1966; Вознесенский и др., 1969].

Ланково-Омолонский разлом северо-восточного простирания, выделенный В. Н. Смирновым [1996], протягивается на 700 км вдоль побережья Охотского моря параллельно берегу от Тауйской губы до верхнего течения р. Омолон. В юго-западной части он под острым углом срезает структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Разлом возник, предположительно, в палеогене как правосторонний сдвиг. Конфигурация оперяющих трещин свидетельствует о том, что при формировании разлома имели место геодинамические условия сжатия северо-восточной ориентировки [Смирнов, 2000]. В бассейне рр. Вилига и Кананыга к разлому приурочены проявления щелочно-базальтового вулканизма средне-позднемиоценового возраста (10,7–13,2 млн лет) [Ичетовкин и др., 1970; Ичетовкин, 1978; Акинин и Апт, 1997]. На юго-западном фланге разлома, на междуречье Сиглана и Ямы, определён очаг 8–9-бального Ямского землетрясения 1851 г. с магнитудой 6,5 [Кондорская и Шебалин, 1977].

В истории формирования тектонической структуры Северного Приохотья выделяются несколько этапов геодинамического развития территории.

Первый этап позднеюрско-раннемеловой — проявлен в двух смежных зонах разделенных субширотным тектоническим швом. В северной зоне было образование брахиформной складчатости Армано-Вилигинского синклинория и связанной с нею сети соскладчатых разломов и кливажных структур. В это время были активизированы крупные разломы северо-западного простирания (Умарский, Малтанский и др.), разделяющие основные структурные элементы юго-восточного фланга Яно-Колымской складчатой системы.

К позднеюрско-раннемеловому этапу также относится развитие в южной части субширотного Удско-Мургальского островодужного вулканического пояса, формирование континентальных вулкано-тектонических структур и осадочного чехла межгорных впадин (момолтыкичская свита). Возможно, к концу этого этапа относится становление интрузий охотского типа, в том числе раннемелового магаданского массива.

Следующий (второй) этап — альб-сеноман-кампанский знаменует резкую смену геодинамической обстановки: начались мощные тектоно-магматические процессы, обусловившие формирование структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Они сопровождались активизацией крупных магмоподводящих разломов северо-восточного, субмеридионального и широтного простираний.

Кайнозойский этап развития структуры Северного Приохотья связан с активизацией разломов субширотного и северо-восточного простирания с формированием крупных межгорных впадин в южной и восточной частях региона.

В течение последнего, плиоцен-четвертичного этапа преобладали дифференцированные вертикальные поднятия, в которые были втянуты и кайнозойские впадины. В некоторых случаях возникали небольшие новообразованные межгорные впадины четвертичного возраста.

Таким образом, рассматриваемая территория в позднем мезозое и кайнозое пережила по времени четыре этпапа тектонических деформаций, первый из которых был расположен в двух разных зонах. Следы этих этапов должны быть запечатлены в тектонической трещиноватости горных пород.

Глава 2. Методы исследования

Основным фактологическим материалом при выполнении работы служили данные о массовых замерах тектонической трещиноватости. В каждом пункте наблюдений набиралось не менее 100 замеров. При проведении измерений в журнал заносились данные о структурных взаимоотношениях разных групп трещиноватости. Особое внимание уделялось трещинам со следами движения на плоскости: зеркала и борозды скольжения и пр. Последние подвергались отдельным замерам и тщательному морфологическому изучению.

2.1 Основные понятия тектонофизики

Напряжение — это сила воздействующие на единицу площади. Напряжение перпендикулярное выбранной площадке называется *нормальным*, и напряжение действующее параллельно площадке называются *касательными*. Среднее арифметическое нормальных напряжений — это *давление*. В трёхмерном пространстве напряжения действующие на объем полностью описываются девятью величинами, которые вместе составляют тензор напряжений (рисунок 2.1) — три вектора нормальных напряжений (σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}) и шесть векторов касательных напряжений (σ_{xy}, σ_{xz}, σ_{yz}, σ_{yx}, σ_{zx}, σ_{zy},).

Ортогональную систему координат всегда можно выбрать таким образом чтобы касательные напряжения тензора были равны нулю, и, в таком случае, нормальные напряжения на площадках перпендикулярных этим осям будут называться *главными напряжениями*, и обозначаться как σ_1, σ_2, σ_3, так что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Напряженное состояние, при котором $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, называется изотропным, соответствующему *гидростатическому давлению*. *Литостатическое дав-*

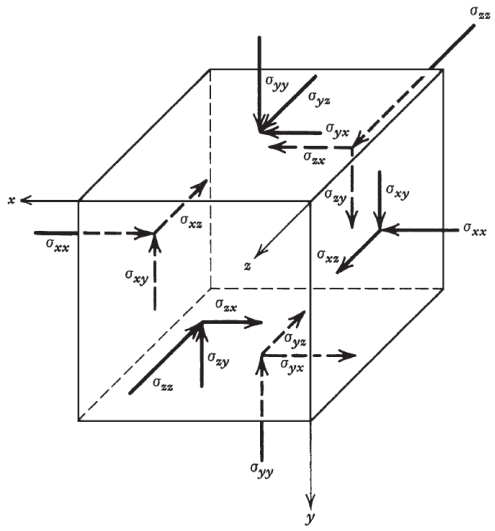


Рисунок 2.1 Компоненты тензора напряжений на гранях прямоугольного параллелепипеда. По [Turcotte and G., 2014]

ление — состояние эквивалентное гидростатическому давлению, при котором величины напряжений возрастают пропорционально глубине и весу вышележащих пород. Как правило, при изучении напряженных состояний массивов горных пород, главные напряжения не равны между собой, и тогда напряженное состояние удобно представлять в виде суммы изотропных напряжений и девиаторных напряжений:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{2.1}$$

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - p \end{vmatrix} \tag{2.2}$$

Для характеристики напряженного состояния так же используется коэффициент Лоде - Надаи, который характеризует вид тензора напряжений, а именно, соотношение главных значений тензора напряжений:

$$\mu_\sigma = 2\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \tag{2.3}$$

Коэффициент Лоде-Надаи может принимать значения от -1 (при одноосном растяжении) до +1 (при одноосном сжатии). Значение $\mu_\sigma = 0$ соответствует сдвигу.

Различают три основных геодинамических типа напряженного состояни: горизонтального сжатия, горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. В дополнение к ним, на практике удобно выделять еще три промежуточных типа (рисунок 2.2): горизонтальное растяжение со сдвигом, горизонтальное сжатие со сдвигом и вертикальный сдвиг.

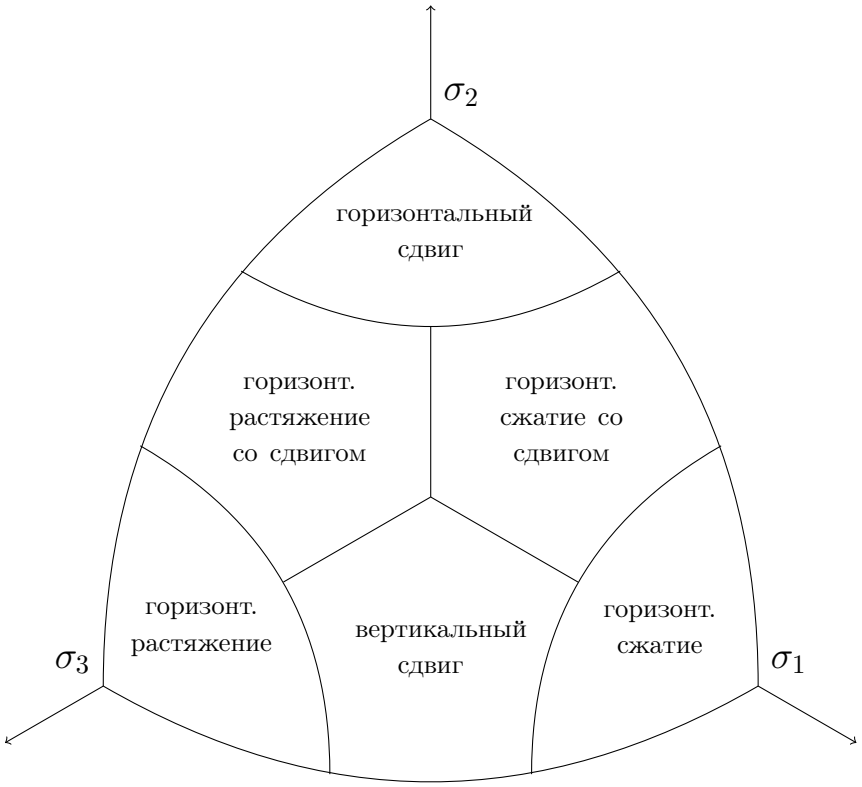


Рисунок 2.2 Геодинамический тип напряженного состояния в зависимости от попадания оси на зенит в одну из областей на поверхности октанта, построенного на осях главных напряжений. По [Ребецкий и др., 2017а].

2.2 Основные методы анализа тектонической трещиноватости

При анализе собранного материала применялись хорошо разработанные к настоящему моменту следующие структурно-геологические методы анализа тектонической трещиноватости.

2.2.1 Метод анализа трещин М. В. Гзовского

Суть метода заключается в анализе сопряженных пар сколов, совпадающих с некоторой точностью с направлением действия максимальных касательных напряжений, однозначно связанных с главными напряжениями в результате действия одного поля тектонических напряжений. При реконструкции используются сопряженные пары сколовых разрывов. К сопряженным относятся одновозрастные трещины, возникшие в результате действия одного поля тектонических напряжений. Сопряженность трещин устанавливается непосредственно в поле по их слиянию, взаимному пересечению, противоположности направлений смещения, постоянству угла между ними, аналогичному и одновозрастному минеральному заполнению. Линия пересечения двух сопряженных плоскостей скалывания совпадает с направлением действия промежуточного вектора напряжений. Ось алгебраически минимальных главных нормальных напряжений совпадает с направлением биссектрисы острого угла между ними. Ось алгебраически максимальных главных напряжений совпадает с направлением биссектрисы тупого угла (см. рисунок 2.3).

После того как доказана сопряженность трещин, дальнейшая реконструкция проводится по стереографической сетке Вульфа.

Одним из главных достоинств метода является его относительная простота и оперативность при получении сведений о напряженном состоянии. Вместе с тем практическое использование этого метода имеет ряд трудностей, часто не позволяющих решать вопросы реконструкции полей напряжений. Главная трудность состоит в том, что достоверно установить сопряженные пары сколов

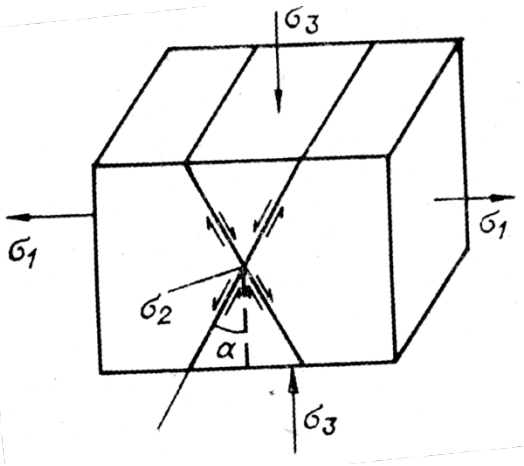


Рисунок 2.3 Принципиальная схема расположения разрывов по отношению к осям напряжений (по [Гзовский, 1975])

можно только в поле. Критерии сопряженности сколов, перечисленные выше, неоднозначны.

Как показывает практика, из всей совокупности критериев определения сопряженности разрывов наиболее существенными оказываются два признака (см. рисунок 2.4):

- перпендикулярность штрихов скольжения к линии пересечения трещины;

- противоположность направлений смещений по ним.

Определение направления смещений по трещинам устанавливается по смещению маркеров (слоёв, геологических границ и т. д.). Кроме этого, широко используется и правило Гофера, согласно которому крыло разрыва смещается вдоль штрихов в направлении наименьшей шероховатости. .

В результате детального изучения поверхностей зеркал скольжения выделили два типа ступеней — аккреционные и коренные. Аккреционные могут состоять из плотно спрессованной глины трения, прижатой к зеркалу скольжения, или часто бывают сложены кальцитом или кварцем. Коренная ступень врезана в породу и составляет с ней одно целое. Аккреционные ступени являются согласными смещению по разрыву. Уступы коренных ступеней ориентированы в разных направлениях.

Таким образом, если при полевых работах удается наблюдать аккреционные ступени, смещение по разрыву можно определить однозначно.

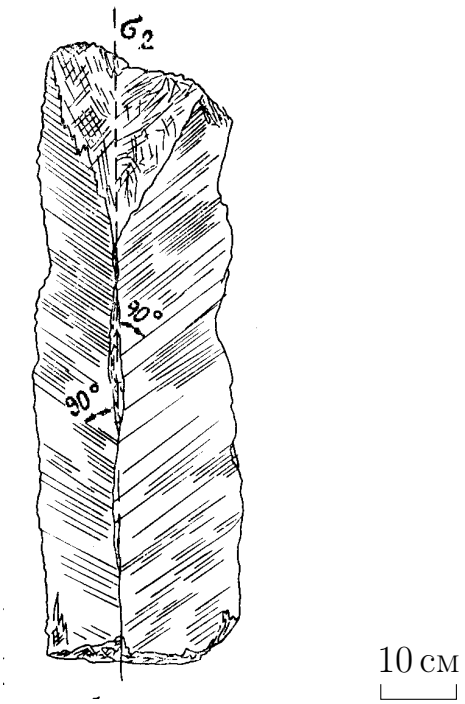


Рисунок 2.4 Ортогональность штрихов скольжения к линии пересечения сопряженных трещин (по [Гзовский, 1975])

Надежно устанавливается знак смещения по треугольникам выкрашивания на зеркалах скольжения.

2.2.2 Кинематический метод О. И. Гущенко

В основу метода положена зависимость между ориентацией главных осей напряжений, направлением смещения по трещине и компонентами тензора напряжений, вызывающих это смещение (См. рисунок 2.5).

Анализируя направления сдвиговых перемещений по плоскостям, мы реконструируем направление векторов главных нормальных напряжений.

При проведении полевых работ делаются замеры ориентации трещин, штрихов и борозд скольжения. В соответствии с ориентировкой вектора сдвигового смещения для каждой подвижки выделяются квадранты сжатия и растяжения. Вектор сдвигового смещения ориентирован от квадранта сжатия в сторону квадранта растяжения. Квадранты растяжения являются областями, запретны-

ми для ориентации осей сжатия. В свою очередь, квадранты сжатия являются областями, недопустимыми для ориентации векторов растяжения. Построение сводных диаграмм отдельно для квадрантов сжатия и растяжения для нескольких подвижек позволяет путем их наложения ограничить участки сферы, не перекрывающиеся этими областями.

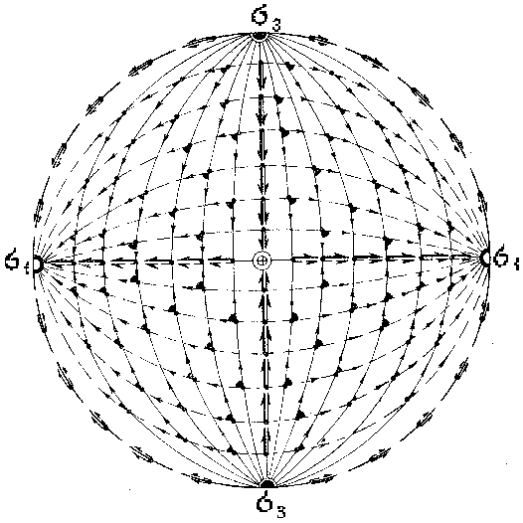


Рисунок 2.5 Стереографическая номограмма направлений τ_n, допустимых для объема, в котором действует поле напряжений с единой ориентацией главных осей [Гущенко, 1979], верхняя полусфера

Достоинством метода является его формализованность до простых графических построений (см. рисунок 2.6). Статистический подход к реконструкции напряжений позволяет различным исследователям получить сопоставимые результаты (при одинаковых исходных данных). Метод также даёт возможность учитывать предельную точность измерений.

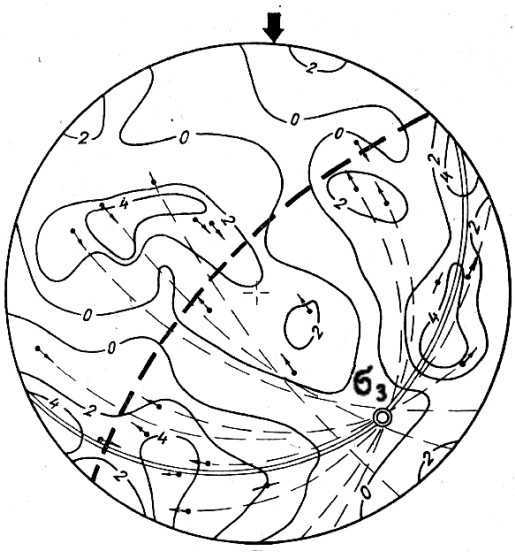


Рисунок 2.6 Кинематическая стереограмма трещинных структур одноосного растяжения [Гущенко, 1979]. Верхняя полусфера

2.2.3 Статистический метод П. Н. Николаева

В работах П. Н. Николаева было замечено, что в направлениях преимущественной ориентировки трещин наблюдается асимметричный разброс. Наличие ярко выраженной асимметрии максимумов трещиноватости свидетельствует о действии какого-то систематического фактора, вызывающего формирование преимущественного разброса в ориентировке трещин.

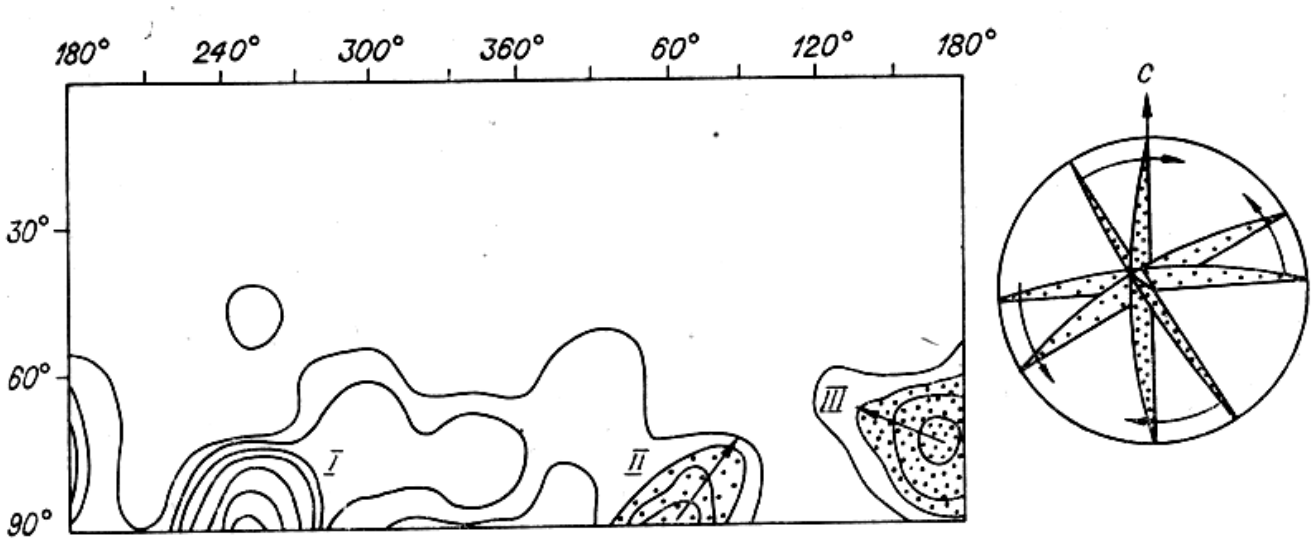
Было предположено, что системы трещин, характеризуемые асимметричным разбросом, являются сопряженными. Полевая проверка подтвердила правильность этого предположения. Практически доказано наличие связи между направлением преимущественного разброса в ориентировке сопряженных трещин скалывания и направлением действия главных нормальных векторов напряжений.

Суть этого явления заключается в следующем. Известно, что процесс длительного трещинообразования даже при неизменной ориентировке приложения внешних сил происходит в обстановке непрерывно изменяющегося поля тектонических напряжений. Каждая вновь возникшая трещина создает дополни-

тельные поля повышенных и пониженных напряжений, изменяя тем самым ситуацию, в которой готовятся и образуются более поздние разрывы.

Изменение поля напряжений ведет к изменению величины касательных напряжений в пределах деформируемого объема, а так как последняя связана с величиной всестороннего давления, то можно считать, что трещинообразование протекает в условиях непрерывно изменяющегося всестороннего давления. С изменением всестороннего давления величина угла скалывания будет меняться в процессе трещинообразования, вызывая тем самым разброс в ориентировке трещин.

С учетом вышеизложенного сопряженность трещин определяется по наличию противоположных разбросов у максимумов, лежащих на дуге большого круга (см. рисунок 2.7).



Матрица-диаграмма трещиноватости и проверка сопряженности

Рисунок 2.7 Выделение сопряженных систем разрывов (По [Николаев, 1977])

2.2.4 Метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА)

Метод катакластического анализа разрывных смещений, разработанный Ю. Л. Ребецким является развитием кинематического метода О. И. Гущенко. Первоначально МКА развивался как метод реконструкции современных напряжений, использующий данные о механизмах очагов землетрясений [Ребецкий, 1997], и позднее был модифицирован для обработки данных о зеркалах скольжения [Ребецкий, 2000]. В МКА смещения по трещинам рассматриваются как квазипластическое течение,

Отличительной особенностью метода является тот факт, что кроме восстановления ориентации главных осей тензора напряжений и его вида, этот метод также позволяет рассчитать нормированный тензор сейсмотектонических деформаций, а также определить нормированне величины эффективного давления и максимального касательного напряжения.

Автором метода была разработанна программа `STRESSgeol` принимающая на вход простой текстовый файл с данными об ориентировках плоскостей зеркал скольжения и направлений смещений по ним. Результатом работы программы является серия диаграмм, иллюстрирующих итерации в работе программы и финальные диаграммы для одного или нескольких этапов деформаций (см. рисунок 2.8), а также текстовый файл содержащий таблицу результатов расчета параметров тензора напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций для каждого этапа [Ребецкий и др., 2017a].

Символами `G1` и `G3` на рисунке 2.8 обозначены полусферы с данными об ориентации осей σ_1 и σ_3 соответственно. На данных полусферах цветом показана сумма квадрантов, допускающих попадание в них выходов главных осей напряжений. На стереограмме ниже показаны выходы установленных ориентаций осей главных нормальных напряжений на нижнюю полусферу (темные цвета красного, желтого и зеленого цветов). На этой же стереограмме присутствуют трещины учавствующие в выделенном этапе, изображенные в виде векторов направления смещения на этих трещинах, построенные в полюсах их нормалей. Бирюзовым цветом отмечены вектора соответствующие трещинам хорошо

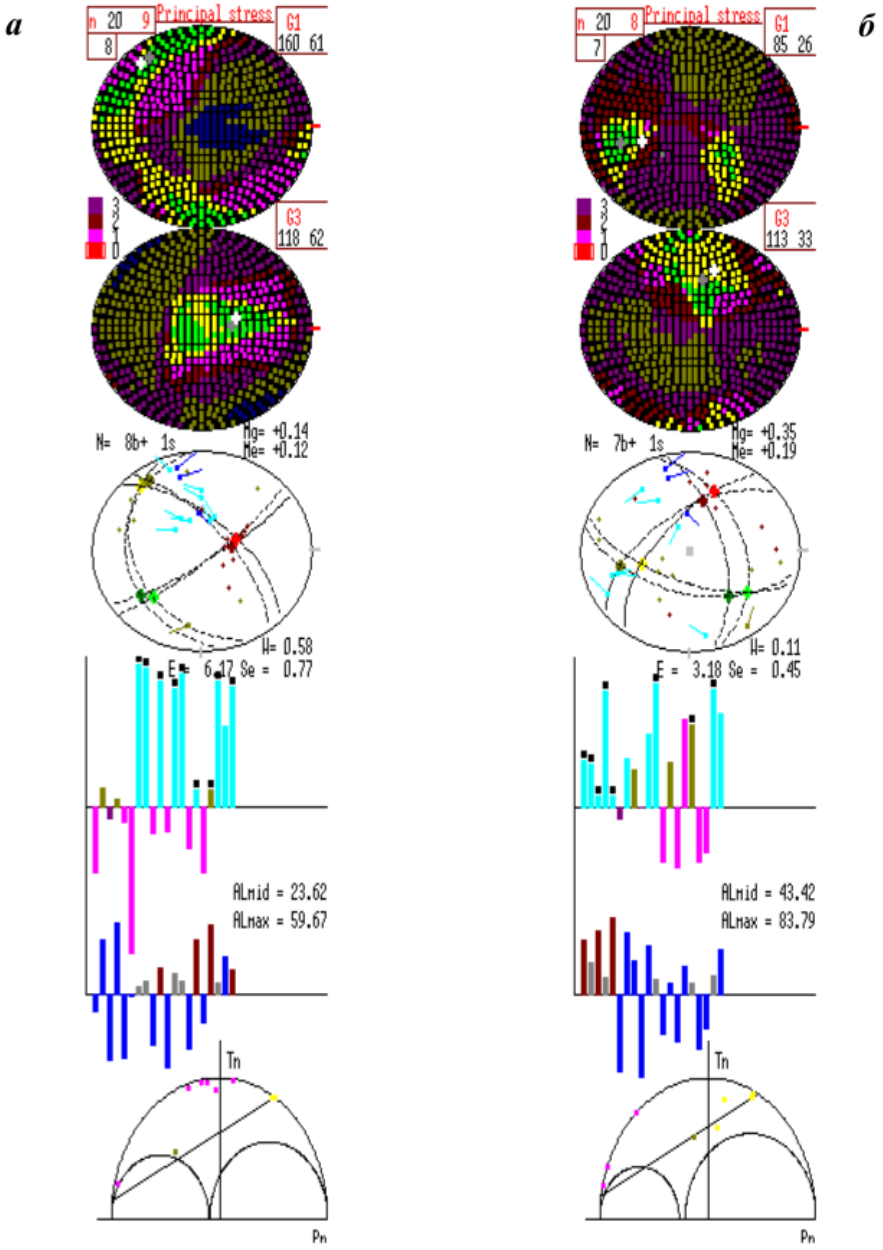


Рисунок 2.8 Результат работы программы STRESSgeol (случай двух этапов напряженного состояния а и б). По [Ребецкий и др., 2017а]. Пояснения в тексте.

удовлетвороящим критериям однородности выборки, темно-желтым цветом отмечены вектора трещин умеренно удовлетворящие критериям однородности, синим цветом отмечены вектора трещин не вошедших в однородную выборку. Под стереограммами расположена редуцированная диаграмма Мора на которой красным цветом отмечены точки, попадающие в полосу хрупкого разрушения. Значение коэффициента Лоде-Надаи показано на рисунке под полусферами с данными об ориентации осей главных нормальных напряжений. Величины

Mg соответстуют тензору напряжений (μ_σ), значения Me соответствуют тензору приращений необратимых деформаций.

2.2.5 Комплексный метод анализа тектонической трещиноватости К. Ж. Семинского

На современном этапе развития тектонофизики группа авторов из Института земной коры развивает новый подход к картированию разломно-блоковой структуры [Семинский, 2003; Гладков и Лунина, 2004; Семинский, 2005; Семинский и Бурзунова, 2007; Лунина и Гладков, 2009]. Как отмечает К. Ж. Семинский [Семинский, 2005], в отличие от методов, основанных на анализе только тектонических трещин с видимыми следами смещения, методы, основанные на анализе массовых замеров трещин без смещения, более важны для картирования, так как в этом случае информация может быть получена из каждого выхода горных пород.

Целенаправленные исследования авторов в данной области позволили установить, что в горных породах, подвергнутых воздействию тектонических и нетектонических внешних сил, наиболее распространен парагенезис из трёх примерно перпендикулярных друг другу систем трещин. В зонах влияния «чистых» сбросов, взбросов и сдвигов самая развитая система трещин тройственного парагенезиса (главная) обычно параллельна сместителю разлома. Другая система (второстепенная) у сбросов и взбросов, простираясь так же, как и главная, имеет противоположное падение и характеризуется меньшим максимумом на круговой диаграмме. Эти трещины относятся к сколам Риделя. Третья, нетрадиционно выделяемая система трещин (дополнительная), занимает поперечное положение по отношению к двум первым и характеризуется специфическими особенностями формирования. Идентификация разлома возможна по зональности его внутреннего строения. Если у разломов, формирующихся при сжатии, трещины главной системы в разных подзонах «падают» от периферии к центру, то у сбросов наблюдается обратная картина.

В основе метода лежит проведение массовых замеров элементов залегания тектонической трещиноватости в обнажениях горных пород на площади (примерно по 100 шт. в каждом). Затем с помощью метода кластер анализа обрабатываются матрицы плотности полюсов трещин. Это позволяет выявить группы точек наблюдений с подобной структурой трещинных сетей, которые располагаются в пространстве рядом друг с другом, т. е. образуют участки, блоки, испытавшие примерно одинаковое воздействие эндогенных процессов. Дальше для каждой из точек наблюдений строятся круговые диаграммы трещиноватости (величина окна округления 10°) и выделяются тройственные структурные парагенезисы. Затем выявленные тройки-системы трещин разделяются на сравнительно небольшое количество групп (10–15) по пространственной ориентировке. Информация о присутствии в точках наблюдений троек-систем трещин каждой из выделенных групп выносится на карты встречаемости в виде элементов залегания главной системы трещин тройственного парагенезиса. Итогом совместной интерпретации обоих этапов спецкартирования является карта нового типа, на которой блоки с аналогичной организацией трещинной сети (результат кластер-анализа) контактируют друг с другом по достаточно широким разломным зонам (результат анализа троек-систем трещин), характеризующимся присутствием или отсутствием магистрального сместителя (результат анализа структурных и геоморфологических данных). Присутствие или отсутствие магистрального сместителя в той или иной разломной зоне отражает степень зрелости развития её внутренней структуры.

2.2.6 Определение общего поля напряжений по данным локальных стресс-состояний методом Л. А. Сим

При анализе совокупности данных о локальных стресс-состояниях полученных в пунктах геолого-структурных наблюдений расположенных в одной геологической структуре бывает полезно оценить общее поле напряжений, «внешнее» по отношению к локальным. Для проведения такого усреднения была предложена методика, основанная на подборе на стереограмме положения двух взаимно

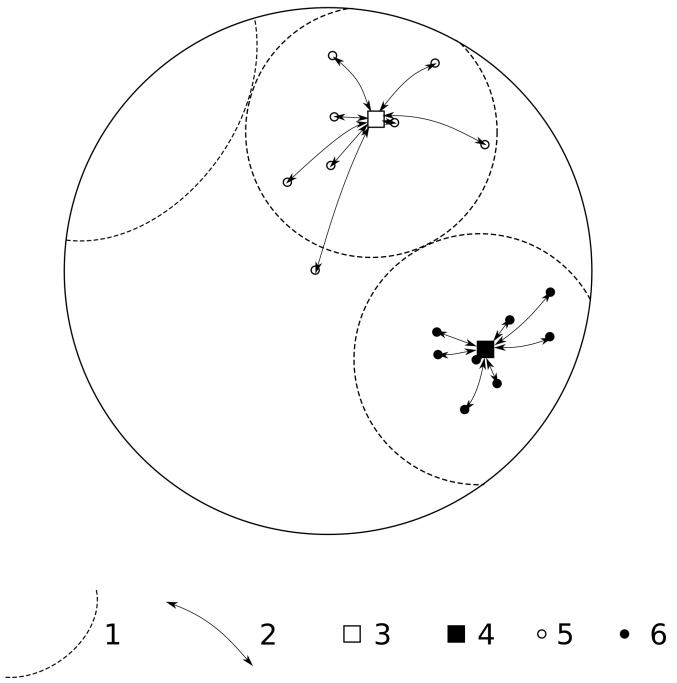
перпендикулярных конических поверхностей так, чтобы в одном из конусов не было ни одного выхода оси сжатия а в другом конусе не было ни одного выхода оси растяжения [Сим, 1982]. В таком случае, ось растяжения общего поля напряжений для такой совокупности локальных стресс-состояний будет совпадать с осью первого конуса и ось растяжения общего поля напряжений будет совпадать с осью второго конуса.

В данной работе подбор положений конусов сжатия и растяжения проводился методом наименьших квадратов. Критерием, по которому проводилась оптимизация положения конуса растяжения являлась сумма углов между каждой из осей растяжений локальных стресс-состояний и текущей осью конуса. То же самое выполнялось для конуса сжатия. Таким образом, для данного набора локальных стресс-состояний выбирается такое положение взаимно перпендикулярных конусов сжатия и растяжения, для которых минимальна сумма углов между осью конуса и соответствующей осью лоакльного стресс-состояния (см. рисунок 2.9).

2.3 Новые методические разработки, сделанные в ходе подготовки диссертации

При выполнении исследований по теме диссертации автором были разработаны следующие новые методические подходы и приемы при выполнении массовых замеров тектонической трещиноватости и при структурно-геологическом анализе полученных массивов данных:

- установлен дополнительный статистический критерий оценки достоверности выбора сопряженных плоскостей;
- определена мера расстояния для более адекватного измерения расстояний между элементами залегания систем трещиноватости, входящих в тройственный парагенезис.
- составлена программа для анализа матриц плотности трещиноватости `pyfrct`;



1 — контуры взаимно перпендикулярных конусов сжатия и растяжения; 2 — угол между осью конуса и соответствующей осью локального стресс состояния; 3,4 — оси конусов сжатия и растяжения (и, соответственно оси общего поля напряжений); 5,6 — оси сжатия и растяжения локальных стресс-состояний. Положение конусов сжатия и растяжения определяется так чтобы сумма углов была минимальна.

Рисунок 2.9 Определение общего поля напряжений для совокупности локальных стресс-состояний используя метод наименьших квадратов

– изобретен цифровой геологический компас.

2.3.1 Дополнительный статистический критерий оценки достоверности выбора сопряженных плоскостей

При проведении полевых работ, направленных на изучение трещинной структуры геологического тела в целях последующего восстановления напряженных состояний, при поиске сопряженных трещин в массиве измеренных трещин, часто применяется метод Николаева. Этот метод позволяет, анализируя диаграммы плотности трещиноватости, определить пары сопряженных трещин.

При полевых работах обычно сложно найти пару сопряженных трещин достоверно удовлетворяющих критериям описанным Гзовским [1975], а именно: перпендикулярность штрихов скольжения к линии пересечения трещины и противоположность направлений смещений по ним.

Штрихи скольжения часто могут отсутствовать на плоскости трещин, а направление смещения по трещине не всегда можно определить верно из-за отсутствия подходящих маркеров, указывающих на направление движения.

В 1977 г. П. Н. Николаев предложил для поиска сопряженных пар трещин использовать диаграммы плотности ориентации трещин [Николаев, 1977]. Он заметил, что в некоторых системах трещин на таких диаграммах наблюдается закономерное смещение максимумов трещиноватости, что можно объяснить действием некоторого постоянного фактора и, предположительно, эти трещины являются сопряженными. Это предположение было подтверждено полевыми работами. Новшеством метода статистического анализа, предложенного Николаевым, является возможность определения пары сопряженных трещин на основании только информации об ориентации совокупности трещин в обнажении.

Предложенный метод к настоящему моменту активно используется при полевой работе большой группой исследователей, так как он обладает очевидными преимуществами перед методом Гзовского. Метод формализован до простых рутинных операций на стереограмме. Этим методом достаточно легко можно проводить анализ большого набора данных в полуавтоматическом режиме с использованием программ, разработанных к настоящему времени. Достаточно лишь найти на стереограмме пару максимумов плотности трещиноватости, «разбросы» которых направлены в противоположную сторону.

При поиске сопряженных пар на диаграммах плотности трещиноватости следует учитывать то, что довольно часто сопряженные трещины в одной паре могут проявляться с разной интенсивностью. Это происходит из-за того, что смещение по одной плоскости становится предпочтительнее смещения по другой, и, как следствие, одна из систем трещиноватости в паре сопряженных трещин проявляется сильнее, чем другая. В результате, на диаграмме плотности трещиноватости одна из систем сопряженных трещин (первая) будет иметь большую плотность, чем вторая. При этом вторая система трещиноватости в паре, имеющая меньшую плотность, как следствие, будет иметь и меньший

«разброс» плотности. На практике это приводит к тому, что в сопряженной паре может оказаться система трещиноватости, в которой может очень слабо наблюдаться «разброс» трещиноватости в том смысле, в котором этот термин употреблял П. Н. Николаев. И возможны случаи, когда в сопряженную пару попадает система трещин с небольшим разбросом, которая принята за сопряженную ошибочно. Ситуация осложняется, когда на диаграмме проявляется сразу несколько максимумов трещиноватости с заметным разбросом, которые могут быть объединены в несколько пар.

По нашему мнению, чтобы избежать подобных проблем, полезно иметь статистический критерий, по которому можно определить надёжность отнесения данного максимума плотности трещиноватости к максимуму, входящему в сопряжённую пару. Иными словами, критерий, по которому можно было бы определить, насколько сильно отличается данное распределение плотности трещиноватости от нормального распределения. Используя такой критерий, можно на этапе автоматического построения матриц плотности трещиноватости выделить максимумы плотности (т. е. оси трещиноватости), имеющие асимметрию, статистически достоверную для целей определения сопряженных пар трещин.

Мы считаем, что в качестве критерия такой асимметрии можно предложить коэффициент асимметрии Пирсона:

$$\gamma = \frac{\mu - M}{\sigma}, \tag{2.4}$$

который равен нулю когда распределение строго симметрично, и отличается от нуля тем сильнее, чем выше асимметрия распределения. Другим возможным критерием может служить критерий хи-квадрат:

$$\chi^2 = \frac{(O - E)^2}{E}, \tag{2.5}$$

где O — наблюдаемая величина, E — ожидаемая величина. Хи-квадрат также равен нулю, когда наблюдаемые значения не отличаются от ожидаемых и отличается от нуля тем сильнее, чем выше разница между ожидаемым и наблюдаемыми значениями. В качестве ожидаемого обычно используется нормальное распределение.

Выбор конкретного критерия, который применяется для оценки достоверности определения данного максимума плотности трещиноватости в качестве

одной из систем трещиноватости в сопряженной паре, проводится эмпирически. Так, на территории Северного Приохотья были измерены элементы залегания тектонической трещиноватости в разных геологических структурах в 89 пунктах геолого-структурных наблюдений [Смирнов и Кондратьев, 2011, 2013]. В каждом пункте на матрице плотности распределения трещин проявляется от двух до 9 максимумов (осей трещиноватости). Анализ каждой из осей трещиноватости выполняется по следующему алгоритму:

1 **для каждого** *максимума из набора трещин* **выполнять**
2 Поворот всех трещин в наборе так, чтобы текущий максимум плотности трещиноватости оказался в центре стереограммы;
3 Пересчитывание матрицы плотности трещиноватости;
4 Вычисление статистических параметров распределения M, μ, σ;
5 Расчет коэффициента асимметрии Пирсона γ;
6 Расчет χ^2;
7 **конец цикла**

Первые два шага необходимы для того, чтобы избавиться от возможных искажений, возникающих, когда ось трещиноватости расположена ближе к краю стереограммы. Когда ось трещиноватости расположена строго в центре, можно пренебречь искажениями, связанными с проекцией на полусферу и рассматривать распределение в непосредственной близости к центру стереограммы как простое двумерное нормальное распределение.

Все имеющиеся оси трещиноватости были проанализированы по приведенному алгоритму. Результатом стала база данных, в которой содержались статистические характеристики каждой оси трещиноватости в изученных пунктах (среднее, мода, стандартное отклонение по каждой из осей, коэффициент асимметрии Пирсона по каждой из осей и значение хи-квадрат). Все полученные данные представлены на матричном графике (рисунок 2.10) где показаны зависимости между всеми перечисленными величинами. График представляет собой двухмерную матрицу размером 7×7 в которой по диагонали расположены изучаемые величины (и гистограммы распределения их значений), а в ячейках выше диагонали расположены двухмерные диаграммы рассеяния, у которых в

качестве координат по оси OY используется значения величины из ячейки расположенной на пересечении главной диагонали и текущей строки, а в качестве координат по оси OX испольлзуются значения величины из ячейки, расположенной на пересечении главной диагонали и текущего столбца. На графике в координатах мода — среднее видно, что большая часть точек лежит на прямой линии. Это означает, что эти точки соответствуют симметричному распределению. Все точки, не лежащие на этой прямой, соответствуют точкам, в которых распределение не симметрично.

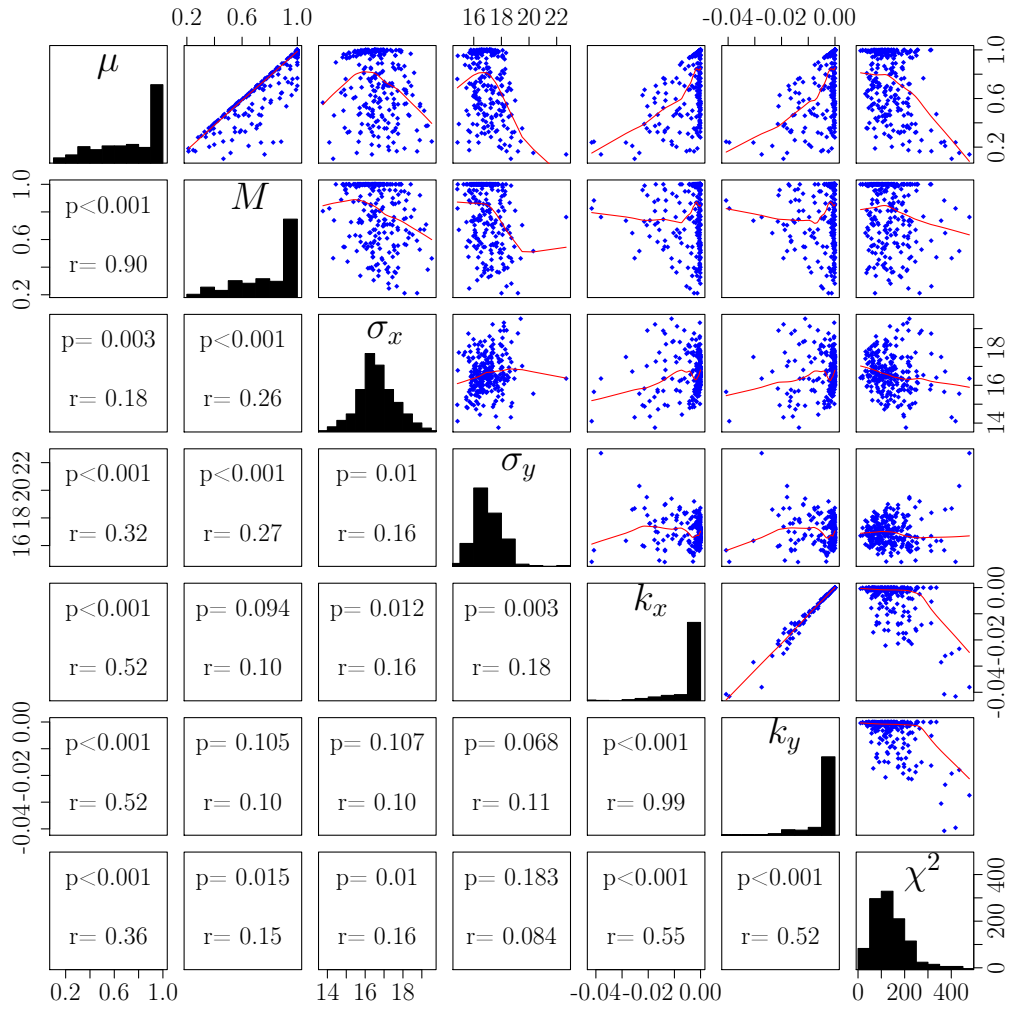


Рисунок 2.10 Статистические характеристики максимумов плотности трещиноватости пунктов геолого-структурных наблюдений на территории Северного Приохотья

Наибольший интерес представляет график, построенный в координатах хи-квадрат — коэффициент Пирсона, на котором основная часть точек находится

в начале координат, но при этом наблюдается слабая корреляция коэффициента Пирсона с критерием хи-квадрат. На этот график можно нанести все точки, соответствующие парам сопряженных трещин, которые уверенно выделяются, т. е. пары с примерно равной плотностью трещиноватости и с хорошо проявленными «разбросами», смещёнными навстречу друг другу и лежащими на одной дуге большого круга. Как видно из рисунка 2.11, сопряжённые трещины встречаются практически во всем диапазоне возможных значений коэффициента асимметрии Пирсона, в то время как по оси хи-квадрат они присутствуют лишь в диапазоне от 100 и более.

Таким образом, можно установить, что для этого набора данных о трещиноватости дополнительным критерием для выделения трещины как входящей в пару сопряжённых трещин является значение хи-квадрат больше 100. В случае если для выбранного полюса трещиноватости значение χ^2 оказывается ниже порогового, определённого нами, то разброс поля для этого полюса трещиноватости не считается статистически достоверным.

В отличие от коэффициента асимметрии Пирсона, значение хи-квадрат сильно зависит от объёма выборки, для которой он рассчитывается. В случае с вычислением χ^2 для распределения плотности вероятности на матрице величина этого критерия будет зависеть от разрешения этой матрицы (количество ячеек матрицы на один градус). Также значение χ^2 может незначительно меняться при разных алгоритмах расчёта плотности распределения трещиноватости. Таким образом, значение хи-квадрат не является абсолютной величиной и для каждого алгоритма построения матриц плотности трещиноватости следует находить пороговое значение критерия хи-квадрат отдельно.

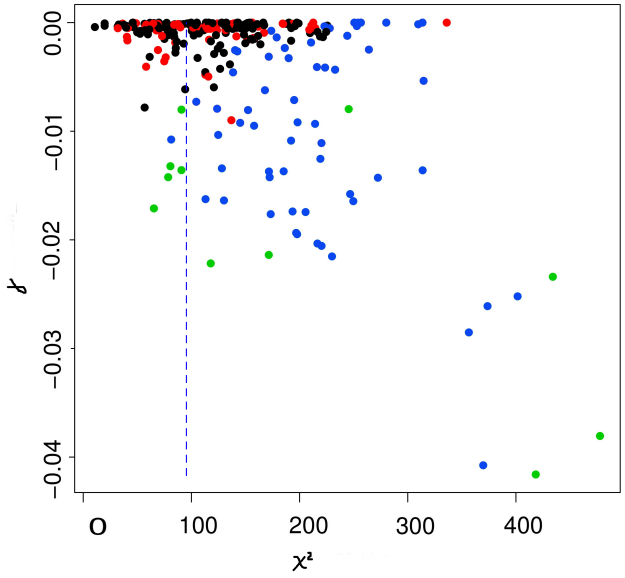


Рисунок 2.11 Зависимость χ^2 от коэффициента асимметрии Пирсона для осей тектонической трещиноватости Северного Приохотья

Синим цветом выделены оси трещиноватости, для которых надёжно интерпретируется вхождение в пары сопряженных трещин. Пунктирной линией синего цвета облако точек разделено на две группы: точки для которых χ^2 больше 100 и точки для которых значение χ^2 меньше 100. Значение критерия выбирается так, чтобы основная часть синих точек находилась справа от линии.

На рисунке 2.11 представлена зависимость χ^2 от γ для осей тектонической трещиноватости в пунктах геолого-структурных наблюдений на участках Северного Приохотья. На диаграмму вынесены группы осей трещиноватости: а) не являющиеся сопряжёнными (чёрный), б) возможно, являющиеся сопряжёнными (красный и зелёный), в) уверенно выделяемые как сопряжённые (синий). В результате, нами эмпирически принято пороговое значение критерия $\chi^2 = 100$.

2.3.2 Программа Pyfrct

Обработка массива элементов залегания плоскостей трещин включает в себя построение матрицы плотности трещиноватости, нахождение на ней максимумов плотности, расчёт ориентации главных осей нормальных напряжений и пр.

Для автоматического выполнения этих операций была составлена программа `Pyfrct` (доступна по адресу `https://github.com/fatune/pyfrct`).

Программа представляет собой набор скриптов, где каждый служит для выполнения отдельной задачи. Скрипты можно объединить для пакетной обработки массива замеренных трещин в разных пунктах наблюдений.

В возможности программы входит:

- расчет матрицы плотности распределения трещиноватости с заданной точностью для стереографической и прямоугольной проекций с использованием метода kernel-density,
- построение стереографической и прямоугольной диаграмм,
- нахождение максимумов плотности распределения (осей трещиноватости),
- вращение всего комплекса измеренных трещин (например, для учета постоянных погрешностей измерения),
- вычисление ориентации главных осей нормальных напряжений методом Гзовского,
- нахождение поясов трещиноватости,
- генерация случайного массива трещиноватости распределенного по заданному закону,
- выделение пар сопряженных трещин методом Николаева в полуавтоматическом режиме.

Исходными данными для программы является простой текстовый файл в котором в каждой строке записаны элементы залегания плоскостей трещин — азимут падения и угол падения разделенные пробелом.

`data.txt`

```
010 25
122 12
180 75
```

```
131 45
260 81
```

Для расчета матрица плотности трещиноватости используется команда:

```
python density.py -s 5 -r 100 -i data.txt -o data.density
```

В результате будет создан файл data.density с расчитанной матрицей плотности трещиноватости. Далее, для построения стереограммы плотности досаточно использовать команду

```
cat data.txt | python fr_stereo.py -f data.density -o data.pdf -u -r
```

которая создаст файл data.pdf.

2.3.3 Цифровой геологический компас

Неотъемлемым инструментом в полевой работе геолога является горный (геологический) компас. К первой разработке горного компаса можно отнести карманный теодолит «pocket-transit» канадского геолога Девида Брантона, созданный им в 1894 г. и известный как «Brunton compass». В практике отечественных геологов широко используется модель Д. Г. Сапожникова 1974 г., сочетающая в себе компас, уровень и визирное приспособление для оценки элементов залегания горных пород в обнажении и на удалении от них.

При массовом наборе замеров элементов залегания в ходе работы нами использовался «Цифровой геологический компас» — электронное устройство позволяющее в автоматическом режиме снимать замеры элементов залегания поверхности без необходимости приведения компаса к горизонтальному уровню (патенты № RU 121565 U1, RU 137609 U1).

Принцип работы цифрового компаса

В конце XX в. в навигационных устройствах (кораблей, ракет и т. д.) для определения курса и крена стали применять цифровые компасы, определяющие ориентировку в пространстве на базе датчиков магнитного поля и ускорения, заменив собою обычный компас [Itoh, 1980; Pant, Fall 1987; Caruso, 1997]. В цифровом компасе трехосевые взаимно ортогональные датчики магнитного поля измеряют проекции вектора магнитного поля Земли на грани устройства. Сочетание величин трех проекций позволяет определить ориентацию устройства относительно внешнего магнитного поля. Похожим образом трехосевые датчики ускорения, измеряющие в состоянии покоя проекции вектора силы тяжести, дают возможность определения ориентации устройства относительно поля гравитации Земли.

Впоследствии указанное сочетание датчиков позволяет проводить измерения ориентации, не приводя само устройство в горизонтальное положение, так как оси датчиков, совпадающие с осью граней устройства, могут быть переориентированы аналитическими методами векторной алгебры. Проекции вектора силы тяжести, полученные с акселерометра, однозначно характеризуют углы наклона компаса. Этих углов достаточно для переориентации осей магнитометра [STMicroelectronics, 2010]:

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.6}$$

$$R_\rho = \begin{bmatrix} \cos\rho & 0 & -\sin\rho \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\rho & 0 & \cos\rho \end{bmatrix}; \tag{2.7}$$

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}; \tag{2.8}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = R_\psi R_\rho R_\gamma \begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix}, \tag{2.9}$$

где ρ, γ, ψ — углы наклона устройства (тангаж, крен и рыскание); M'_x, M'_y, M'_z — проекции вектора магнитного поля, получаемые с магнитометра до переориентации; M_x, M_y, M_z — то же, после переориентации.

В таком устройстве достигается существенное преимущество относительно обычных компасов: приложив один раз устройство к измеряемой плоскости, можно провести все необходимые замеры как крена устройства, так и его ориентации относительно вектора магнитного поля.

В настоящее время, благодаря снижению стоимости датчиков, такие устройства стали применяться и в бытовой технике, особенно в игровых приставках и мобильных устройствах.

Применительно к задачам структурной геологии цифровой компас может значительно сократить время на измерение. В 2007 г. обоснована возможность разработки цифрового геологического компаса с погрешностью измерений до 1° [Zobl et al., 2007]. Среди программных продуктов под мобильные платформы `iOs` и `Android` в настоящий момент существуют приложения, реализующие возможности горного компаса на мобильном телефоне. Недостатком такого решения, по нашему мнению, является высокая стоимость конечного устройства (цена на мобильные телефоны и цена на сам программный продукт), а также слабая применимость мобильных телефонов в практике полевого геолога (малое время автономной работы, ограниченные возможности подзарядки аккумулятора телефона, недостаточно ровная поверхность тыльной стороны компаса и пр.).

В целях создания компаса, пригодного к полевой работе, мы спроектировали цифровое устройство, схема строения которого представлена на рисунке 2.12 (патенты № RU 121565 U1, RU 137609 U1).

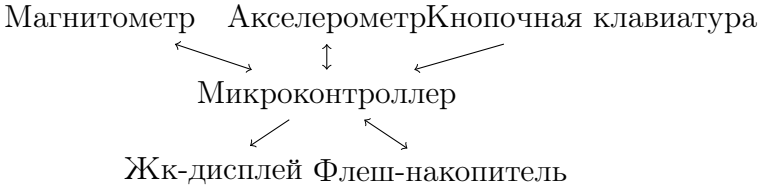


Рисунок 2.12 Принципиальная схема работы цифрового геологического компаса:

В корпус из немагнитного материала размерами 150×80×30 мм были помещены датчики магнитного поля и ускорения. Датчики представляют собой 3-осевой магнитометр и 3-осевой акселерометр, измеряющие ориентацию корпуса компаса в пространстве. В корпусе также находятся флеш-накопитель на который записываются результаты измерений, микроконтроллера, выполняющего управление всеми перечисленными периферийными устройствами, и элемент питания. На корпусе также смонтирована кнопочная клавиатура и жк-дисплей для отображения результатов измерений.

Обработка данных, поступающих с датчиков на микроконтроллер, включает в себя преобразование сырых данных в величины проекций векторов магнитного и гравитационного полей и вычисление азимута и угла падения по формуле 2.9.

Данные измерений записываются в простой текстовый файл, в котором в каждой строке содержатся элементы залегания плоскости разделенные пробелом, а именно, азимут падения, азимут простирания, и, если произведено измерение линейности, его азимут.

Главным условием измерения является приложение нижней плоскости компаса к измеряемой поверхности. Ориентация остальных плоскостей компаса при этом не имеет значения (рисунок 2.13,А).

Особенностью разработанного компаса является возможность одним замером снять не только стандартные элементы залегания плоскости (азимут и угол падения), но и элементы залегания линейных структурных элементов (штрихи скольжения, линейность минералов). Кроме того, предусмотрена возможность измерения истинного залегания на основе видимых залеганий (см. рисунок 2.13,Б,В).

Для калибровки датчиков и установления погрешности измерений компаса мы сконструировали автоматизированный стенд, который представляет собой площадку по размеру компаса, вращаемую в трёх плоскостях системой шаговых двигателей, управляемых при помощи компьютера. Площадка закреплена на штанге из немагнитного материала и вынесена на расстояние 1 м от шаговых двигателей и их драйверов для уменьшения искажений магнитного поля.

На данном стенде проведена серия измерений по 80 замеров для каждого положения рабочей площадки с шагом 30°. Проведенные испытания показывают

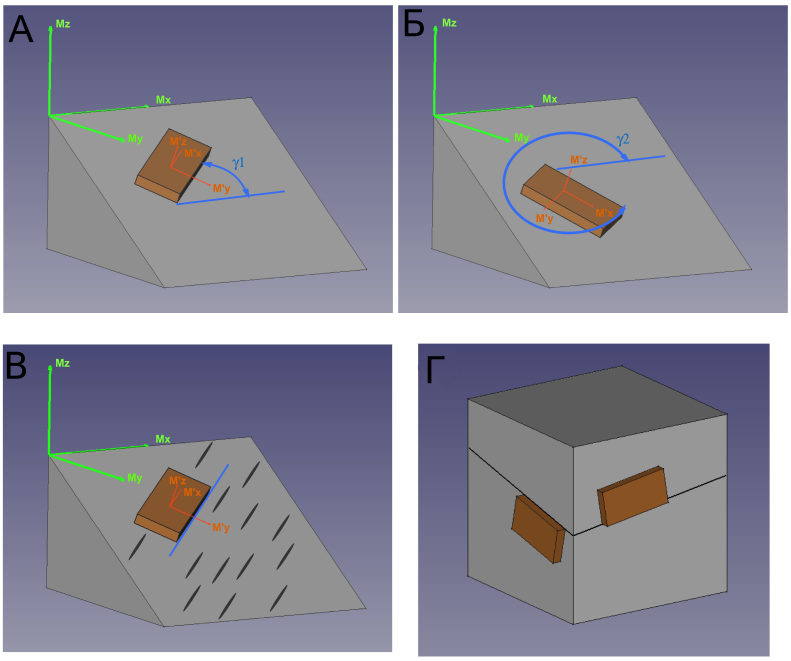


Рисунок 2.13 Приложение компаса к плоскости для измерения элементов залегания

А, Б — при измерении азимута падения и угла падения нет необходимости в точном позиционировании компаса на плоскости. При разных значениях угла γ углы падения будут в пределах погрешности измерений; В — для измерения линейности (борозды скольжения и пр.) компас на плоскости ориентируется длинной стороной параллельно линейности; Г — для измерения истинных углов залегания плоскости на основании двух измерений видимых элементов залегания компас поочередно прикладывается к стенкам обнажения параллельно линии видимого падения плоскости.

(рисунок 2.14), что погрешность измерений компаса не превышает 2°, при этом погрешность измерения угла падения плоскости составляет 1° и не зависит от величины этого угла, в то время как для традиционного компаса установлена зависимость экстремального возрастания погрешности измерений угла падения при стремлении значений угла падения к нулю [Чернышев, 1983].

К настоящему моменту рабочая модель опробована в ходе выполнения массовых замеров тектонической трещиноватости в вулканоструктурах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и складчатых структурах его основания [Кондратьев, 2011; Смирнов и Кондратьев, 2011] (рисунок 2.15).

Использование разработанного компаса оправдало себя в специальных структурных исследованиях на Каральвеемском золоторудном месторождении,

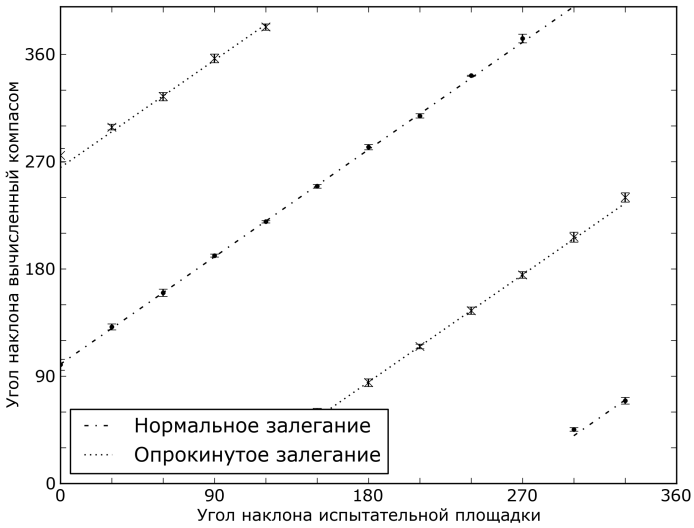


Рисунок 2.14 Повторяемость измерений для азимута падения, а также отклонения значений, полученных компасом, от азимута падения испытательной площадки

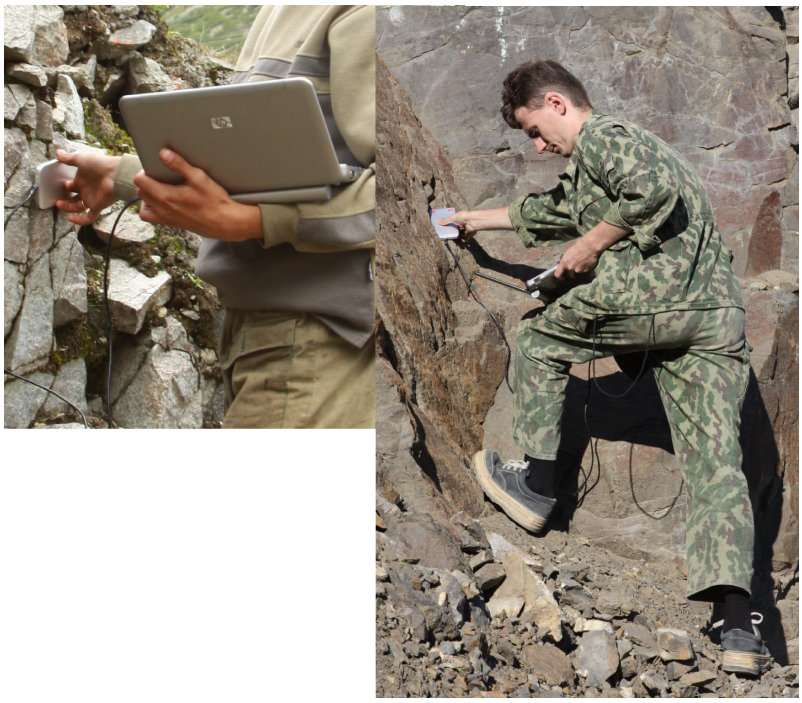


Рисунок 2.15 Работа с цифровым компасом в полевых условиях

направленных на детальное изучение структуры рудного поля и выявление областей локализации рудных тел [Кондратьев, 2012а; Кондратьев и Ползуненков, 2014]. За короткое время с помощью компаса была исследована вся территория

месторождения (подземные горные выработки и открытые обнажения) и набрана база данных, содержащая около 5000 элементов залегания плоскостей тектонических трещин. Простая процедура измерения элементов залегания линейных структурных элементов позволила собрать особенно ценную информацию по ориентировке борозд скольжения на контактах рудных жил с вмещающими породами и на пришлифованных зеркалах скольжения в окрестностях рудных жил. Сбор такого количества обширной структурной информации за отведённое на работу время с помощью традиционного компаса был бы невозможен.

Указанные работы выявили следующие преимущества цифрового геологического компаса по сравнению с традиционным геологическим компасом:

- возможность замерять элементы залегания плоскости без приведения компаса к горизонтальному уровню,
- автоматическое сохранение результатов серии измерений в памяти компьютера,
- скорость накопления данных с датчиков цифрового компаса для преобразования их в элементы залегания плоскости (азимут падения и угол падения) составляет около 5 с,
- в связи с этим скорость выполнения массовых замеров элементов залегания плоскостей трещин составляет в среднем 15 мин. на 100 плоскостей, что в 10 раз выше скорости при использовании простого геологического компаса,
- предельная точность измерений $\pm 2^{\circ}$ (в зависимости от угла падения плоскости) позволяет различать плоскости с близкими углами падения,
- возможность простого измерения линейности и видимых элементов залегания.

Дальнейшим развитием конструкции цифрового геологческого компаса является версия устройства основанная на микроконтроллере esp32 установленного на модуле для разработки m5stack. Внешний вид устройства представлен на рисунке 2.16. Благодаря своему малому весу и небольшому размеру компас (5 см×5 см×5 см) удобен при постоянной переноске в полевых условиях. Ниже

представлен пример содержимого файла, созданного устройством в режиме измерения линейности. В каждой строке файла через запятую записано четыре числа: порядковый номер замера, азимут простирания (по правилу правой руки, т.е. азимут падения минус 90°), угол падения и угол на плоскости между простиранием и направлением измеряемой линейности. Таким образом, формат записи файла при проведении измерений борозд скольжения в точности соответствует формату входного файла для программы StressGeol [Ребецкий и др., 2017a].

Рисунок 2.16 Цифровой геологический компас сделанный на базе m5stack под управлением микроконтроллера esp32

data.txt

```
1, 123, 44, 021
2, 340, 20, -90
3, 220, 59, 170
```

Таким образом, к настоящему времени в структурной геологии сложился достаточно большой комплекс методов изучения тектонической трещиноватости с целью восстановления напряженных состояний в земной коре — главным

образом это методы структурного анализа трещин (сопряженных пар сколов, квазиглавных напряжений, статистический, тройственного парагенезиса) и методы квазипластического анализа (кинематический, катакластический анализ разрывных смещений). В процессе выполнения диссертации в полевой и камеральной работе были использованы следующие методы:

При камеральной обработке данных о зеркалах скольжения для восстановления напряженных состояний применялся метод катакластического анализа разрывных смещений (Ю. Л. Ребецкий), так как он кроме восстановления ориентации главных осей тензора напряжений и его вида, также позволяет рассчитать нормированный тензор сейсмотектонических деформаций, нормированне величины эффективного давления и максимального касательного напряжения.

В случае если в обнажении не было найдено зеркал скольжения, для восстановления напряженных состояний применялся статистический метод (П. Н. Николаев) к которому был добавлен дополнительный статистический критерий выделения сопряжённых трещин. Этот метод был выбран поскольку в нём статистически обосновывается выделение сопряжённых пар сколов.

При изучении обнажений в поле для массового замера элементов залегания тектонических трещин использовался цифровой геологический компас, поскольку с его помощью можно быстро и с высокой точностью производить большое количество измерений. Если в обнажении присутствовали борозды на зеркалах скольжения, то кроме тектонических трещин замерялись также и они (в этом случае, запись производилась в отдельный файл).

Глава 3. Результаты изучения тектонической трещиноватости на опорных участках

В течение полевых работ 2007–2016 гг. на территории Северного Приохотья проведено изучение тектонической трещиноватости в различных структурно-геологических обстановках. Выбрано 12 опорных участков, на которых проведён массовый замер элементов залегания тектонической трещиноватости (рисунок 3.1). Попутно с замерами трещиноватости отмечались морфологические особенности плоскостей трещин, их структурные взаимоотношения. При нахождении борозд скольжений на плоскостях трещин выполнялся замер их ориентировок. В таблице 3.1 перечислены изученных участки, их координаты, а также метод анализа, использовавшийся для восстановления напряженных состояний.

Таблица 3.1 Исследованные участки в различных геологических обстановках Северного Приохотья и реконструкция в них напряженных состояний

	Участок	Координаты	Число пунктов*	Метод анализа	Ориентация оси		Тектоническая позиция
					сжатия	растяжения	
1	«Хета»	61,0° 151,7°	12	Николаев	90°∠10°	0°∠00°	Ар.-Вил. синклинорий
2	«Армань»	60,6° 150,6°	27	Николаев	90°∠00°	0°∠00°	Ар.-Вил. синклинорий
3	«Магадавен»	60,5° 151,0°	1	МКА	15°∠9°	243°∠76°	Ар.-Вил. синклинорий
4	«Ойра»	59,8° 149,8°	1	Николаев	261°∠31°	182°∠34°	Хасыно-Момолтыкичская зона
5	«Хасын»	60,1° 150,8°	1	МКА	326°∠28°	45°∠23°	Хасыно-Момолтыкичская зона
6	«Магадан-1»	59,5° 150,9°	24	Николаев	251°∠20°	160°∠18°	Хасыно-Момолтыкичская зона
7	«Дондычан»	60,5° 150,9°	1	МКА	087°∠42°	324°∠38°	ОЧВП. Хасынское звено
8	«Колхида»	60,6° 151,6°	1	МКА	260°∠32°	61°∠73°	ОЧВП. Хасынское звено
9	«Карамкен»	60,2° 151,1°	1	МКА	78°∠62°	290°∠30°	ОЧВП. Хасынское звено
10	«Нелькандже»	60,2° 150,7°	5	Николаев	335°∠10°	65°∠00°	ОЧВП. Хасынское звено
11	«Ола»	60,6° 151,4°	10	Николаев	262°∠50°	350°∠30°	ОЧВП. Хасынское звено
12	«Магадан-2»	59,5° 150,9°	4	Николаев	251°∠20°	160°∠18°	KZ впадины

* — Со статистически достоверным результатом.

МКА — Метод катакластического анализа разрывных смещений.

Координаты указаны для центральной точки участка. Для каждого участка указаны усредненные напряженные состояния.

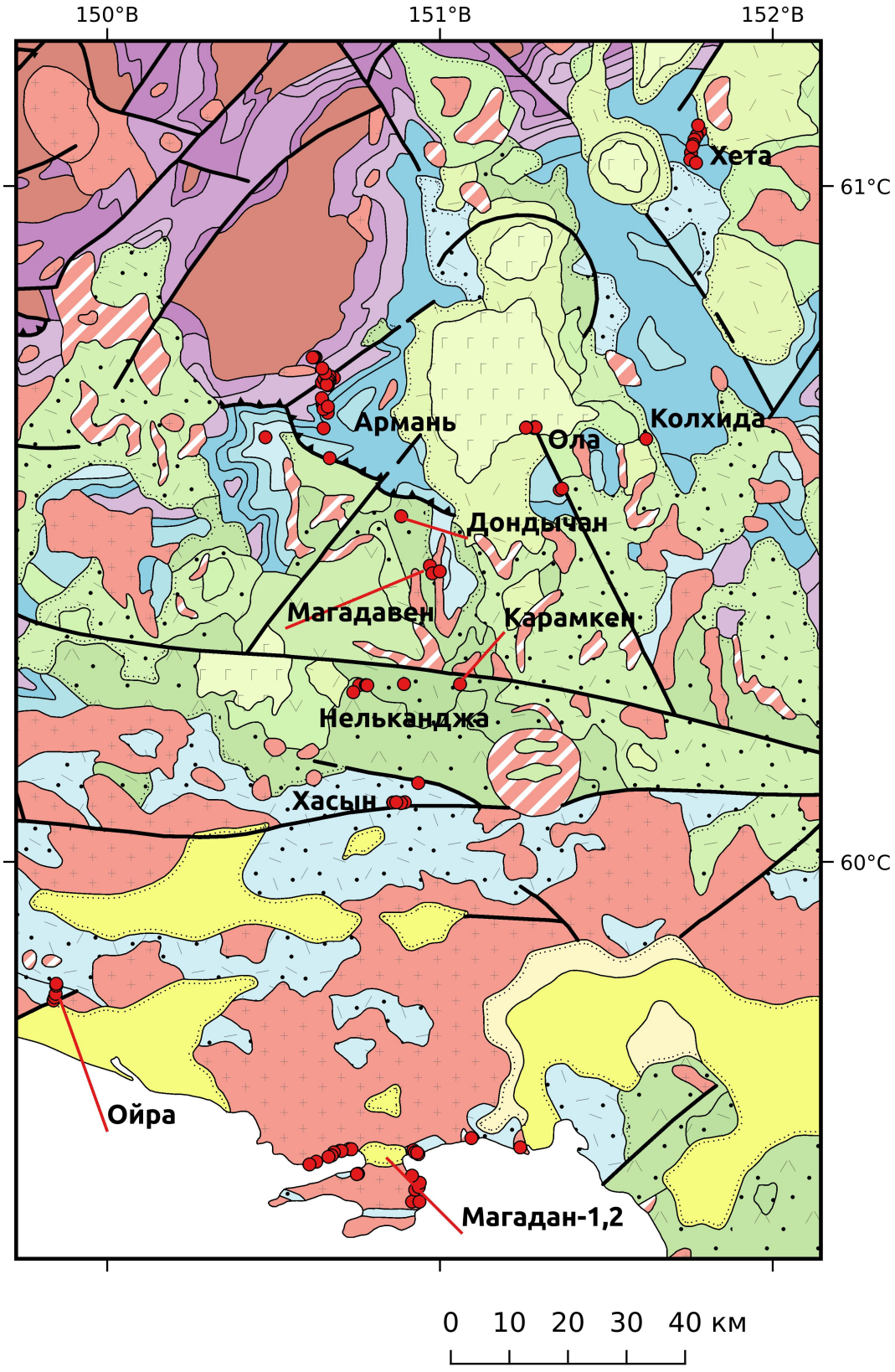
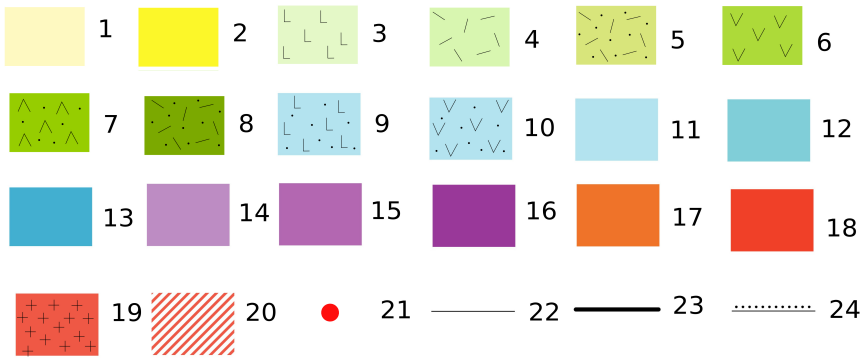


Рисунок 3.1 Размещение опорных участков геолого-структурных наблюдений

Геологическая карта по [Корольков и др., 1992]



Условные обозначения:

1 — четвертичные отложения; 2 — конгломераты, песчаники, аргиллиты, алевролиты неогенового возраста; 3–5 — верхнемеловые вулканиты: 3 — базальты, андезибазальты, туфы базальтов, туфы риолитов мыгдыкитской свиты; 4 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты; 5 — туфы, игнимбриты дацитов, риодацитов и риолитов хольчанской свиты; 6 — песчаники конгломераты, андезиты, андезибальты нерасчленённых отложений арманской свиты нижнего-верхнего мела; 7–10 — нижнемеловые вулканиты: 7 — андезиты, андезибазальты, дациты, туфы андезитов, дацитов нанкалинской толщи; 8 — туфоконгломераты, туфопесчаники, алевролиты, аргиллиты кирикской толщи; 9,10 — андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты момолтыкичской свиты верхней юры — нижнего мела; 11–13 — стратифицированные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 14–16 — стратифицированные отложения триасового возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 17,18 — стратифицированные отложения пермского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 19 — гранитные и гранодиоритные интрузии мелового возраста; 20 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 21 — пункты геолого-структурных наблюдений; 22 — геологические границы; 23 — то же, с угловым несогласием 24 — разломы

3.1 Мезозойские складчатые структуры

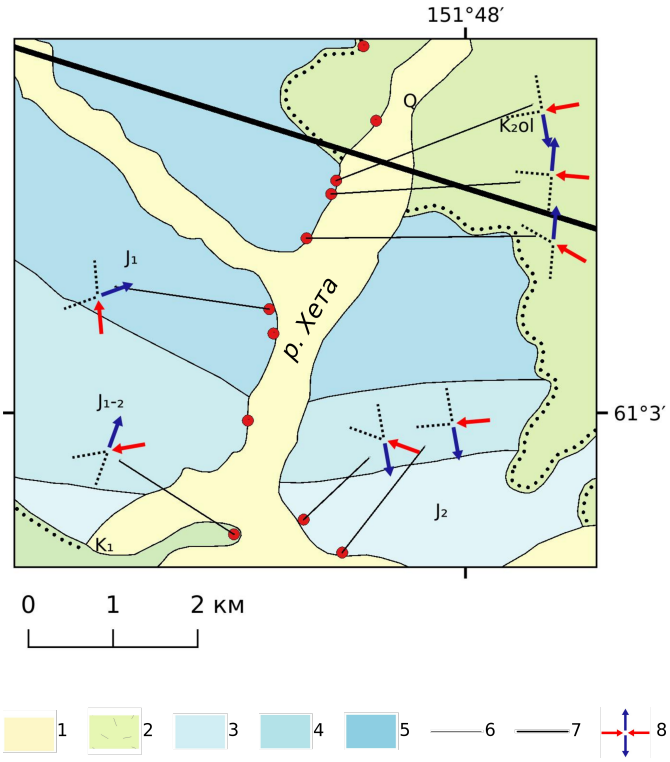
Анализ тектонической трещиноватости в целях выявления полей напряжений выполнялся на трёх участках — «Хета», «Армань» и «Магадавен» которые расположены вдоль северной границы Хасынского звена Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, в пределах Армано-Вилигинского синклинория.

3.1.1 Участок «Хета»

Расположен в бассейне р. Малтан в зоне динамического влияния Хетинского разлома, который трассируется в субширотном направлении через долину р. Хета от р. Малтан на западе до р. Эльген на востоке на расстояние около 90 км [Кондратьев, 2008]. Этот разлом отчетливо проявлен в неотектонической структуре района в виде левосторонней кулисной системы разрывов, с которой связаны долина р. Хета и сквозные долины, соединяющие бассейны рр. Хета и Талая [Кондратьев, 2010].

Он рассекает структуры основания пермско-юрского возраста и складчатые вулканогенные образования Охотско-Чукотского пояса.

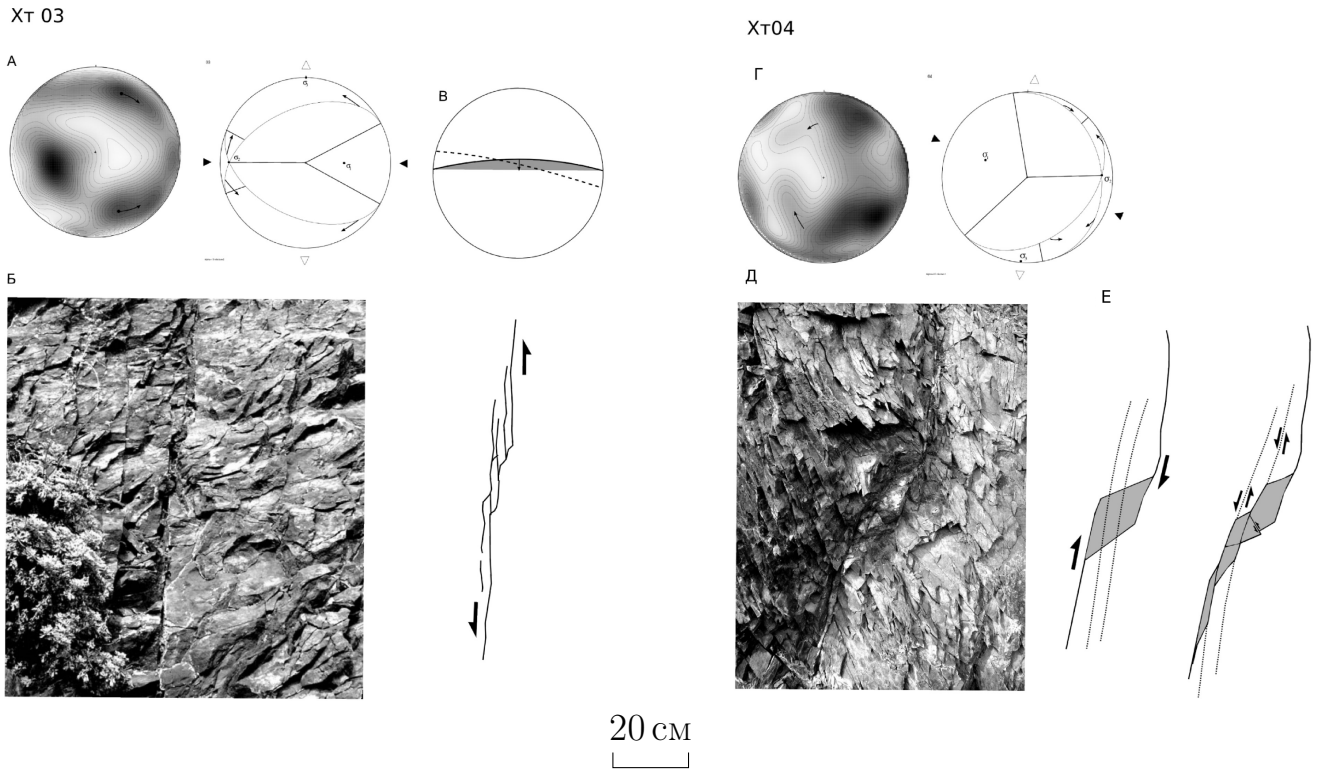
На участке «Хета» нами были выполнены массовые замеры элементов залегания тектонической трещиноватости в 12 точках (рисунок 3.2). В каждой точке сделано в среднем по 100 замеров, на основании которых были построены матрицы плотности трещиноватости. Реконструкцию полей напряжений в точках проводили в соответствии с методическими разработками П. Н. Николаева и М. В. Гзовского. По методу П. Н. Николаева [1982] выявлялись сопряженные максимумы, по которым с помощью метода М. В. Гзовского [1975] осуществлялось восстановление положения осей главных нормальных напряжений. В трёх точках сопряжённые максимумы на диаграммах не были проявлены. По методу, предложенному К. Ж. Семинским [Семинский и Бурзунова, 2005], на диаграммах матриц трещиноватости каждой точки были выделены тройственные парагенезисы, которые по степени подобия были разделены на четыре группы. Результаты интерпретации матриц трещиноватости представлены на рисунке 3.2. В изученных обнажениях хорошо выражены сопряжённые системы трещиноватости, которые также проявляются на диаграммах плотности трещиноватости в виде максимумов, смещённых навстречу друг другу. Кроме того, в обнажениях также присутствует подчиненная система трещиноватости. На рисунке 3.3,а показана система эшелонированных трещин, интерпретируемая как сколы Риделя. Установленная кинематика этой системы отвечает сбросу. Характерно, что простирание этой системы трещиноватости коррелируется с простиранием Хетинского разлома, отличаясь от него на 10–20°в различных обнажениях.



1 — четвертичные отложения; 2 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты верхнего мела; 3–5 — стратифицированные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 6 — геологические границы; 7 — разломы; 8 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.2 Восстановленные направления осей сжатия и растяжения в области действия Хетинского разлома. Геологическая карта по [Чертовских и Шейкова, 1979]

В одном из обнажений был обнаружен кварцевый прожилок (рисунок 3.3,г), характер взаимоотношений контактов которого со вмещающими породами и сколовыми трещинами позволяет представить его как мостиковую структуру растяжения (минипулл-апарт), смещенную образовавшимися впоследствии сколовыми трещинами сбросовой кинематики. Примечательно, что в результате инверсии напряжений направление движения по плоскости примерно одного и того же залегания изменилось на противоположное. Свидетельством изменчивости поля напряжений в исследуемом районе являются также обнаруженные в некоторых обнажениях зеркала скольжения, запечатлевшие в себе движения по этим плоскостям. Направление движения устанавливалось по бороздам скольжения, причём местами на одной и той же плоскости сместителя присутству-



А — диаграмма плотности трещиноватости и реконструированное поле напряжений пункта Хт03. нижняя полусфера; Б — кулисообразные сколы сбросовой кинематики; В — взаимоотношения залеганий кулисообразных сколов и плоскости Хетинского разлома. Серым показана плоскость сброса в обнажении, пунктирной линией показана плоскость Хетинского разлома; Г — диаграмма плотности трещиноватости и реконструированное поле напряжений пункта Хт04. нижняя полусфера; Д — кварцевый прожилок; Е — предположительный ход деформации.

Рисунок 3.3 Тектоническая трещиноватость и реконструкция стресс состояний в обнажениях юрских алевролитов в пунктах Хт03 и пункте Хт04

ют борозды, ориентированные в разных направлениях. Угол между бороздами скольжения на поверхности кварцевого прожилка и бороздами скольжения на поверхности самой трещины на плоскости зеркала составляет 30–35°.

На стереограммах плотности трещиноватости были выделены тройки взаимно перпендикулярных систем трещиноватости (структурные парагенезисы) по методу, описанному в работе [Семинский и Бурзунова, 2005]. Они были объединены по пространственной ориентировке в 4 группы. На рисунке 3.2, показано положение выделенных групп. Основная часть пунктов характеризуется парагенезисом одной ориентировки. Вместе с тем в центральной части присутствует парагенезис, ориентировка которого отличается от остальных парагенезисов.

Обращает на себя внимание и то, что на диаграмме плотности трещиноватости для этой точки сопряженные максимумы проявлены не были.

Совокупность стресс-тензоров, полученных в окрестностях Хетинского разлома, позволяет оценить кинематику разлома как сбросовую с незначительной левосдвиговой компонентой.

3.1.2 Участок «Армань»

Расположен в верхнем течении р. Армань. Он находится в зоне динамического влияния Иня-Ямской зоны разломов субширотного простирания и Арманского разлома северо-восточного простирания.

Территория участка сложена согласно залегающими отложениями массивных аргиллитов, алевритов с прослоями мелкозернистых песчаников триасового возраста, на которых также согласно залегают песчанистые и глинистые алевролиты, аргиллиты с прослоями мелкозернстых песчаников, с редкими линзами туфопесчаников и туфов андезтов юрского возраста [Аноров и др., 2001; Р56, 2008]. Указанные породы слагают южный фрагмент Армано-Вилигинского синклинория, где также выделяется входящая в состав синклинория Бергенджинская синклиналь. Они имеет субширотное простирание, сложена отложениями нижне-среднеюрского возраста, и нарушена субширотными разломами [Р56, 2008].

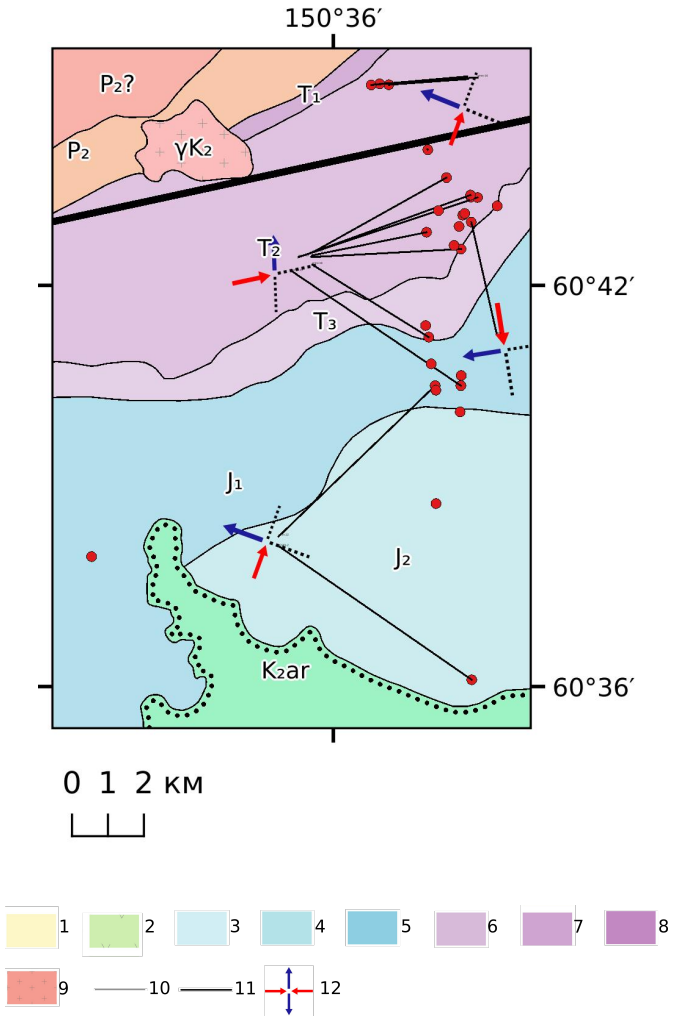
Для массовых замеров элементов залегания тектонической трещиноватости было выбрано 27 пунктов, в каждом из которых было замерено 100 плоскостей трещин в среднем. Для каждого пункта были составлены диаграммы плотности распределения трещин, на которых методом П. Н. Николаева были выделены пары сопряженных систем трещиноватости и методом М. В. Гзовского восстановлены ориентировки сил сжатия и растяжения. На рисунке 3.4 показано распределение векторов главных нормальных напряжений на исследованной площади. Большинство осей сил сжатия и растяжения имеет пологий угол падения (до 30°), следовательно, напряженное состояние относится к сдвиговому типу. При этом по направлению осей главных нормальных напряжений мож-

но выделить ряд обособленных блоков. Трещинная сеть большинства изученных пунктов образовалась под воздействием сил сжатия, ориентированных в субширотном направлении, и сил растяжения, ориентированных, соответственно, в субмеридиональном направлении. Ориентировка векторов выдержана на всей площади выделенного блока. На северном и южном флангах выделяются обособленные блоки с субмеридиональным направлением сил сжатия. В отличие от центрального блока, направление векторов в южном и северном блоках не выдержано и варьирует в пределах 30°–40°.

В восточной части выделяется блок, в котором трещинная сеть сформировалась под воздействием сил сжатия, направленных субмеридионально. Векторы сил сжатия и растяжения в этом блоке также отличаются невыдержанными направлениями.

На каждой диаграмме плотности трещиноватости были выделены тройственные парагенезисы. Пункты наблюдений со сходной ориентировкой тройственного парагенезиса объединены в группы. Всего выделены 3 группы. Несмотря на то что объединение в группы проводилось исключительно по близости ориентировки парагенезиса, а не по географической близости пунктов, пункты со схожей ориентировкой тройственного парагенезиса оказались расположены рядом. На рисунке 3.4 показано положение тройственного парагенезиса разной ориентировки. Пункты, располагающиеся в пределах выделенного выше центрального блока, характеризуются единой ориентацией тройственного парагенезиса. Северный и южный блоки также характеризуются присущей только им ориентацией тройственного парагенезиса. В то же время в центральном блоке разные пункты наблюдений имеют ориентировку, совпадающую как с центральным блоком, так и с южным и северным блоками.

Стоит отметить, что границы между некоторыми выделенными блоками пространственно совпадают с тектоническими границами. Так, граница между северным и центральным блоками пространственно совпадает с кулисой Иня-Ямского субширотного регионального разлома.



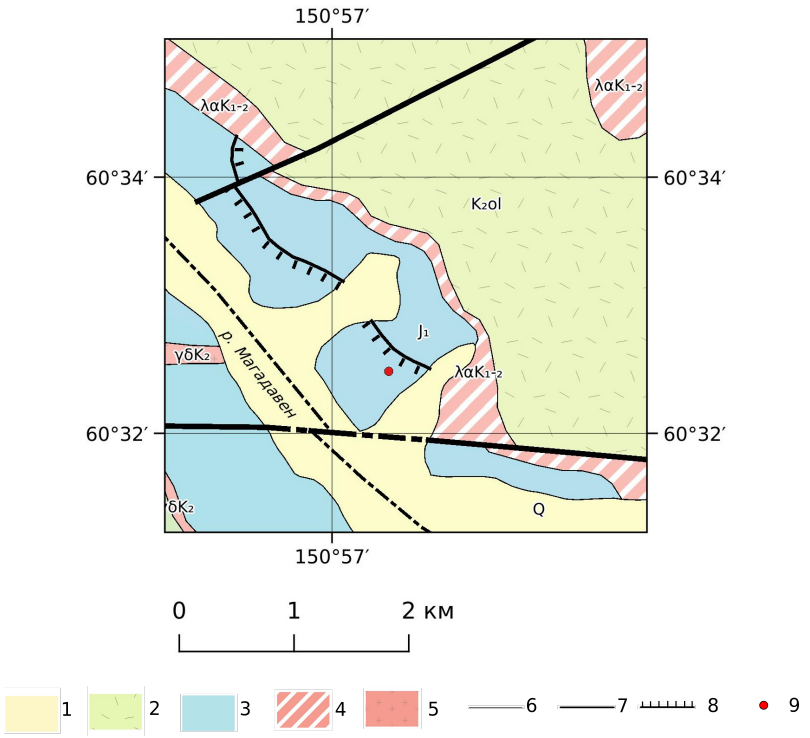
1 — четвертичные отложения; 2 — песчаники конгломераты, андезиты, андезибальты арманской свиты верхнего мела; 3–5 — осадочные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 6–8 — осадочные отложения триасового возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 9 — гранитные и гранодиоритовые интрузии мелового возраста; 10 — геологические границы; 11 — разломы; 12 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.4 Схема геологического строения верховья бассейна р. Армань и восстановленные направления осей сжатия и растяжения в пунктах геолого-структурных наблюдений. Геологическая карта по [Корольков и Королькова, 1992]

3.1.3 Участок «Магадавен»

Расположен в пределах южного выступа Хасын-Магадавенского поднятия по [Аноров и др., 2001], где обнажен фрагмент Дондычан-Нелканджинской бра-

хисинклинали (рисунок 3.5). Борт синклинали на участке сложен песчаниками с прослоями мелкогалечных конгломератов таборнинской раннеюрской свитой с прослоями силлов риолитов ольской свиты. На востоке складка перекрывается отложениями андезитов нанкалинской толщи. На юго-западе структура надвинута на арманскую свиту. В целом ось складки вытянута в северо-западном направлении с центриклинальным залеганием слоев под углами 15–45°[Аноров и др., 2001].



1 — четвертичные отложения; 2 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты; 3 — осадочные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 4 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 5 — гранитные и гранодиоритовые интрузии мелового возраста; 6 — геологические границы; 7 — разломы; 8 — надвиг; 9 — пункт геолого-структурных наблюдений.

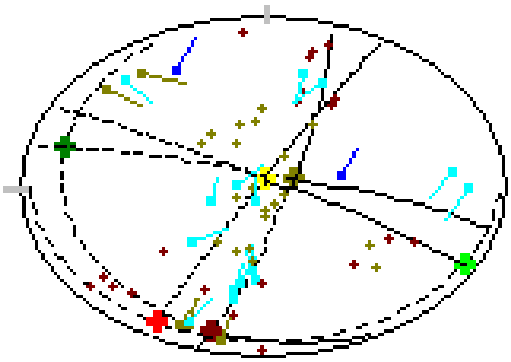
Рисунок 3.5 Схема геологического строения бассейна р. Магадавен по [Аноров и др., 2001]

В междуречье Иганда - Магадавен структура осложнена зоной разрывных нарушений чешуйчатого строения надвигового типа северо-западного простирания (310°–320°) с наклоном сместителя к северо-востоку под углами 30°–60°[Осипов, 1975]. Длина зоны составляет 10 км, мощность милонитизированных и раздробленных по сместителю пород, не превышает 1 м. K-Ar возраст

андезидацитов, выполняющих местами пологопадающую разломную зону, определён в 89 млн лет [Осипов, 1975].

Согласно [Аноров и др., 2001], горизонтальное перемещение по надвигу составляет 2–4 км. Мелкая чешуя в тыловой части надвига сложена алевролитами триаса, надвинутыми на отложения нижней и средней юры.

В бассейне р. Мадагавен мы провели массовые замеры тектонической трещиноватости, а также измерения ориентировок и направлений борозд в милонитизированных зеркалах скольжения в среднеюрских песчаниках (рисунок 3.6). В массиве данных об ориентировке тектонической трещиноватости не выявлено статистически достоверных смещений максимумов, в то время как набор ориентировок зеркал скольжений позволил оценить ориентировку осей сил сжатия и растяжения, соответственно, как 15°(угол падения 9°) и 243°(угол падения 76°).



Значения цветов на стереограмме см. на стр. 28

Рисунок 3.6 Стереограмма распределения зеркал скольжения милонитизированной зоны вокруг сместителя Магадавенского надвига. Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b]

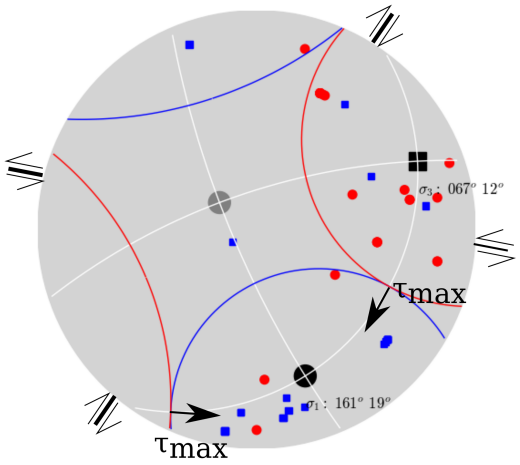


Рисунок 3.7 Стереограмма напряжённого состояния для складчатых структур Армано-Вилигинского синклинория (сетка Вульфа, нижняя полусфера)

Восстановленные ориентации осей σ_1 и σ_3 в складчатых структурах Армано-Вилигинского синклинория показаны на стереограмме напряжённого состояния (рисунок 3.7, таблица 3.2). Положения осей σ_1 и σ_3 описываются конусами сжатия и растяжения с осями, ориентированными 161°(азимут) 19°(угол наклона) и 67°(азимут) 12°(угол наклона) соответственно. Подбор ориентации конусов сжатия и растяжения производился методом наименьших квадратов (см. стр. 32). Следует отметить что в трех случаях ось σ_1 попала в конус сжатия — одно из таких решений было получено на участке «Хета», другое на участке «Армань». Кроме того, такое решение было получено для пункта геолого-структурных наблюдений, непосредственно расположенных в близи крупного «Магадавенского» надвига. Положение плоскостей действия максимальных касательных напряжений хорошо согласуется с ориентацией северо-восточных и северо-западных систем разломов, активно проявленных на территории. На основе изложенного выдвигается защищаемое положение 1.

Для складчатых структур Армано-Вилигинского синклинория характерны четко выраженные напряженные состояния типа горизонтальный сдвиг с осью сжатия в субширотном направлении (аз. 67, угол 12) и растяжения в субмеридиональном направлении (аз. 161, угол 19).

Таблица 3.2 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в складчатых структурах Армано-Вилигинского синклинория

		Ориентация оси		Плоскости макс. касательных напряжений		
	Участок	растяжение	сжатия	τ^1_{max}	τ^2_{max}	μ_σ
1	Магадавен	242°76°	15°8°	182°36°	23°55°	0.0
2	хт-01	171°9°	82°10°	307°76°	216°89°	
3	хт-02	185°10°	95°11°	320°75°	229°89°	
4	хт-03	172°8°	79°19°	306°70°	214°82°	
5	хт-04	171°7°	80°12°	306°76°	215°86°	
6	хт-05	340°6°	71°4°	205°82°	115°88°	
7	хт-06	187°3°	94°24°	323°70°	228°75°	
8	хт-07	194°14°	95°32°	329°57°	231°78°	
9	хт-08	188°9°	91°22°	321°66°	228°81°	
10	ар-01	195°9°	102°10°	328°76°	238°89°	
11	ар-02	78°32°	171°5°	309°63°	210°71°	
12	ар-03	22°21°	128°40°	247°45°	349°78°	
13	ар-04	32°14°	140°46°	253°45°	2°71°	
14	ар-05	164°12°	69°20°	297°67°	205°84°	
15	ар-06	131°14°	35°21°	264°64°	172°85°	
16	ар-07	125°12°	29°18°	257°68°	166°85°	
17	ар-08	125°11°	31°24°	260°65°	166°81°	
18	ар-09	131°18°	35°20°	263°62°	172°88°	
19	ар-10	123°13°	28°25°	257°63°	163°81°	
20	ар-11	128°14°	33°21°	261°64°	169°85°	
21	ар-12	118°13°	22°22°	252°64°	159°84°	
22	ар-13	132°14°	37°21°	265°64°	173°85°	
23	ар-14	82°14°	176°21°	308°64°	40°85°	

Значения μ_σ приведены только для решений полученных в программе StressGeol.

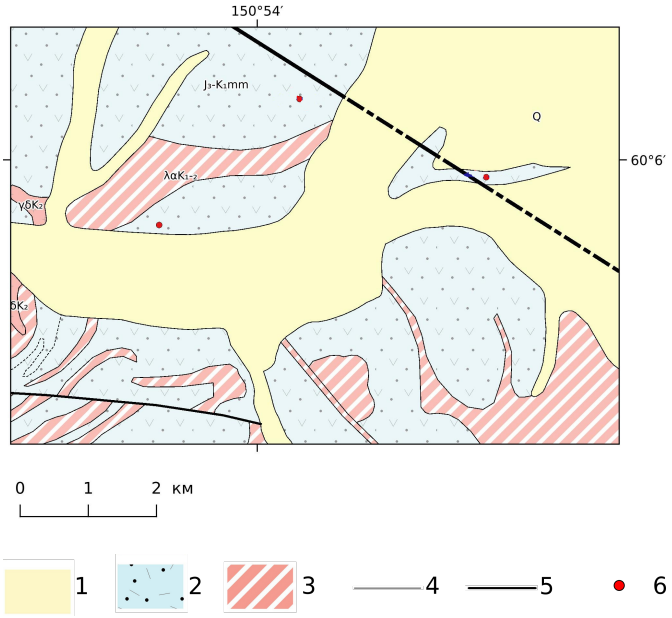
3.2 Вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги

В пределах вулкано-тектонических структур Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги изучение тектонической трещиноватости выполнялось на трёх участках в вулканитах момолтыкичской свиты, прорванных меловыми субвулканитами («Хасын», «Ойра»), и в береговых обнажениях меловых гранитоидных интрузий Магаданского батолита («Магадан-1»).

3.2.1 Участок «Хасын»

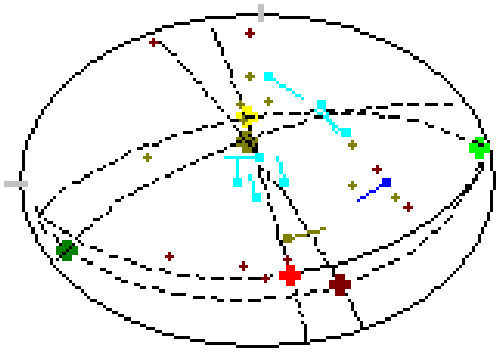
Расположен в бассейне одноименной реки в окрестностях пос. Палатка Магаданской области (рисунок 3.8). Согласно [Аноров и др., 2001], территория участка сложена туфогравелитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами с горизонтами андезитов и их туфов момолтыкичской свиты позднеюрско-раннемелового возраста, которые прорваны меловыми субвулканитами. Мощность стратифицированных отложений момолтыкичской свиты на территории достигает 700 м. Участок находится в зоне влияния Челомджа-Ямского глубинного разлома.

Пункты геолого-структурного изучения располагались в обнажениях вулканитов момолтыкичской свиты, расположенных на правобережье р. Хасын. Слои слабо дислоцированы, залегают субгоризонтально. На диаграммах массовых замеров тектонических трещин не было выделено статистически достоверных сопряженных трещин. На рисунке 3.9 показаны ориентировки зеркал скольжения с направлениями смещений. Направление осей сжатия и растяжения, восстановленное по ним, указывает на напряженное состояние горизонтального сжатия с осью сжатия ориентированной по азимуту 315°.



1 — четвертичные отложения; 2— андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты момолтыкичской свиты верхней юры - нижнего мела; 3 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 4 — геологические границы; 5 — разломы; 6 — пункты геолого-структурных наблюдений;

Рисунок 3.8 Расположение пунктов геолого-структурных наблюдений на участке «Хасын» Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

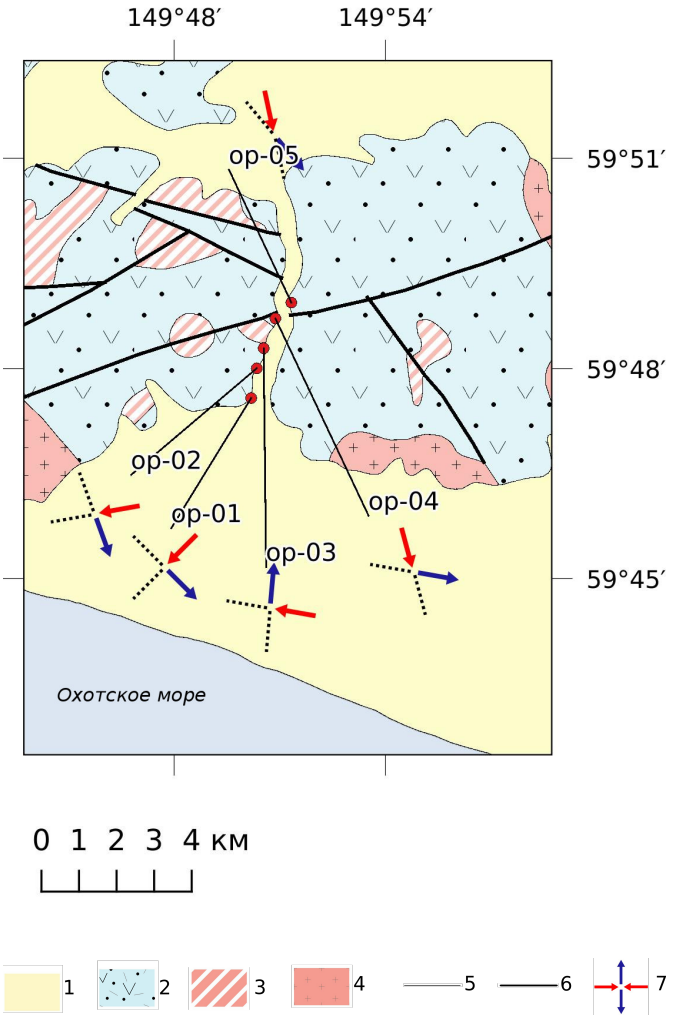


Значения цветов на стереограмме см. на стр. 28

Рисунок 3.9 Стереограмма распределения зеркал скольжения в отложениях момолыкичской свиты на участке «Хасын». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b]

3.2.2 «Участок Ойра»

Расположен в бассейне р. Ойра, пересекающей в субмеридиональном направлении Арманский хребет в 10 км от побережья Охотского моря (рисунок 3.10).



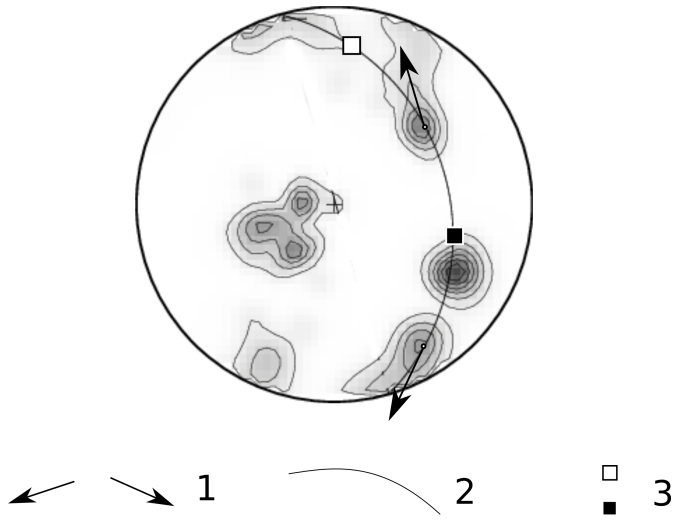
1 — четвертичные отложения; 2 — андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты момолтыкичской свиты верхней юры - нижнего мела; 3 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 4 — гранитные и гранодиоритные интрузии мелового возраста; 5 — геологические границы; 6 — разломы; 7 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.10 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Ойра». Геологическая карта по [Юдин, 1969]

Согласно [Юдин, 1969], территория участка «Ойра» сложена вулканитами момолтыкичской свиты, подстилающей вулканические образования ОЧВП. Свита с угловым несогласием перекрывает верхнетриасовые и юрские толщи. В нижней части располагается пачка переслаивающихся алевролитов, песчаников, гравелитов, конгломератов, кремнистых туфов, туфоалевролитов и туфопесчаников. Большей частью свита сложена андезитами, андезибазальтами, базальтами, туфами андезитов и андезибазальтов, а также переслаивающимися андезидацитами, дацитами, риолитами, туфами риолитов и риодацитов, туфопесчаниками, туфоалевролитами. В средней части свиты существенное значение имеют туфоалевролиты и аргиллиты, присутствуют пласты каменного угля. Мощность свиты на исследованном участке достигает 400 м.

В силу плохой обнажённости горных пород в пределах долины р. Ойра, подходящих для геолого-структурных наблюдений, было выбрано пять пунктов, в каждом из которых был проведен массовый замер элементов тектонической трещиноватости. Положение пунктов и полученные для них локальные стресс-состояния представлены на рисунке 3.10. На рисунке 3.11 приведен пример матрицы плотности трещиноватости для пункта наблюдений ор-03, на которой хорошо проявлено две системы сопряженных трещин в виде ассиметричных полей плотности трещиноватости, которые отстают друг относительно друга на угол близкий к 90°. Выделенные системы сопряженных трещин соответствуют критерию χ^2. Сопряженные системы трещиноватости лежат в кинематической плоскости, и разрбросы плотности трещиноватости также направлены вдоль этой плоскости с отклонением под небольшим углом. Перпендикулярно к кинематической плоскости проявлена еще одна система трещиноватости, которая вместе с сопряженными системами трещиноватости составляет тройственный парагенезис. Оси σ_1 и σ_3 располагаются на кинематической плоскости так, чтобы сопряженные системы трещиноватости лежали в биссектрисе их угла.

Ориентировки осей сжатия и растяжения на участке «Ойра» близки к ориентировкам осей сжатия и растяжения складчатого основания ОЧВП, ось растяжения направлена субмеридионально. Угол падения оси сжатия на север достигает 40°, что говорит о наличии в поле напряжений на данной территории напряженных состояний горизонтального растяжения.



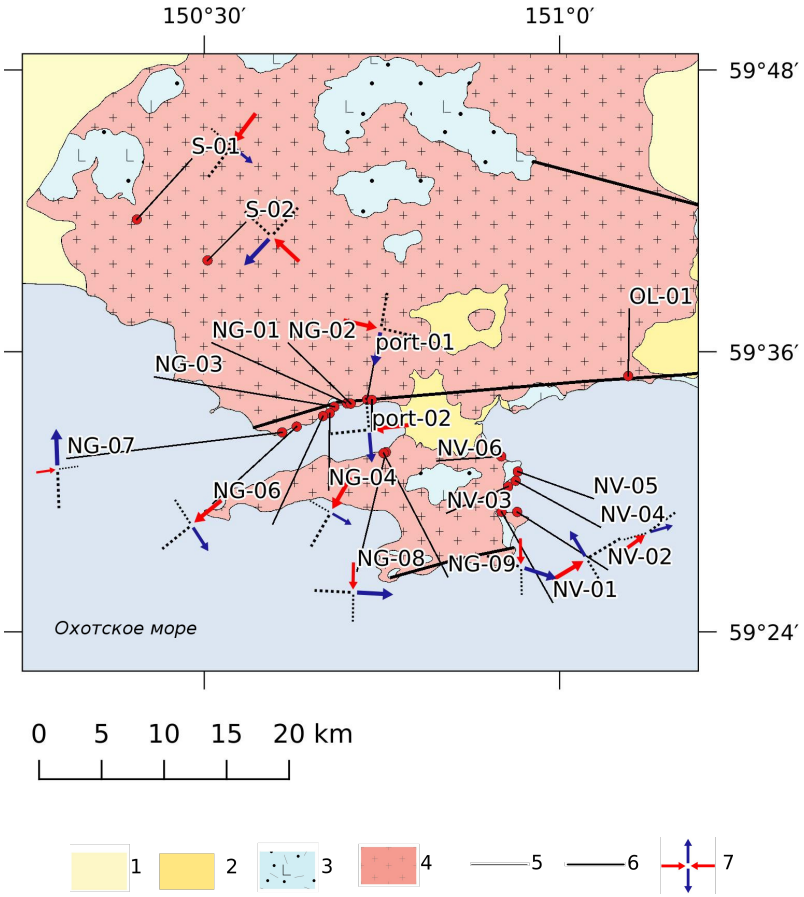
1 — асимметричные разбросы плотнотности трещиноватости; 2 — главная кинематическая плоскость; 3 —выходы осей σ_1 и σ_3.

Рисунок 3.11 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтка геолого-структурных наблюдений «ор-03». Сетка Вульфа, верхняя полусфера.

3.2.3 Участок «Магадан-1»

Расположен на побережье Охотского моря в районе г. Магадан в пределах Магаданского гранитоидного массива (батолита) (рисунок 3.12). Интрузивные породы прорывают вулканогенные толщи позднеюрско-раннемелового возраста. Площадь выхода на поверхность интрузивных пород составляет приблизительно 1550 км^2. Батолит представляет собой сложно построенный многофазный гетерогенный интрузивный массив [Трушнин и Изох, 1991]. В нём выделяется наиболее ранний венцовый, существенно габброидный комплекс и шесть сменяющих одна другую гомодромных ассоциаций гранитоидов. Вмещающие вулканические образования Удско-Мургальской дуги позднеюрского - раннемелового возраста образуют мощные линзы вулканитов кислого состава в кровле батолита, а на удалении от него они уступают место вулканитам среднего и основного состава.

Трещинная сеть в изученных обнажениях обладает характерным обликом, а именно: ярко выраженным поясом вращения трещиноватости. При этом вся совокупность трещин на каждом обнажении лежит исключительно в одном поясе.



1 — четвертичные отложения; 2 — конгломераты, песчаники, аргиллиты, алевролиты неогенового возраста; 3 — андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты момолтыкичской свиты верхней юры - нижнего мела; 4 — гранитные и гранодиоритные интрузии мелового возраста; 5 — геологические границы; 6 — разломы; 7 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.12 Схема расположения точек измерения тектонической трещиноватости на участке «Магадан-1». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

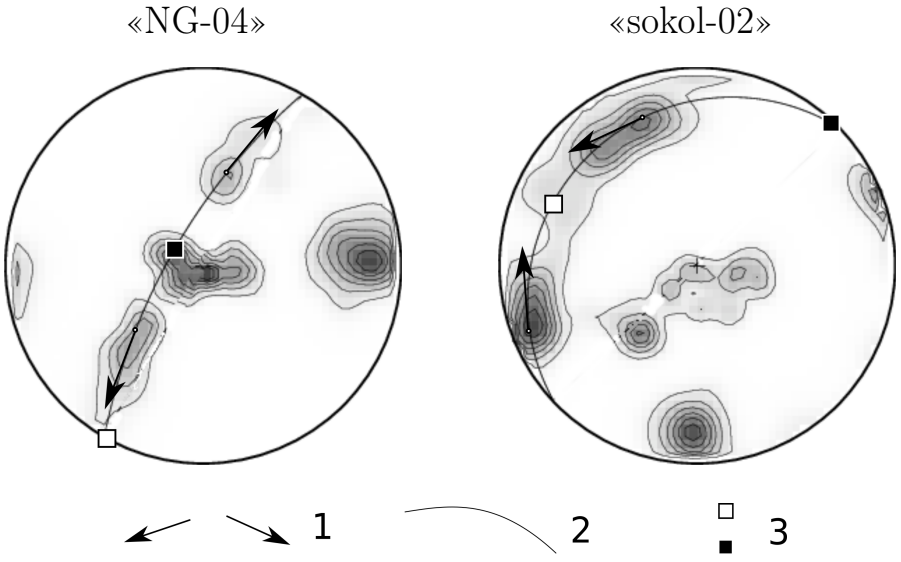
Иногда средний по интенсивности максимум плотности распределения трещин формируется вблизи оси пояса вращения (см. рисунок 3.13). Исключение составляют трещины только четырёх пунктов наблюдений в районе бух. Весёлая, где в двух пунктах трещины образованы сочетанием двух разноориентированных поясов вращения, а в двух других — тремя примерно ортогональными друг другу системами трещин.

По ориентировке пояса вращения пункты разделяются следующим образом: в интрузивах батолита ось пояса падает на юго-запад. Во всех без исключения

пунктах наблюдений во вмещающих вулканитах Удско-Мургальской дуги ось пояса падает на юго-восток. Пункты наблюдений, расположенные в северной части батолита в бассейне р. Уптар, а также в западной части на левобережье р. Армань, так же имеют пояс трещиноватости, падающий на юго-восток. При этом в таких отдалённых участках облик трещиноватости остаётся одинаковым как в юрских отложениях, так и в интрузивах батолита.

Напряжения, реконструированные в каждом из пунктов, представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.12. Из полученных данных видно, как резко контрастно представлены здесь результаты, полученные для пунктов, находящихся в пределах выходов пород Кони-Мургальской островодужной системы. Трещинная сеть здесь образовалась в условиях действия наибольшего горизонтального сжатия в субмеридиональном направлении.

Напряженные состояния, восстановленные для отдельных интрузивных тел Магаданского батолита, имеют сдвиговый и сбросовый характер с преимущественно субмеридиональным направлением оси растяжения.



1 — асиметричные разбросы плотнотности трещиноватости; 2 — главная кинематическая плоскость; 3 —выходы осей σ_1 и σ_3.

Рисунок 3.13 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтков геолого-структурных наблюдений «NG-04», «sokol-02». Сетка Вульфа, верхняя полусфера.

Таблица 3.3 Пункты наблюдений в окрестностях Магаданского батолита и реконструкция стресс состояний

	Ориентация оси			
Пункт	сжатия	растяжения	Аз. пад. пояса	Тип стресс состояния
port-01	283°∠10°	190°∠12°	юго-запад	гор. сдвиг
port-02	84°∠02°	175°∠32°	юго-запад	гор. сжатие со сдвигом
NG-01	—	—	юго-запад	—
NG-02	—	—	юго-запад	—
NG-04	30°∠00°	120°∠71°	юго-восток	гор. сжатие
NG-05	—	—	юго-запад	—
NG-06	51°∠07°	147°∠41°	юго-восток	гор. сжатие со сдвигом
NG-07	262°∠84°	358°∠00°	юго-запад	гор. растяжение
NG-08	1°∠46°	93°∠01°	юго-восток	гор. растяжение со сдвигом
NG-09	—	—	—	—
NV-01	—	—	юго-восток	—
NV-02	—	—	—	—
NV-03	239°∠00°	329°∠34°	юго-запад	гор. сжатие со сдвигом
NV-04	359°∠52°	108°∠14°	юго-запад	гор. растяжение со сдвигом
NV-05	231°∠24°	74°∠64°	юго-восток	гор. сжатие
NV-06	—	—	—	—
OL-01	—	—	юго-запад	—
OL-02	—	—	юго-запад	—
OR-06	283°∠06°	189°∠30°	юго-восток	гор. сжатие со сдвигом
OR-07	—	—	—	—
sokol-01	37°∠01°	130°∠57°	юго-восток	гор. сжатие со сдвигом
sokol-02	133°∠13°	223°∠01°	юго-восток	гор. сдвиг
sokol-03	—	—	юго-восток	—

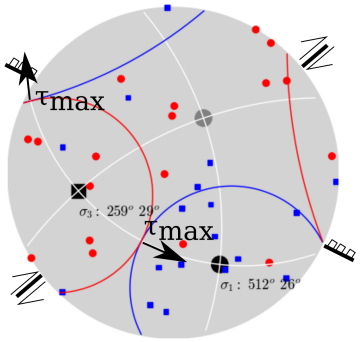


Рисунок 3.14 Стереограмма напряжённого состояния в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги (сетка Вульфа, нижняя полусфера)

Восстановленные ориентации осей σ_1 и σ_3 в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги показаны на стереограмме напряженного состояния (рисунок 3.14, таблица 3.4). Для комплекса напряженных состояний, восстановленных в обнажениях в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны, также не удалось подобрать ориентацию конуса растяжения так, чтобы в него не попали выходы осей сжатия, полученных для некторых пунктов геолого-структурных наблюдений. Вместе с тем, для напряженных состояний характерна устойчивая ориентация оси конуса σ_1 (азимут 152°, угол наклона 26°) и некоторый разброс ориентировок оси σ_3 с общей ориентацией оси конуса (азимут 259°, угол наклона 29°). Из этого следует защищаемое положение 2.

Структурам Удско-Мургальской дуги свойственны напряженные состояния типа горизонтальное растяжение со сдвигом с осью сжатия в северо-восточном направлении (аз. 259, угол 29) и осью растяжения — в северо-западном (аз. 152, угол 26).

Таблица 3.4 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги

		Ориентация оси		Плоскости макс. касательных напряжений		
	Участок	растяжение	сжатия	τ^1_{max}	τ^2_{max}	μ_σ
1	Хасын	166°65°	331°24°	138°21°	335°69°	-0.11
2	op-01	142°24°	45°14°	272°62°	6°83°	
3	op-02	151°22°	261°36°	21°45°	119°82°	
4	op-03	182°10°	281°39°	44°55°	148°71°	
5	op-04	283°21°	171°43°	57°42°	312°76°	
6	op-05	132°4°	225°21°	357°72°	90°78°	
7	op-06	189°30°	282°6°	60°64°	322°73°	
8	port-01	189°12°	283°10°	56°74°	326°88°	
9	port-02	174°32°	84°1°	304°66°	44°69°	
10	ng-04	119°71°	30°0°	228°48°	11°48°	
11	ng-06	146°41°	50°7°	270°56°	15°67°	
12	ng-07	358°0°	261°83°	172°45°	3°45°	
13	ng-08	92°1°	1°46°	237°58°	127°60°	
14	nv-03	329°34°	238°0°	98°66°	199°66°	
15	nv-04	107°14°	359°52°	250°43°	134°67°	
16	nv-05	74°64°	231°24°	32°22°	238°69°	
17	sokol-01	130°57°	37°1°	246°52°	9°54°	
18	sokol-02	222°1°	133°13°	358°80°	267°81°	

Значения μ_σ приведены только для решений полученных в программе StressGeol.

3.3 Вулканоструктуры ОЧВП

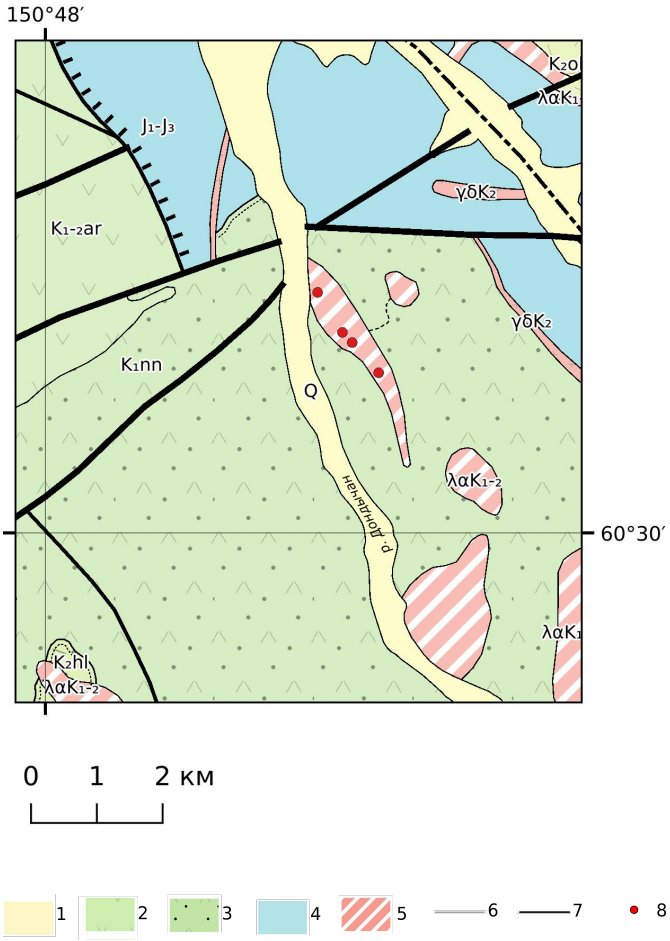
Тектоническая трещиноватость вулканоструктур изучалась в пределах Хасынского звена ОЧВП в обнажениях меловых вулканитов на участках «Дондычан», «Колхида», «Нелькандж», «Ола», «Карамкен».

3.3.1 Участок «Дондычан»

Расположен в верховье р. Дондычан (басс. р. Армань). По данным геологического картирования масштаба 1 : 200 000, изученный район находится в северо-восточной части Арманской вулканоструктуры ОЧВП [Аноров и др., 2001]. В его строении принимают участие, главным образом, вулканические покровы и субвулканические тела мелового возраста, которые сложены андезитами, андезибазальтами, дацитами и их туфами. Широко распространены разрывные нарушения, часть из которых обнаруживает явные признаки современной активности. Наиболее крупный из них проходит вдоль правого борта р. Дондычан, к нему приурочен комплекс палеосейсмодислокаций [Смирнов и др., 2018].

Для восстановления напряженного состояния, на стенке отрыва сейсмогенного скального оползня и в непосредственной близости от него была изучена сеть трещиноватости (рисунок 3.15). Замеры трещиноватости были проведены только в субвулканических породах нанкалинского комплекса, слагающих палесейсмодислокацию. В каждой из точек выполнен комплекс структурно-кинематических исследований и массовые замеры элементов залегания. При измерении залегания трещин учитывались трещины, расположенные в пределах элементарной площади 10 м в длину и до 5 м в высоту. Предельные значения площади элементарной ячейки выбраны для того, чтобы не включать в анализ трещины, сформированные в различных кинематических обстановках.

Особое внимание уделялось поиску зеркал скольжения (как индикатору последних сильных подвижек) непосредственно на стенке палеосейсмодислокации. На всей протяженность обнаженной стенки найдено 18 зеркал с видимыми



1 — четвертичные отложения; 2 — песчаники конгломераты, андезиты, андезибальты нерасчлененных отложений арманской свиты нижнего-верхнего мела; 3 — андезиты, андезибазальты, дациты, туфы андезитов, дацитов нанкалинской толщи нижнего мела; 4 — стратифицированные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 5 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 6 — геологические границы; 7 — разломы; 8 — пункты геолого-структурных наблюдений;

Рисунок 3.15 Схема расположения точек измерения тетонической трещиноватости на участке «Дондычан». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

бороздами скольжения. Среди всего массива трещин трудно выделить отдельные направления, связанные со сдвиговыми (в механическом смысле) движениями. На диаграммах трещиноватости, построенных на основе массовых измерений элементов падения трещин, статистически достоверные сопряжённые системы трещиноватости также не выявлены.

В связи с этим на диаграмме представлены только результаты замеров зеркал скольжения (рисунок 3.16). Информация о направлении перемещения имеется на 18 зеркалах скольжения. С помощью программы StressGeol [Ребецкий

и др., 2017b] было выделено два этапа деформации которым соответствуют следующие напряженные состояния: вертикальный сдвиг с ориентировкой осей сжатия и растяжения 148°48°и 322°42°; и горизонтальное растяжение с ориентировкой осей сжатия и растяжения 42°53°и 194°33°соответственно.

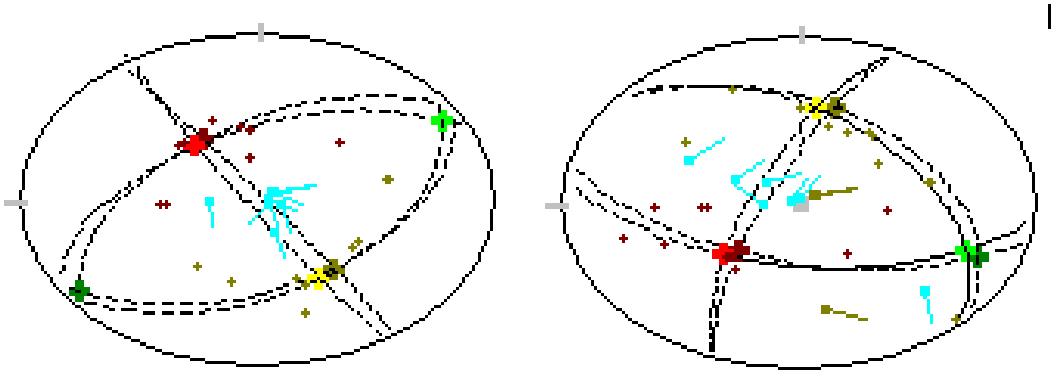
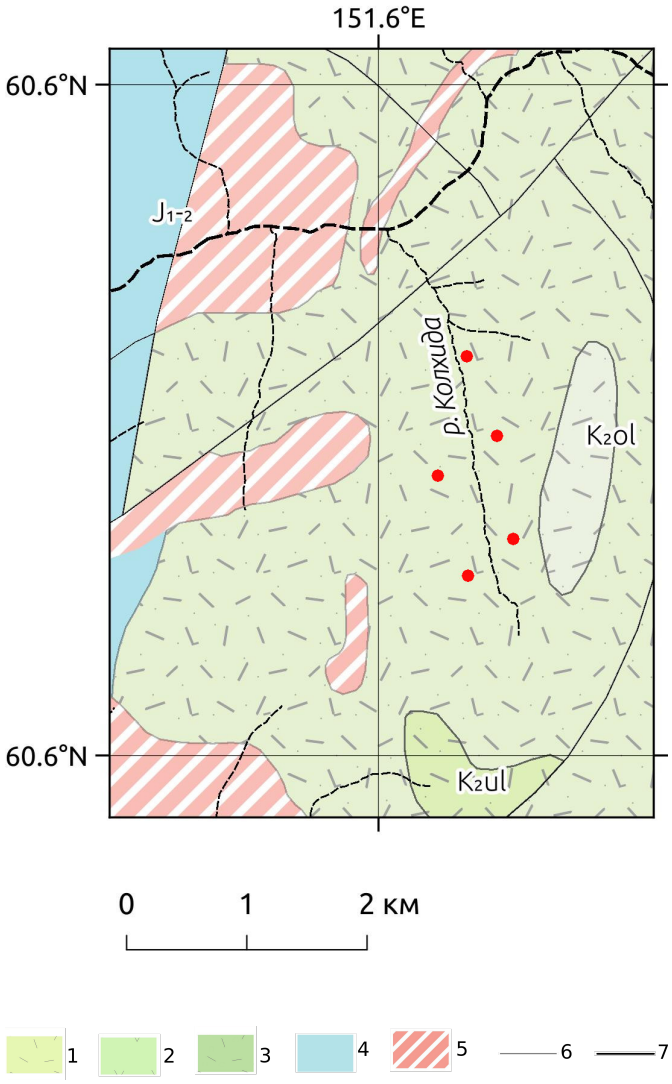


Рисунок 3.16 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Дондычан». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b]

3.3.2 Участок «Колхида»

Участок расположен вблизи золото-серебряного месторождения Колхида в Верхне-Малтанской интрузивно-купольной структуре в верховьях одноименного ручья (рисунок 3.17). Указанная структура сложена в основном туфами и игнимбритами кислого состава верхнемеловой хольчанской свиты. Стратифицированные отложения залегают полого с небольшим периклинальным наклоном до 10–20°относительно ядра структуры [Аноров и др., 2001].



1 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты верхнего мела; 2 — песчаники конгломераты, андезиты, андезибальты нерасчлененных отложений арманской свиты нижнего-верхнего мела; 3 — андезиты, андезибазальты, дациты, туфы андезитов, дацитов улынской толщи верхнего мела; 4 — стратифицированные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 5 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 6 — геологические границы; 7 — разломы;

Рисунок 3.17 Схема размещения пунктов изучения тектонической трещиноватости (показаны черным точками) на участке «Колхида». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

Массовые замеры трещиноватости проводились в туфах и игнимбритах риолитов хольчанской свиты, а также в обнаруженных многочисленных кварц-карбонатных прожилках с бороздами скольжения. Статистически достоверных смещений максимумов на матрицах плотности тектонической трещиноватости

обнаружено не было, однако разнонаправленные ориентировки зеркал скольжений позволили восстановить напряжённые состояния (см. рисунок 3.18). Тип напряженного состояния горизонтально растяжения с ориентацией осей растяжения и сжатия 361°8°и 96°60°соответственно.

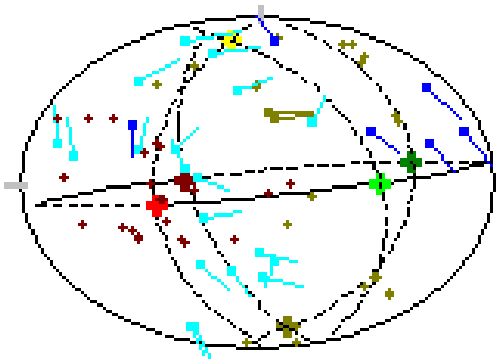


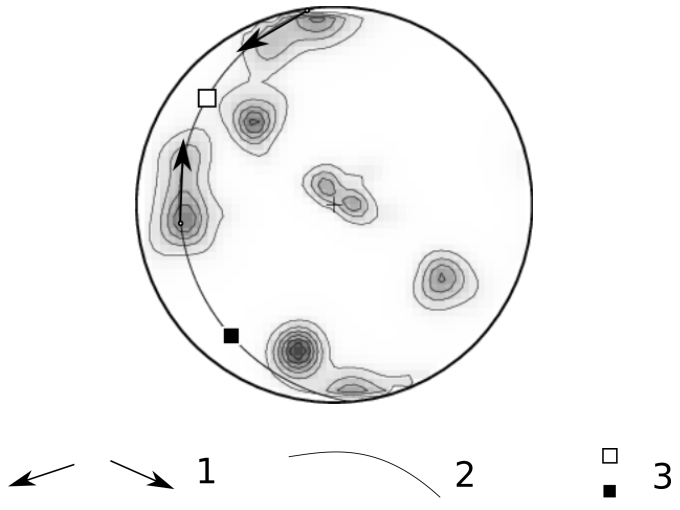
Рисунок 3.18 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Колхида». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b]

3.3.3 Участок «Нелькандж»

Участок расположен в бассейне р. Нелькандж и, по данным геолого-съемочных работ [Аноров и др., 2001], сложен вулканитами кирикской толщи, с размывом залегающими на момолтыкичской свите. Толща сложена туфоконгломератами, туфопесчаниками, алевролитами, аргиллитами, иногда содержит прослои каменных углей, а также туфы кислого состава, чередующиеся с маломощными пачками туфогенно-осадочных пород. Мощность толщи на исследованном участке составляет 350 м. Дислоцированность отложений незначительна, углы падения не превышают 20°. Кирикская толща без видимого углового несогласия перекрывается вулканитами нанкалинской толщи, сложенной преимущественно андезитами, андезибазальтами и присутствующими в подчинённом количестве туфами андезитов, дацитов и риодацитов, дацитовых игнимбритов. Залегание толщи практически горизонтальное. Кирикская толща согласно перекрывается вулканитами арманской свиты [Аноров и др., 2001].

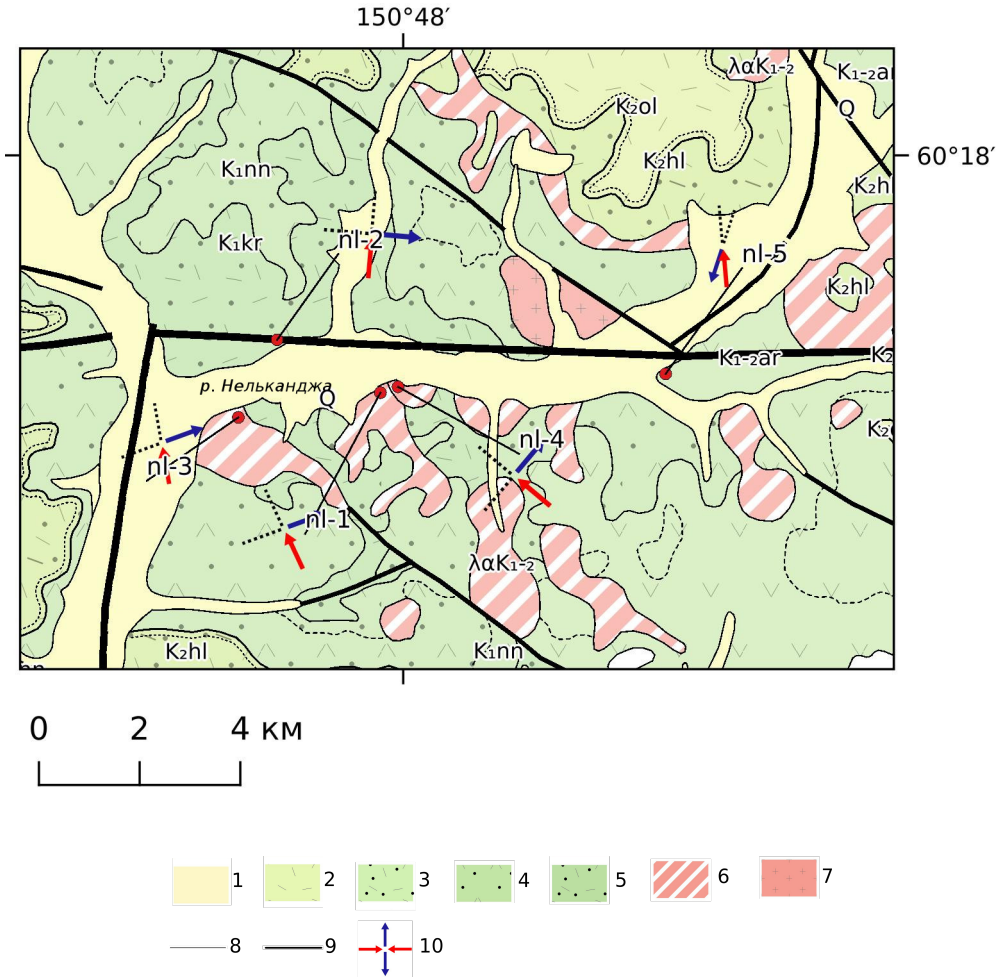
На изученном участке было выбрано 5 пунктов геолого-структурных наблюдений, в каждом из которых был проведен комплекс структурно-кинематических исследований и произведены массовые замеры элементов залегания. По каждому пункту были построены матрицы плотности распределения трещиноватости, по которым были выделены сопряжённые пары и восстановлены ориентировки осей сжатия и растяжения по методам Гзовского и Николаева. Пример облика трещиноватости на участке представлен на рисунке 3.19, где выделяется сопряженная пара систем трещиноватости, удовлетворяющих критерию χ^2, направления смещений плотности трещиноватости в которых направлены вдоль кинематической плоскости. Хотя угол между максимумами плотности сопряженных систем трещиноватости близок к 90°, в этом пункте не проявлена третья система трещиноватости, перпендикулярная двум сопряженным.

Напряжённые состояния, полученные для каждой из точек, представлены на рисунке 3.20. Все полученные решения относятся к полю напряжений сдвигового типа (угол падения осей сжатия и растяжения не превышает 15°). При этом следует отметить, что ось растяжения ориентирована в северо-западном направлении, в то время как в структурах складчатого основания пояса она ориентирована субширотно.



1 — асимметричные разбросы плотнотности трещиноватости; 2 — главная кинематическая плоскость; 3 —выходы осей σ_1 и σ_3.

Рисунок 3.19 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтка геолого-структурных наблюдений «nl-04». Сетка Вульфа, верхняя полусфера.



1 — четвертичные отложения; 2 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты верхнего мела; 3 — туфы, игнимбриты дацитов, риодацитов и риолитов хольчанской свиты верхнего мела; 4 — песчаники конгломераты, андезиты, андезибальты нерасчлененных отложений арманской свиты нижнего-верхнего мела; 5 — андезиты, андезибазальты, дациты, туфы андезитов, дацитов нанкалинской толщи нижнего мела; 6 — субвулканические тела кислого состава мелового возраста; 7 — гранитные и гранодиоритные интрузии мелового возраста; 8 — геологические границы; 9 — разломы; 10 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.20 Локальные стресс-состояния в изученных пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Нелькандж а». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

3.3.4 Участок «Ола»

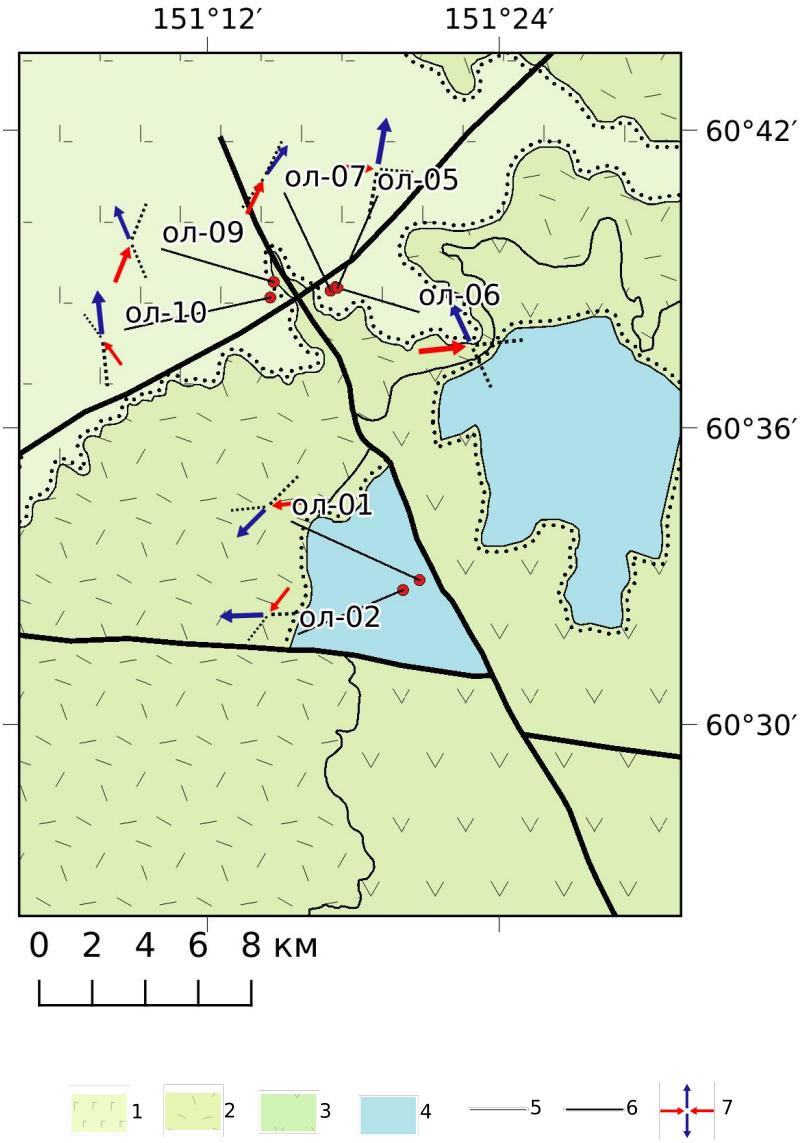
В верховье р. Ола, впадающей в Охотское море, в 125 км к север-северо-востоку от г. Магадана была описана крупная гравитационная палеосейсмодислокация [Важенин, 2000; Смирнов и др., 2013]. Она представлена скальным оползнем, сошедшим с левобережного горного склона и своей раздробленной частью перекрывшим долину р. Ола. Долина р. Ола имеет чётковидный облик в плане с чередованием расширений и теснин, что характерно для речных долин, заложенных по разломам сдвиговой кинематики.

По данным геологического картирования [Корольков и Королькова, 1992], в строении района принимают участие два вулканогенных комплекса позднемелового возраста: ольский, сложенный риолитами, риодацитами, дацитами, и перекрывающий его со стратиграфическим и небольшим угловым несогласием мыгдыкитский комплекс, сложенный базальтами. Важнейшим структурным элементом района является Ольский активный разлом, вдоль которого заложена долина р. Ола. Он является юго-восточным звеном Чай-Юрьинской зоны активных разломов северо-западного простирания, который прослеживается от бассейна р. Индигирка до Тауйско-Ямской системы межгорных впадин [Смирнов, 1995b].

Стенка отрыва сейсмогенного сбросо-обвала врезана в горный склон в интервале высот 1200–980 м и имеет уклон около 35°. На высоте примерно 980 м она переходит в слабо наклоненную к юго-западу плоскость скольжения оползня, которая ограничена крутым уступом высотой 40 м. Ниже залегает обломочное тело оползня, которое на траектории своего движения заполняет всю левобережную часть долины р. Ола и в наиболее продвинутой части переходит на правый берег [Смирнов и др., 2013].

На участке в зоне Ольского активного разлома (рисунок 3.21). Выполнен массовый замер элементов залегания плоскостей тектонической трещиноватости в десяти пунктах: в вулканических комплексах ольской и мыгдыкитской свиты, как в плоскости отрыва сейсмооползня, так и вне её, на скальных выступах склона на противоположном берегу р. Ола. Кроме того, были выполнены массовые замеры элементов залегания в породах татынгычанской свиты юрско-

го возраста, обнажающейся в «окнах» среди вулканитов Охотско-Чукотского комплекса.



1 — базальты, андезибазальты, туфы базальтов, туфы риолитов мыгдыкитской свиты верхнего мела; 2 — игнимбриты риолитов, риодацитов, дацитов ольской свиты верхнего мела; 3 — туфы, игнимбриты дацитов, риодацитов и риолитов хольчанской свиты верхнего мела; 4 — стратифицированные отложения юрского возраста (аргиллиты, алевролиты, песчаники); 5 — геологические границы; 6 — разломы; 7 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

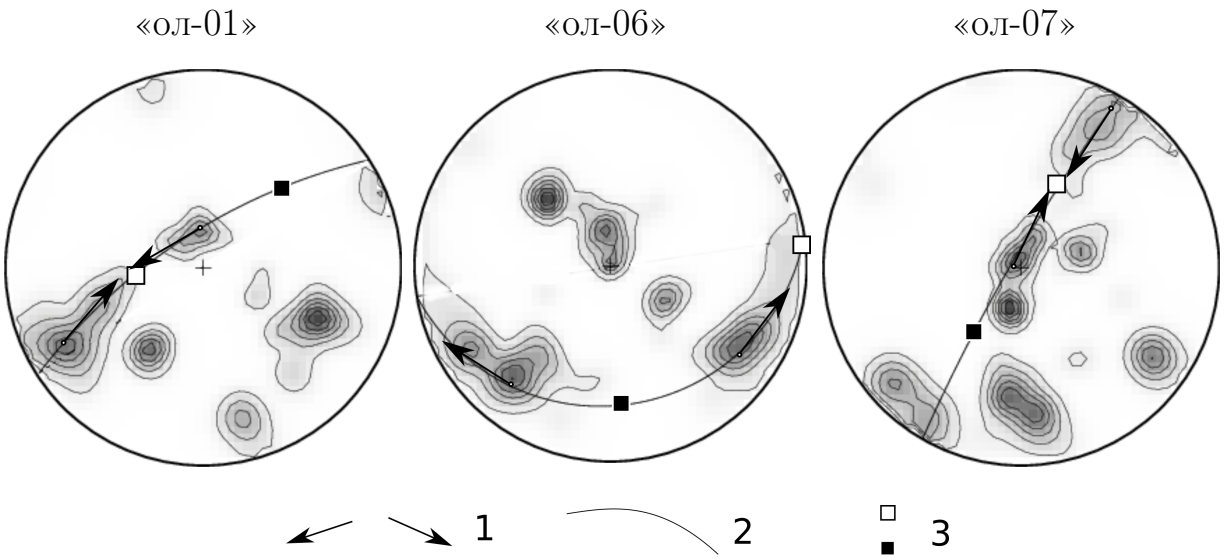
Рисунок 3.21 Локальные стресс-состояния в изученных пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Ола». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

Результаты анализа тектонической трещиноватости комплексом кинематических методов представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.21. Среди пунктов геолого-структурных наблюдений в большинстве были найдены системы сопряженных трещин, проявленные на стереограммах плотности трещиноватости закономерными смещениями максимумов лежащие на одной дуге большого круга и соответсвующие критерию χ^2. На рисунке 3.22 показан пример стереограммы плотности трещиноватости для пункта «ол-01» на котором разрброс на одном одна система сопряженных трещин проявлена сильнее чем другая. Угол между сопряженными системами 92°. На участке «ол-06» и перпендикулярно двум сопржяенным системам трещиноватости проявлена перпендикулярная система (см. рисунок 3.22), которая вместе с сопряженными системами создают тройственный парагенезис.

Таблица 3.5 Результаты анализа трещиноватости пунктов геолого-структурных наблюдений на уч. «Ола»

	Ориентация вектора	
№ Пункта	Сжатия	Растяжения
ол-01	84°∠51°	225°∠31°
ол-02	38°∠66°	268°∠15°
ол-03	233°∠62°	74°∠26°
ол-04	242°∠27°	12°∠51°
ол-05	95°∠55°	190°∠03°
ол-06	264°∠01°	355°∠19°
ол-07	206°∠42°	36°∠47°
ол-08	244°∠51°	69°∠38°
ол-09	202°∠35°	337°∠45°
ол-10	324°∠72°	174°∠14°

Для всего участка восстановленное поле напряжений соответствует сдвиговому типу, характерному для мезозойского складчатого основания ОЧВП на обширной территории. По результатам анализа трещиноватости судить о направлении сдвига по Ольскому разлому затруднительно, поскольку три из шести результатов соответствуют левосдвиговым смещениям и три — правосдвиговым.



1 — асиметричные разбросы плотнотности трещиноватости; 2 — главная кинематическая плоскость; 3 —выходы осей σ_1 и σ_3.

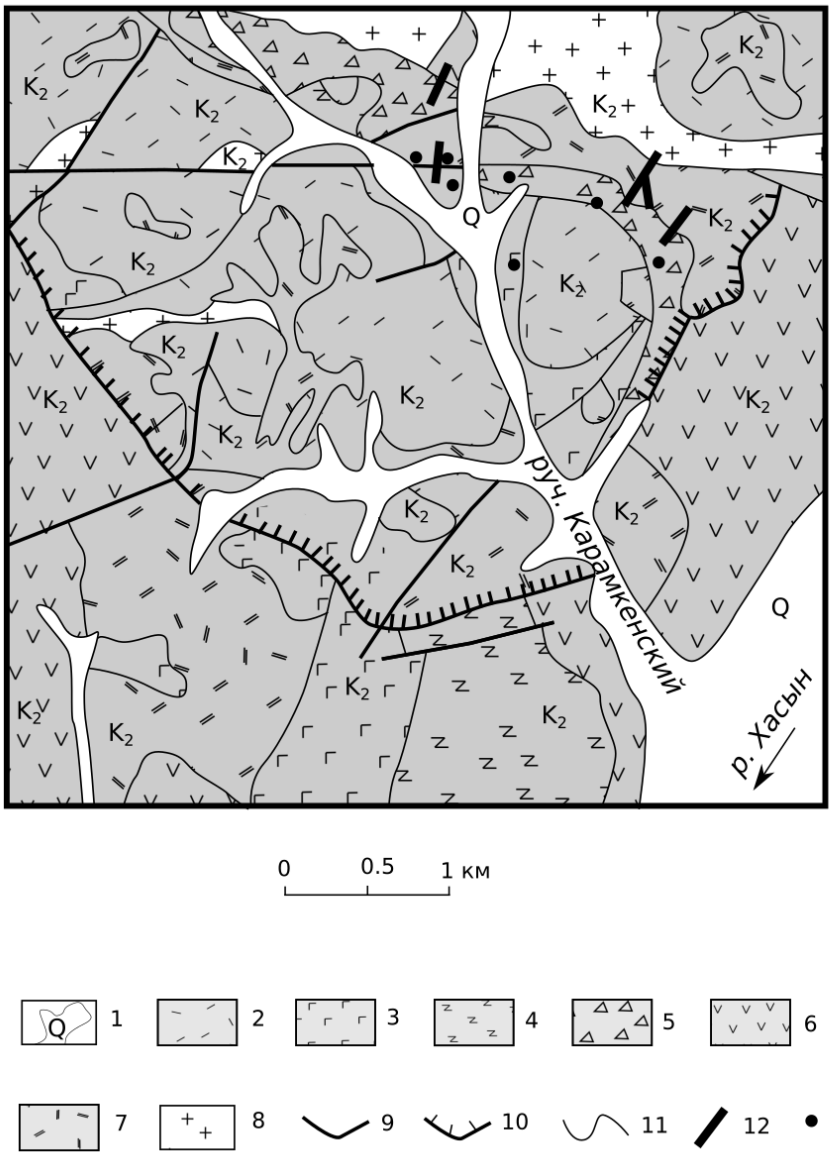
Рисунок 3.22 Стереограмма плотности трещиноватости для пунктов геолого-структурных наблюдений «ол-01», «ол-06», «ол-07». Сетка Вульфа, верхняя полусфера.

При этом для пунктов наблюдений по самой палесейсмодислокации восстановленное поле напряжений отвечает сбросовому типу с осями напряжений, ориентированными в северо-восточном направлении (см. «ол-07» на рисунке 3.22). Такое направление хорошо согласуется с экспозицией палеосейсмодислокации, т. е. направлениям распространения предполагаемого сейсмологического импульса.

3.3.5 Участок «Карамкен»

Участок приурочен к рудному полю золото-серебряного месторождения Карамкен, расположенного в локальной интрузивно-купольной структуре на правобережье р. Хасын в Арманской вулкано-тектонической депрессии (рисунок 3.23). Интрузивно-купольная структура обладает в плане округлой формой с пологим периклинальным залеганием слоев и ограничена дуговыми разломами. Согласно [Аноров и др., 2001], структура сложена меловыми отложениями (преимущественно туфами и игнимбритами) арманской, хольчанской и ольской свит. В центре структуры и вдоль дуговых разломов расположены субвулканические тела позднемелового возраста преимущественно кислого состава. Позднемеловые дайки основного состава обладают преимущественно широтным простиранием, что совпадает с главным рудоконтролирующим Карамкенским субширотным разломом. Установлены вертикальные перемещения по разлому амплитудой до 500–700 м [Аноров и др., 2001].

Массовые замеры тектонической трещиноватости проводились в приустьевых частях штолен месторождения. Среди 5 пунктов геолого-структурных наблюдений на матрицах плотности трещиноватости всего в двух пунктах найдены статистически достоверные смещения. Кроме того, были также измерены ориентации борозд скольжения на кварцевых жилах. Результаты представлены на рисунке 3.24. Набор ориентировок зеркал скольжений позволил оценить напряженное состояние как горизонтальное растяжение с ориентировкой векторов сил сжатия и растяжения, соответственно, как 91°(угол падения 66°) и 283°(угол падения 23°).



1 — четвертичные отложения; 2–6 — верхнемелове вулканиты ОЧВП: 2 — игнимбриты, туфы риолитов; 3 — базальты; 4 — туфы, игнимбриты риолитов; 5 — туфы; 6 — андезиты; 7 — юрские алевролиты, аргиллиты, песчаники ; 8 — гранодиориты; 9 — разломы; 10 — надвиги; 11 — геологические границы; 12 — рудные тела; 13 — пункты геолого-структурных наблюдений.

Рисунок 3.23 Схема расположения пунктов геолого-структурных наблюдений на участке «Карамкен» Геологическая карта по [Скибина и др., 1991]

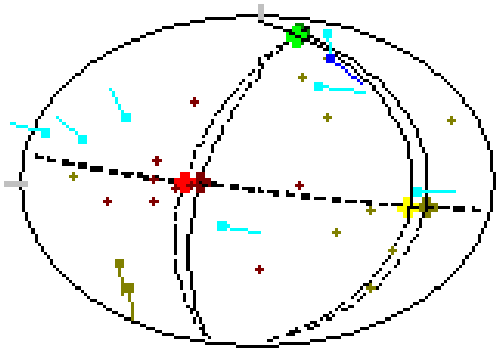


Рисунок 3.24 Стереограмма распределения зеркал скольжения кварцевых жил и тектонических трещин месторождения Карамкен. Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b]

Восстановленные ориентации осей σ_1 и σ_3 в вулканоструктурах Хасынского звена Охотско-Чукотского вулканогенного пояса показаны на стереограмме напряженного состояния (рисунок 3.25, таблица 3.6). Для напряженных состояний вулканитов методом наименьших квадратов не удалось подобрать удовлетворительную ориентировку конусов сжатия и растяжения. На этом основании нами сформулировано защищаемое положение 3.

Вулканоструктуры Хасынского звена ОЧВП характеризуются изменчивыми напряженными состояниями с вариациями геодинамического типа от преобладающего горизонтального растяжения до горизонтального сдвига.

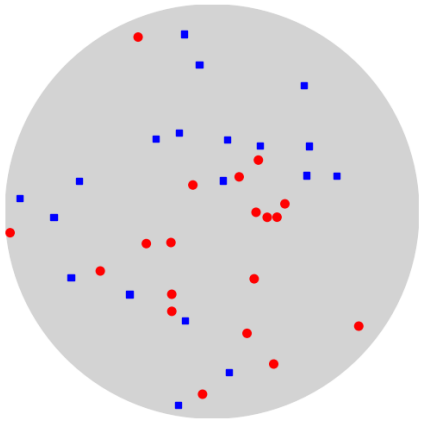


Рисунок 3.25 Стереограмма напряжённого состояния вулканоструктур Хасынского звена ОЧВП (сетка Вульфа, нижняя полусфера)

Таблица 3.6 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в вулканоструктурах Хасынского звена ОЧВП

		Ориентация оси		Плоскости макс. касательных напряжений		
	Участок	растяжение	сжатия	τ^1_{max}	τ^2_{max}	μ_σ
1	Дондычан1	322°42°	148°47°	99°4°	324°86°	0.19
2	Дондычан2	194°32°	41°53°	331°17°	205°79°	-0.18
3	Колхида	351°8°	96°60°	200°44°	327°59°	0.06
4	ol-01	224°30°	84°51°	357°22°	241°79°	
5	ol-02	268°14°	38°66°	111°33°	253°62°	
6	ol-03	74°26°	233°62°	274°20°	66°71°	
7	ol-04	12°51°	242°26°	106°29°	221°76°	
8	ol-05	190°2°	94°55°	338°51°	218°57°	
9	ol-06	355°19°	264°1°	127°75°	221°77°	
10	ol-07	36°47°	206°42°	327°5°	210°87°	
11	ol-08	69°37°	244°51°	267°6°	66°83°	
12	ol-09	337°45°	202°34°	79°24°	181°84°	
13	ol-10	173°13°	324°72°	6°31°	166°60°	
14	Карамкен	283°22°	91°66°	112°22°	279°68°	0.18
15	nl-01	274°4°	182°7°	48°82°	318°87°	
16	nl-02	56°31°	164°27°	291°46°	199°87°	
17	nl-03	245°15°	337°5°	112°75°	20°82°	
18	nl-04	36°16°	127°6°	263°74°	171°83°	
19	nl-05	19°72°	157°13°	322°33°	167°59°	

Значения μ_σ приведены только для решений полученных в программе StressGeol.

3.4 Кайнозойские впадины

Наиболее благоприятными для изучения тектонической трещиноватости в кайнозойских впадинах являются морские береговые обрывы в бух. Гертнера на участке «Магадан-2».

3.4.1 Участок «Магадан-2»

Миоценовые, плиоценовые и четвертичные отложения в береговых обрывах представлены слабосцементированными конгломератами, песчаниками, аргиллитами, в верхней части — глинами или галечниками, песками и крупными валунами. На участке «Магадан-2» установлены активные разломы широтного простирания Нагаевский и Весёлый [Смирнов и др., 2000]. Первый проходит вдоль северного борта бух. Нагаева, второй — вдоль южного побережья п-ова Старицкого. Они протягиваются на 45 км на восток до р. Ола, рассекая Магаданскую впадину. Согласно [Смирнов и др., 2000], разломы обладают сбросовой кинематикой с падением плоскости сместителя на юг под углом около 30°. В зонах разломов наблюдаются рассланцевание и будинаж гранодиоритов Магаданского батолита, плоскости разломов субширотного простирания, полого падающие на юг с зеркалами скольжения, установлены разрывные дислокации в миоцен-плиоценовых отложениях.

Нами был собран материал по ориентировке трещин в конгломератах нагаевской толщи, залегающих в нижней части разреза в бух. Гертнера. Отдельные гальки, входящие в состав конгломератов, разбиты субвертикальными трещинами. Плоскости трещин имеют устойчивую широтную ориентацию на протяжении всего обнажения, и часто след одной и той же плоскости разбивает серию галек, лежащих на её линии (рисунок 3.26). Установленные дислокации, очевидно, связаны с влиянием Нагаевского и Весёлого активных разломов. Среди всей совокупности собранных ориентировок трещин выделяются два мак-

симума плотности трещиноватости: 204°∠72°и 268°∠84°. Эти плоскости вместе с остальными образуют пояс трещиноватости, ориентированный на юго-запад.

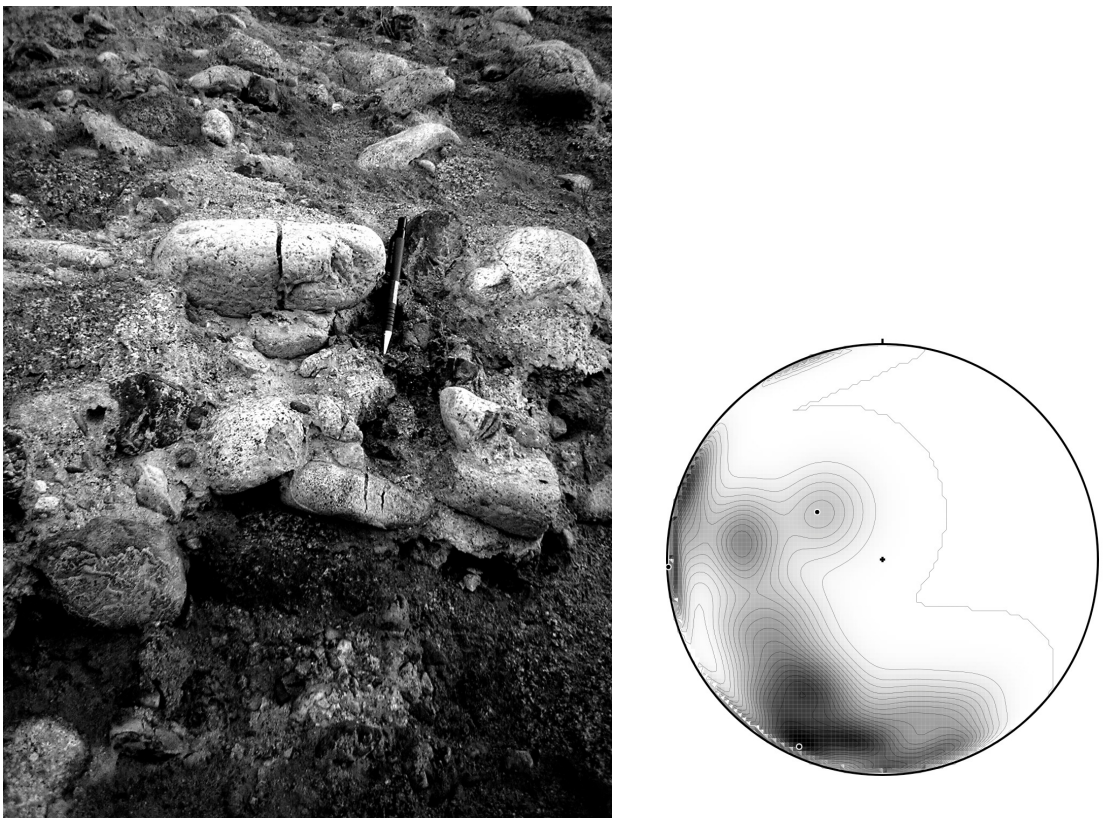
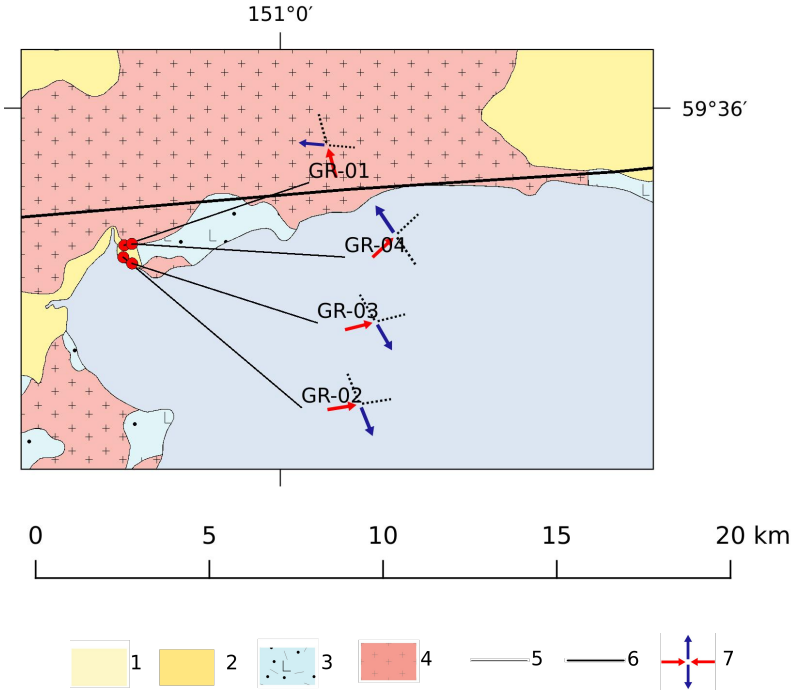


Рисунок 3.26 Зона рассланцевания валуна и гальки в конгломератах нагаевской толщи, рассечённые эшелонированными тектоническими трещинами, и стереограмма массовых замеров трещиноватости

Результаты анализа конгломератов нагаевской толщи показывают, что трещинная структура в них была сформирована в условиях сдвиговых напряжений с осью сжатия, ориентированной в северо-восточном направлении (таблица 3.7, рисунок 3.27). Такое поле напряжений в указанном месте с учётом современных взглядов на историю формирования Тауйско-Ямской системы кайнозойских впадин представляется аномальным, и этот вопрос требует дополнительного изучения.

Таблица 3.7 Пункты наблюдений в кайнозойских отложениях участка «Магадан-2»

	Ориентация оси			
Пункт	сжатия	растяжения	Аз. пад. пояса	Тип стресс состояния
GR-01	256°∠30°	150°∠24°	юго-запад	сдвиг
GR-02	227°∠28°	326°∠07°	юго-запад	сдвиг
GR-03	261°∠24°	158°∠17°	юго-запад	сдвиг
GR-04	165°∠22°	275°∠43°	юго-запад	горизонтальное сжатие со сдвигом



1 — четвертичные отложения; 2 — конгломераты, песчаники, аргиллиты, алевролиты неогенового возраста; 3 — андезиты, андезибазальты, базальты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты момолтыкичской свиты верхней юры - нижнего мела; 4 — гранитные и гранодиоритные интрузии мелового возраста; 5 — геологические границы; 6 — разломы; 7 — пункты геолого-структурных наблюдений и восстановленные в них ориентации осей сжатия и растяжения. пунктиром показан выход осей на верхнюю полусферу;

Рисунок 3.27 Схема расположение пунктов изучения тектонической трещиноватости на участке «Магадан-2». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001]

Восстановленные ориентации осей σ_1 и σ_3 в кайнозойских впадинах показаны на стереограмме напряженного состояния (рисунок 3.28). Они укладываются в конусы сжатия и растяжения с осями, ориентированными 214°(азимут) 29°(угол наклона) и 121°(азимут) 04°(угол наклона), соответственно. Положение плоскостей действия максимальных касательных напряжений хорошо согласуется с ориентацией субширотных активных разломов, к которым приурочена цепочка кайнозойских впадин. На основе изложенных данных сформулировано защищаемое положение 4.

Для кайнозойских впадин миоцен-плиоценового возраста характерны напряженные состояния типа горизонтальный сдвиг с осью сжатия в северо-восточном направлении (аз. 214, угол. 29) и осью растяжения в северо-западном направлении (аз. 121, угол. 04).

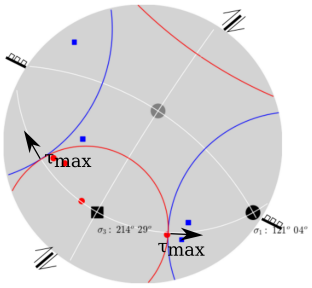


Рисунок 3.28 Стереограмма напряжённого состояния в кайнозойских впадинах (сетка Вульфа, нижняя полусфера)

Глава 4. Особенности напряженного состояния в разных тектонических структурах Северного Приохотья

В результате проведения работ на территории Северного Приохотья на 12 участках в разных геологических условиях получен набор данных о напряжённых состояниях в 96 пунктах геолого-структурных наблюдений. Полученные материалы представляют собой сложные комбинации напряжённых состояний и в целом отражают геодинамическую историю развития региона. На сводной стереограмме положения выходов осей σ_1 и σ_3 (см. рисунок 4.1) не обнаруживается закономерностей в ориентировках осей сжатия и растяжения.

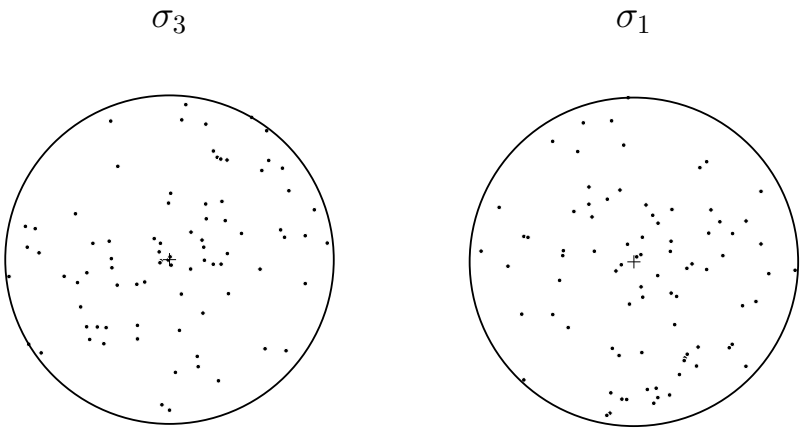


Рисунок 4.1 Сводная стереограмма ориентировок осей σ_1 и σ_3, полученных для территории Северного Приохотья

4.1 Геодинамические типы напряженных состояний Северного Приохотья

Для того чтобы разделить весь комплекс возможных решений на основе имеющейся базы данных на отдельные группы, был проведен анализ масси-

ва напряжённых состояний. На рисунке 4.2 и 4.3 показана диаграмма углов осей σ_3 и σ_2 до оси на зенит для изученых пунктов напряжений. Как видно из диаграммы, в подавляющем большинстве изученных пунктов ось на зенит лежит в пределах 30°от оси σ_2, что позволяет отнести их по типу напряженного состояния к горизонтальному сдвигу и горизонтальному растяжению со сдвигом (см. рисунок 2.2). Исключения составляют участки Магадавен, Хасын, отдельные пункты наблюдений на участках Магадан-1 и Нелькандж (тип напряжения горизонтальное сжатие с осью сжатия лежащей в северных румбах), и участки Колхида, Дондычан, Карамкен, Ола (горизонтальное растяжение с осью растяжения ориентированной незакономерно)

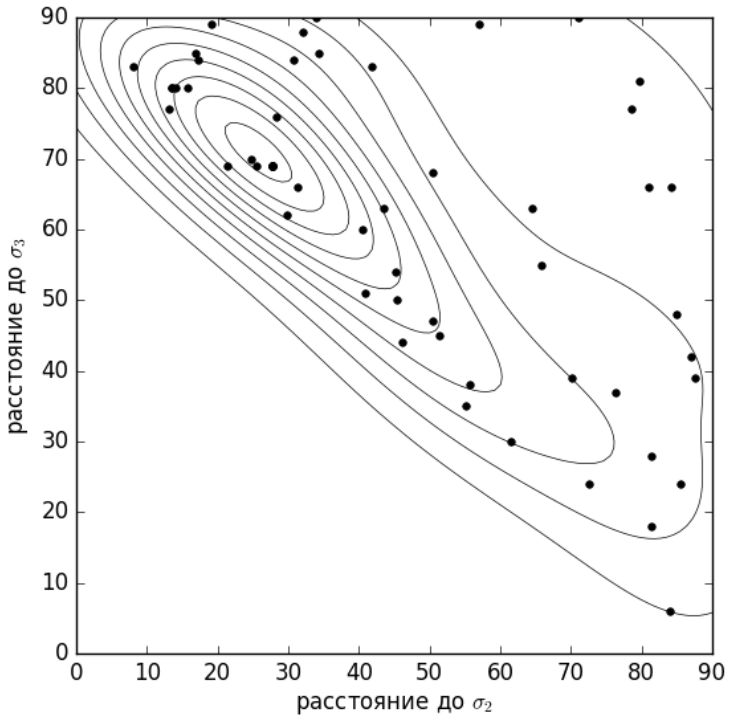


Рисунок 4.2 Угол от оси на зенит до осей σ_2 и σ_3 для изученных пунктов геолого-структурных наблюдений. Цветом показана плотность точек на диаграмме.

Таким образом, большинство напряжённых состояний, проявленных в изученных пунктах, можно разделить на шесть групп:

– горизонтальный сдвиг,

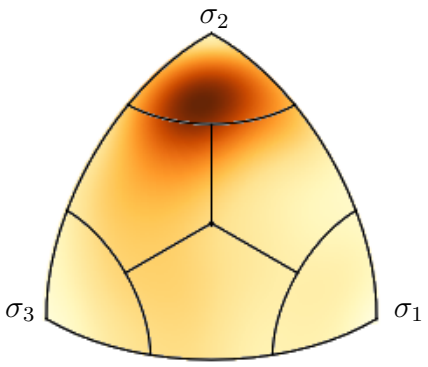


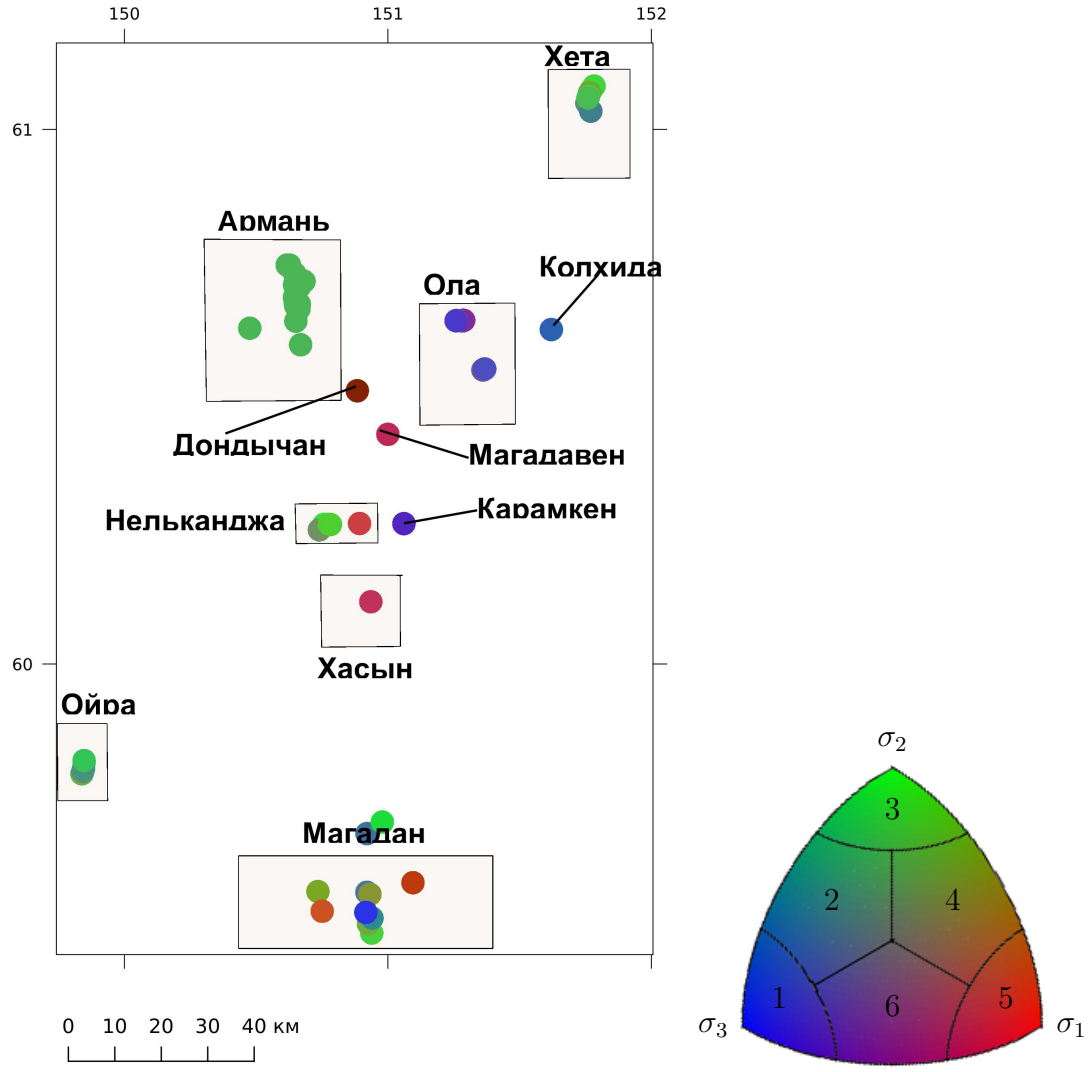
Рисунок 4.3 Плотность выхода направления на зенит относительно осей главных осей напряжений для изученных пунктов геолого-структурных наблюдений. Цветом показана плотность точек на диаграмме: темным оттенки красного — высокая плотность, светлые оттенки желтого — низкая плотность

- вертикальный сдвиг с простиранием оси σ_2 в северо-восточном направлении,
- горизонтальное расстяжение со сдвигом с простиранием оси σ_2 в северо-восточном направлении,
- вертикальный сдвиг с простиранием оси σ_2 в субмеридиональном направлении,
- горизонтальное расстяжение со сдвигом с простиранием оси σ_2 в субширотном направлении,
- горизонтальное расстяжение со сдвигом с простиранием оси σ_2 в субмеридиональном направлении.

В результате массовых замеров элементов залегания тектонической трещиноватости установлено, что разнородные тектонические структуры изученного района (Армано-Вилигинский синклинорий, структуры Удско-Мургальской дуги, ОЧВП и кайнозойских межгорных впадин) обладают специфическими характеристиками напряжённого состояния с преобладанием напряженного состояния типа горизонтальный сдвиг.

На рисунке 4.4 показано пространственное распределение напряженных состояний на изученных участках. На схеме хорошо видны участки с преиму-

щественно сдвиговым типом напряженных состояний (зеленый цвет точек) — участки «Армань» и «Хета» на севере территории, участок «Нелькандже» в центральной части, и участки «Ойра» и «Магадан» на юге территории. Участок «Ола» выделяется как участок с преимущественно горизонтальным растяжением. Кроме того, хорошо проявляется сегмент в центральной части с напряженным состоянием типа горизонтально сжатие.



1 — горизонтальное растяжение, 2 — горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 — горизонтальный сдвиг, 4 — горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 — горизонтальное сжатие, 6 — вертикальный сдвиг

Рисунок 4.4 Типы напряженных состояний на изученных участках в зависимости от положения оси на зенит относительно осей главных напряжений (см. рисунок 2.2)

4.2 Зоны влияния активных разломов

Для того чтобы определить ожидаемые напряжённые состояния для территории Северного Приохотья, была построена карта зон влияния активных разломов (см. рисунок 4.5). Для оценки ширины зон влияния активных разломов был применен неоструктурный метод определения ширины зоны влияния активных разломов [Кузьмин, 1998]. На картах плотности неотектонических разломов и карте глубин вертикальной расчленённости рельефа были соединены аномально высокие значения поля вдоль линий активных разломов. В качестве карты плотности неотектонических разломов использовалась карта, составленная Л. Ю. Калининой на основе карты неотектонических разломов [Калинина и др., 2013]. Карта разломов была составлена В. Н. Смирновым путем дешифрирования космических и аэрофотоснимков и отражает разломы, отчётливо выделяемые в рельефе [Карта новейшей..., 1997]. Карта глубин вертикальной расчлененности рельефа составлена на основе цифровой модели рельефа ASTER GDEM (доступной по адресу `http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html`). С помощью свободной ГИС GRASS [Neteler et al., 2012] в автоматическом режиме в поле высот были выделены вершины и в ручном режиме выделены точки, лежащие в речных долинах. Затем точки вершинной и базисной поверхности были интерполированы в растровые поля вершинной и базисной поверхности, и далее, вычитанием базисной поверхности из вершинной, была получена карта глубин эрозионного вреза.

Разломы, для которых были построены карты зон влияния можно разделить на три группы в зависимости от их простирания (см. таблицу 4.1):

- Разломы субширотного простирания (преимущественно сбросовая кинематика);
- Разломы северо-западного простирания (преимущественно сдвиговая кинематика);
- Разломы северо-восточного простирания (преимущественно сдвиговая кинематика)

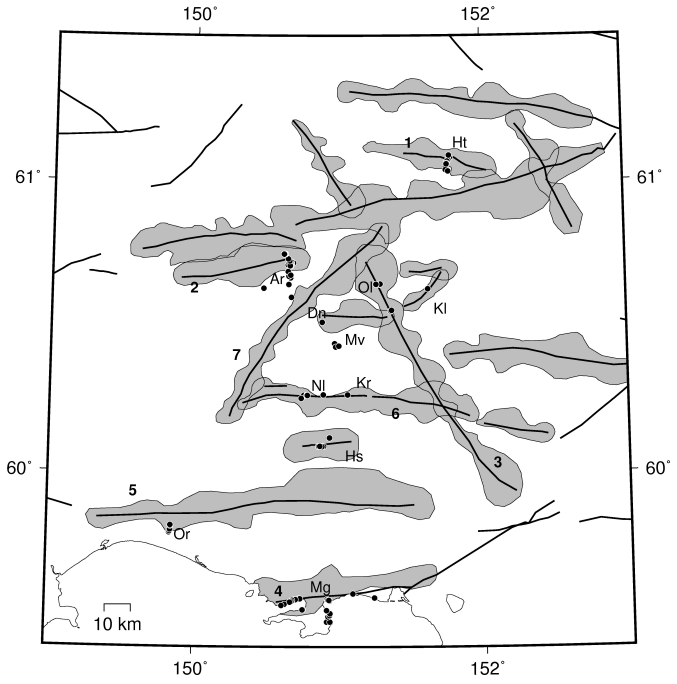


Рисунок 4.5 Сводная схема активных разломов территории Северного Приохотья по [ОСР-97]. Серым цветом выделены зоны влияния разломов. Расшифровку подписей к разломам см. в таблице 4.1. Расшифровку подписей к участкам см. в таблице 3.1.

Таблица 4.1 Активные разломы Северного Приохотья

№ на рис.	Название	Кинематика	Источник
1	Хетинский	лев. сбросо-сдвиг	[Кондратьев и Смирнов, 2010]
2	Иня-Ямский	левый сдвиг	[Левашова, 1987, Карта ..., 1997]
3	Ольский	левый сдвиг	[Смирнов, 1997; Смирнов и др., 2018]
4	Нагаевский	сброс	[Смирнов и др., 2000]
5	Челомджа-Ямский	сбросо-сдвиг	[Юдин, Измайлов, 1966]
6	Верхне-Арманский	сброс	[Карта ..., 1997]

Зная кинематику разлома и его простирание, можно предположить ожидаемые типы напряжённых состояний в зоне динамического влияния разлома на разных стадиях его формирования, принимая во внимание возможный эффект изменения индексов напряжений в ходе длительной эволюции деформации региона [Васильев и Мострюков, 2001; Сим, 2013] (рисунок 4.6, б). Для разломов северо-восточной и северо-западной ориентировки на ранних стадиях развития будет характерно напряженное состояние чистого сдвига. По мере

развития разломной зоны и переиндексации осей напряжений в зоне динамического влияния будут наблюдаться напряженные состояния взбросового типа с ориентировкой оси сжатия в субширотном направлении (с формированием сбросовых разрывных нарушений меньшего ранга с простиранием в субмеридиональном направлении) и сбросового типа с ориентировкой оси растяжения в субмеридиональном направлении.

Для разломов субширотного простирания на ранних стадиях развития будет характерно напряжённое состояние сброса с осью растяжения, ориентированной в субмеридиональном направлении. По мере развития разломной зоны и переиндексации осей напряжений в зоне динамического влияния будут наблюдаться напряжённые состояния типа чистый сдвиг (с образование сдвигов в СВ и СЗ направлении и сбросов в субмеридиональном направлении) и типа сброс с осью растяжений ориентированной в субширотном направлении (с образованием сбросов той же ориентировки [Семинский, 2003]).

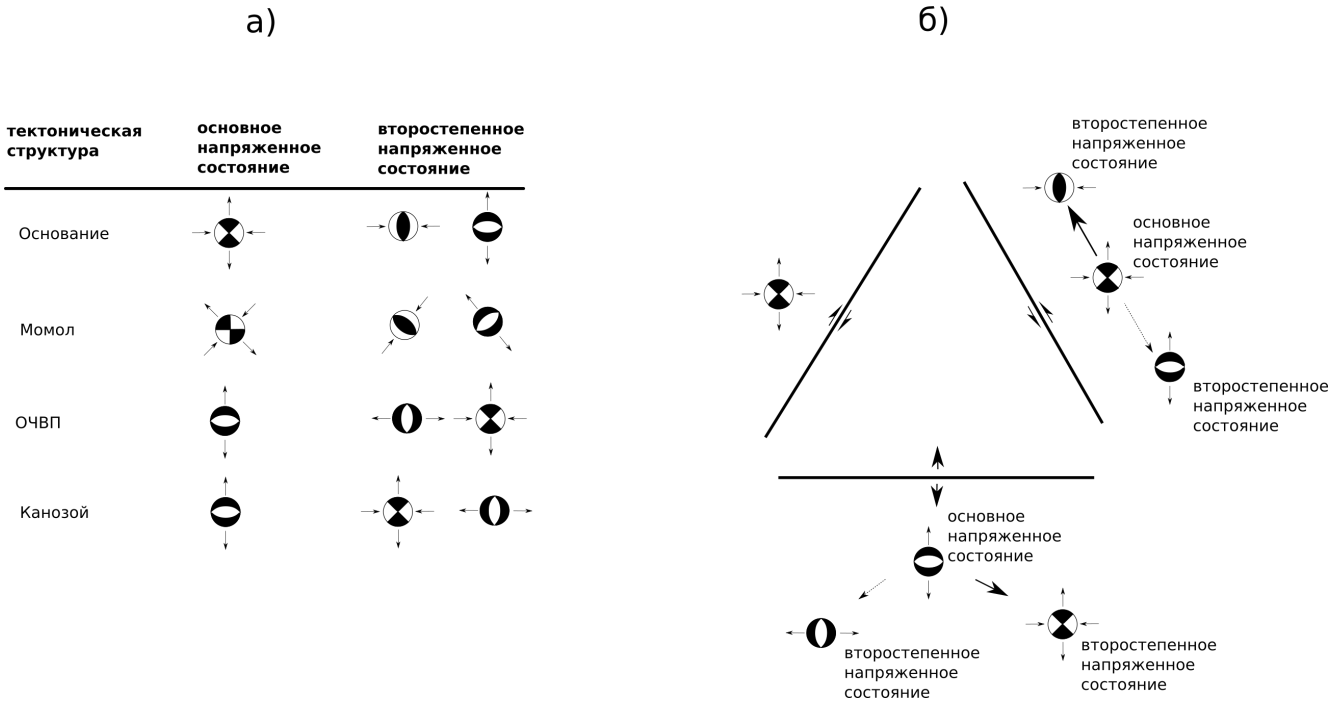


Рисунок 4.6 Диаграмма теоретических напряженных состояний, ожидаемых в геологических структурах Северного Приохотья (а) и в зоне динамических влияний активных разломов Северного Приохотья в зависимости от их ориентировок (б)

Поле напряжений чистого сдвига соответствует кинематике главных активных разломов территории Магаданской области — Улахана, Умарского, Чай-

Юрьинского, обладающих в настоящее время сдвиговой кинематикой. Поле напряжений сброса соответсвует кинематике Челомджа-Ямского и Иня-Ямского разломов.

Тип напряжений с ориентацией плоскости главных напряжений в северо-восточном направлении, возможно, соответствует полю напряжения второго ранга, вызванного переориентацией осей напряжений при сдвиговых смещениях по разломам северо-восточного простирания. Также такое поле напряжений может возникнуть как первичное поле напряжений при вертикальных смещениях по разломам северо-восточного простирания.

Тип напряжений с простиранием плоскости главных нормальных напряжений в субширотном направлении может возникнуть как первичное поле напряжений при вертикальных смещениях по разломам субмеридионального простирания.

4.3 Напряжённые состояния, соответствующие главным тектоническим структурам Северного Приохотья

Для каждой из основных геологических структур изучаемой территории характерен уникальный набор напряжённых состояний, действовавших во время формирования структуры. Исходя из общих очертаний геологических структур, их простирания, а также деформированного состояния можно сделать предположение о напряжениях, действовавших в течение хода деформации. Для сложной структуры территории Северного Приохотья такие оценки будут очень приблизительными, однако они будут полезны для дальнейшего анализа собранного материала.

Складчатые структуры Яно-Колымской системы являются результатом длительной складчатой и покровно-надвиговой деформации на орогенном этапе развития (J_2bt–K_2nc), вызванной сближением Колымо-Омолонского микроконтинента и Верхоянского складчато-надвигового пояса с формированием протяженной дуги коллизионного пояса Черского, вытянутой в северо-западном направлении [Oxman and Prokopiev, 1995; Оксман, 2000]. Ансамбль сдвиговых и

надвиговых деформаций позволяет установить напряженные состояния, господствовавшие во время формирования этой структуры, как сочетание сдвиговых и взбросовых типов с ориентацией оси сжатия 110°(рисунок 4.6,а).

Вулкано-тектонические структуры Удско-Мургальской дуги обладают преимущественно субширотной ориентировкой. Напряжённые состояния, действовавшие во время формирования этой структуры, устанавливаются нами как сочетание взбросовых и сдвиговых типов с ориентировкой оси сжатия по азимуту 100°[Симаненко и др., 2006].

Петрологическая и геохимическая спецификация вулканических образований ОЧВП (альб-кампан) указывает на их формирование в условиях надсубдукционного геодинамического режима активной континентальной окраины [Натапов, 1999; Полин и др., 2006]. Учитывая простирание Хасынского звена ОЧВП, напряжённые состояния для этих структур, определяющие главные деформации, соответствуют взбросовым (с ориентацией оси растяжения как в субширотном, так и в субмеридиональном направлении) и сдвиговому типам (с ориентацией оси растяжения в субмеридиональном направлении).

Кайнозойские межгорные впадины были сформированы на новейшем этапе (плиоцен-квартер), для которого условия деформации установлены достаточно точно. В работе [Hindle et al., 2011, Steblov et al., 2014] обсуждается деформация северо-западного сегмента Охотской плиты и приводятся параметры деформации, полученные на основе данных GPS наблюдений, анализа сейсмического режима территории и геологических данных. Поле напряжений для деформаций северной части Охотской плиты относится к чисто сдвиговому типу с осью укорочения, ориентированной в диапазоне 80–85°, что, по мнению авторов, вызвано сближением Евразийской и Северо-Американской плит. Подобный характер деформации, как считают указанные авторы, оставался стабильным, начиная с миоцена до настоящего времени, поскольку кинематика региональных левосторонних сдвигов (Улахан, Чай-Юрьинский), вдоль которых происходит разрядка напряжений, в течение этого времени оставалась неизменной. Сочетанием напряженных состояний для кайнозойских межгорных впадин, таким образом, является сбросовый тип с ориентацией оси растяжения по азимуту 350°и чистый сдвиг (с таким же направлением оси растяжения) а также сбросовый тип (с осью растяжения, ориентированной по азимуту 80°).

4.4 Анализ сочетания типов напряжений

Описанные выше варианты напряженных состояний для выделенных геологических структур и основных активных разломов Северного Приохотья представлены в таблице 4.2. Одновременное наличие стресс-состояний разных типов характерно для большинства геологических структур относительно сложного геологического строения. Однако возникновение сложного сочетания различных стресс состояний на одной территории может иметь разную природу:

– последовательная смена тектонических режимов во времени;

– кинематическое «секционирование» деформации;

– сочетание режимов, вызванное относительно короткими по времени флуктуациями деформации.

Таблица 4.2 Напряжённые состояния, теоретически ожидаемые в основных геологических структурах Северного Приохотья

			Напряженное состояние	
	Структура	Время	Основное (сжатие, растяж.)	Дополнительные
I	Основание пояса (АВС)	J_2bt–K_2nc	110°∠0°; 20°∠0°(сдвиг)	
II	Удско-Мургальская дуга	J_3–K_1	100°∠0°; 100°∠90°(сжатие)	
III	ОЧВП	K_1ab–K_2cp	100°∠0°; 100°∠90°(сжатие)	
IV	Кайнозойские впадины	P_2–н. в.	80°∠0°; 350°∠0°(сдвиг)	
V	Субширотные разломы		350°∠0°; 350°∠90°(растяжение)	
IV	Разломы СЗ и СВ простирания		85°∠0°; 355°∠0°(сдвиг)	

В случае если верен первый сценарий, то вариация напряженных состояний должна коррелировать с возрастом структур, в которых он восстановлен, — чем древнее структура, тем больший набор разнообразных данных она в себе несёт. То есть, на территории Северного Приохотья в структурах кайнозойских

впадин должны присутствовать следы только последней фазы деформации, а в структурах складчатого основания пояса — весь набор фаз деформаций, через которые прошёл регион.

В случае со сценарием «кинематического секционирования» вариации напряженных состояний объясняются не изменением деформации во времени, а особенностями реакции самой геологической структуры на приложенные напряжения. Типичным примером таких структур являются раздвиговые бассейны типа pull-apart, в которых будут наблюдаться условия растяжения при общем сдвиговом поле напряжений. Если вариация типов напряжений объясняется этим сценарием, то возможно сочетание разных типов напряжений в одной геологической структуре. В частности, на территории Северного Приохотья наблюдаются активные разломы разной ориентировки и кинематики — северо-западные сдвиги, субширотные сбросы с разным положением в геологической структуре территории. В случае если верен этот сценарий, должна наблюдаться устойчивая корреляция с разломами и полем напряжений в зоне их влияния.

Возможен и третий сценарий, когда корреляции не будет наблюдаться ни с первым случаем, ни со вторым. Это будет говорить о том, что в разных участках территории в разное время были разные тектонические обстановки, развивавшиеся обособленно.

Напряжённые состояния в геологических структурах Северного Приохотья приведённые в таблице 4.2, были сведены в 7 посредством объединения напряжённых состояний с близкими ориентациями осей сжатия и растяжения (рисунок 4.7).

Рисунок 4.7 Семь возможных стресс-состояний для территории Северного Приохотья, действовавших на разных этапах её развития

В случае если верен первый сценарий, то среди восстановленных напряжённых состояний для структур основания пояса, кроме напряжённых состояний, указанных в таблице 4.2, нужно ожидать сочетание напряжённых состояний ОЧВП и кайнозойских впадин. Для структур Удско-Мургальской дуги, кроме собственных напряжённых состояний, нужно также ожидать сочетание на-

пряжённых состояний ОЧВП и кайнозойских впадин. Напряжённые состояния, восстановленные в структурах ОЧВП, должны соответствовать сочетанию напряжённых состояний, ожидаемых как для ОЧВП, так и для кайнозойский впадин. Напряжённые состояния, восстановленные в структурах кайнозойских впадин, должны соответствовать только напряжённым состояниям для кайнозойских впадин (как самые молодые структуры).

Такие ожидаемые сочетания ориентировок осей сжатия и растяжения для каждой из геологический структур показаны на рисунке 4.8. Складчатые структуры основания ОЧВП, а также структуры Удско-Мургальской дуги должны являться в этом случае структурами с наибольшей насыщенностью возможными ориентировками осей сжатия и растяжения, так как в них запечатлены все этапы деформации, которым подверглась территория.

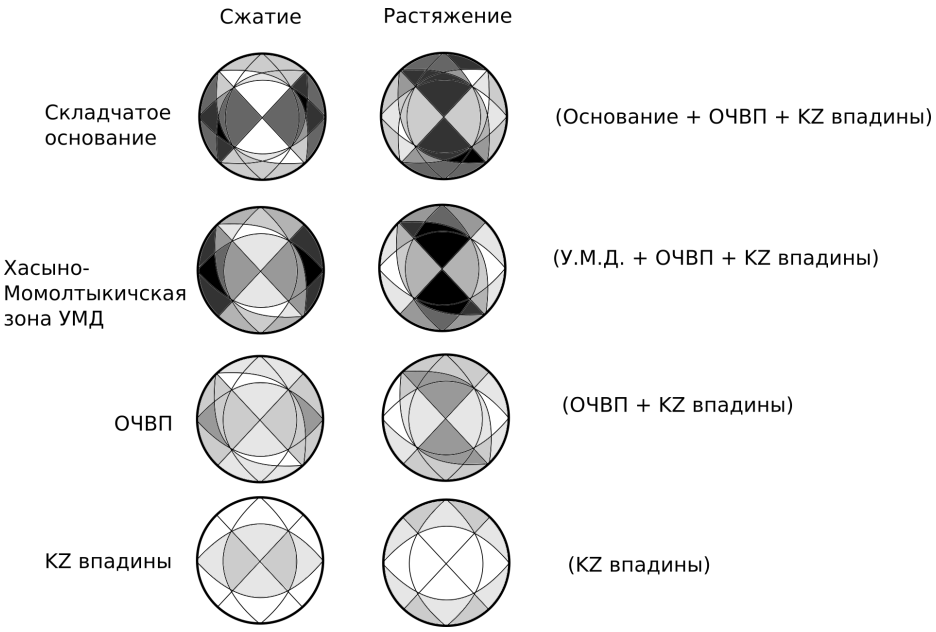


Рисунок 4.8 Стереограммы плотностей осей сжатия и растяжения с последовательным усложнением от молодых геологических структур к более древним. Тёмный оттенок означает высокую плотность возможных ориентировок

На рисунке 4.9 показаны ориентировки осей сжатия и растяжения, полученные в результате полевых работ и сгруппированные по геологическим структурам. Как видно из рисунка, характер распределения ориентировок сил сжатия и растяжения не проявляет ожидаемого закономерного усложнения при переходе от более молодых структур к более древним, а значит, мы не можем принять верным первый сценарий развития.

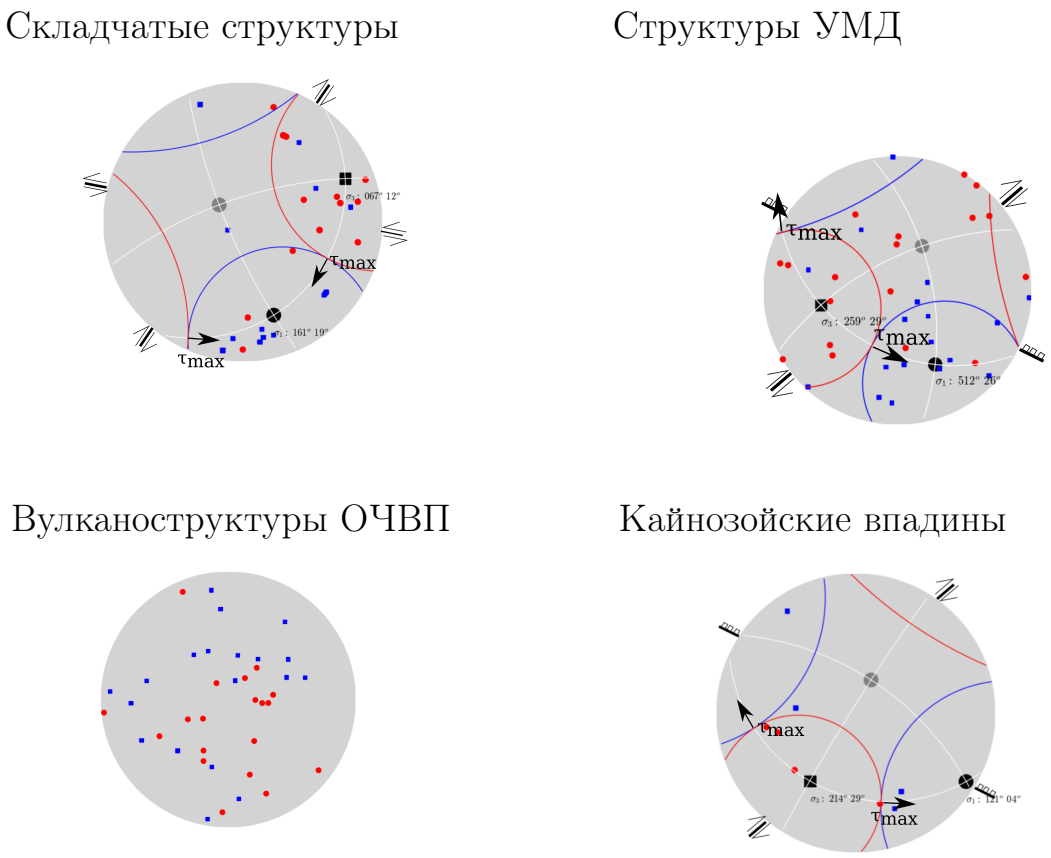


Рисунок 4.9 Стереограммы напряжённых состояний в зависимости от приуроченности к одной из тектонических структур Северного Приохотья (сетка Вульфа, нижняя полусфера)

Для проверки второго сценария была составлена таблица 4.3, в которой показано сочетание напряжённых состояний для пунктов геологических наблюдений, находящихся в зоне влияния разломов различной ориентировки. В таблице показаны только решения, удовлетворящие статистическому критерию достоверности (см. главу 2). Количество таких решений для зон влияния разломов субширотной ориентировки и зон влияния разломов северо-западной и северо-восточной ориентировки не равно. Серым цветом в таблице показаны ячейки, соответствующие напряжённым состояниям, теоретически ожидаемым для разломов разной ориентировки.

Представив таблицу 4.3 как таблицу сопряжённости, можно провести анализ частот, используя критерий χ^2 для оценки зависимости частот встречаемости различных напряжённых состояний от геологической структуры. В качестве нулевой гипотезы принимается, что такая зависимость отсутствует. P-значение,

Таблица 4.3 Частота встречаемости различных напряжённых состояний в зависимости от приуроченности участка к зонам влияния активных разломов разного простирания

Субширотн.	**6**	**12**	**4**	1
СЗ и СВ	**3**	**8**	0	**1**
	$\Sigma = 35$		$p = 0,4576$	

рассчитанное для критерия χ^2, для указанной таблицы составляет 0,4576. Таким образом, мы не можем отвергнуть нулевую гипотезу, а значит, между напряжёнными состояниями на территории Северного Приохотья и зонами динамического влияния активных разломов различной ориентировки отсутствует статистически достоверная связь и у нас нет оснований для принятия второго сценария развития территории.

В таблице 4.4 показано сочетание напряженных состояний для разных геологических структур, восстановленных в ходе полевых исследований. В таблице учитываются только решения, удовлетворяющие статистическому критерию достоверности (см. главу 2). Всего таких решений получено 54, хотя количество решений для Удско-Мургальской дуги или для структур ОЧВП заметно меньше. Серым цветом в таблице выделены ячейки, соответсвующие напряженным состояниям, которые теоретически ожидаются для каждой из геологических структур (см. таблицу 4.2). Как видно из таблицы, практически для всех структур имеется хорошее соответствие наблюдаемых напряжённых состояний и теоретически ожидаемых. Одновременно с этим в каждой из структур присутствуют и посторонние напряжённые состояния.

Представив таблицу 4.4 как таблицу сопряженности, можно провести анализ частот, используя критерий χ^2 для оценки зависимости частот встречаемости различных напряжённых состояний от геологической структуры. В качестве нулевой гипотезы принимается, что такая зависимость отсутствует. Рассчитанное p-значение критерия χ^2 для указанной таблицы составляет 0,02523. Таким образом, у нас есть все основания отвергнуть нулевую гипотезу и принять предположение, что между геологическими структурами разного возраста на тер-

Таблица 4.4 Частота встречаемости различных напряжённых состояний в зависимости от приуроченности участка к геологической структуре

АВС	**8**	**1**	**1**	0	0	0
У.-М. дуга	**3**	7	**4**	**1**	0	2
ОЧВП	**2**	4	**1**	**1**	3	4
KZ впадины	**3**	0	0	**0**	**0**	**1**
			$\Sigma = 46$		$p = 0,02523$	

ритории Северного Приохотья и стресс-состояниями разного типа существует статистически достоверная связь.

Таким образом, мы можем принять третий сценарий эволюции напряжений на территории: Разнородные тектонические структуры изученного района обладают специфическими характеристиками, выраженными в вариациях основного напряжённого состояния (горизонтальное сжатие, горизонтальное растяжение), которые отражают геодинамические условия собственного развития структур, а дополнительные напряжённые состояния имеют наложенный характер. Из этого следует защищаемое положение 5.

Характер напряжённого состояния на территории Северного Приохотья связан с разновозрастными тектоническими структурами и в первую очередь определяется именно ими.

Заключение

В диссертационной работе приведены результаты изучения полей тектонических напряжений в разнородных позднемезозойских и кайнозойских тектонических структурах Северного Приохотья. Исследования выполнялись на опорных участках с применением современных структурно-геологических методов анализа тектонической трещиноватости.

В результате проведённых работ установлено, что исследованные тектонические структуры обладают специфическими характеристиками напряженного состояния, которые отражают геодинамические условия их собственного развития. Складчатым структурам Армано-Вилигинского синклинория свойственны чётко выраженные напряженные состояния типа горизонтальный сдвиг с осью максимального сжатия в субширотном направлении. Структуры Удско-Мургальской вулканической дуги обладают напряженными состояниями типа горизонтального растяжения со сдвигом с осью сжатия в северо-восточном направлениии. Вулканоструктуры ОЧВП характеризуются изменчивым полем тектонических напряжений с вариациями геодинамического типа от преобладающего горизонтального растяжения до горизонтального сдвига. Кайнозойским межгорным впадинам присущи характерны напряженные состояния типа горизонтальный сдвиг повернутые на 30° относительно сдвиговых напряженных состояний в складчатых структурах. Выполненный сравнительный анализ полей напряжений показывает, что каждый последующий геодинамический этап вносил в предшествующую структуру только дополнительные элементы, но не преобразовывал её полностью.

В ходе работы над диссертацией автором был изобретён цифровой геологический компас, применение которого позволило на порядок увеличить скорость и точность измерений элементов залегания тектонических трещин. Кроме того, в ходе работ был разработан дополнительный статистический критерий, повышающий надёжность выделения сопряжённых трещин, и установлено его поро-

говое значение для трещинных структур на территории Северного Приохотья, равное $\chi^2 > 100$.

В теоретическом отношении результаты исследований имеют существенное значение при изучении геодинамики сложных ансамблей разновозрастных тектонических структур в пограничных зонах литосферных плит, к каковым относится Северное Приохотье.

Практическое приложение полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы при оценке сейсмической опасности и выполнении сейсмического районирования на юго-восточном фланге сейсмического пояса Черского. Кроме того, они могут применяться при изучении рудных полей и месторождения Северного Приохотья.

Список иллюстраций

1.1 Тектонические структуры Северного Приохотья. По [Котляр, Русакова, 2004]: 9
1.2 Фрагмент тектонической карты Дальнего востока России. По [Геодинамика..., 2006] с дополнениями: 10
1.3 Неотектоническая структура и главные активные разломы в Охотско-Колымском регионе (по [Смирнов, 1995, 2000; Калинина, Смирнов, 2017]): 16

2.1 Компоненты тензора напряжений на гранях прямоугольного параллелепипеда. По [Turcotte and G., 2014] 20
2.2 Геодинамический тип напряженного состояния в зависимости от попадания оси на зенит в одну из областей на поверхности октанта, построенного на осях главных напряжений. По [Ребецкий и др., 2017а]. 21
2.3 Принципиальная схема расположения разрывов по отношению к осям напряжений (по [Гзовский, 1975]) 23
2.4 Ортогональность штрихов скольжения к линии пересечения сопряженных трещин (по [Гзовский, 1975]) 24
2.5 Стереографическая номограмма направлений τ_n, допустимых для объема, в котором действует поле напряжений с единой ориентацией главных осей [Гущенко, 1979], верхняя полусфера 25
2.6 Кинематическая стереограмма трещинных структур одноосного растяжения [Гущенко, 1979]. Верхняя полусфера 26
2.7 Выделение сопряженных систем разрывов (По [Николаев, 1977]) . 27
2.8 Результат работы программы STRESSgeol (случай двух этапов напряженного состояния а и б). По [Ребецкий и др., 2017а]. Пояснения в тексте. 29

2.9 Определение общего поля напряжений для совокупности локальных стресс-состояний используя метод наименьших квадратов . . 33
2.10 Статистические характеристики максимумов плотности трещиноватости пунктов геолого-структурных наблюдений на территории Северного Приохотья 37
2.11 Зависимость χ^2 от коэффициента асимметрии Пирсона для осей тектонической трещиноватости Северного Приохотья 39
2.12 Принципиальная схема работы цифрового геологического компаса: 43
2.13 Приложение компаса к плоскости для измерения элементов залегания 45
2.14 Повторяемость измерений для азимута падения, а также отклонения значений, полученных компасом, от азимута падения испытательной площадки 46
2.15 Работа с цифровым компасом в полевых условиях 46
2.16 Цифровой геологический компас сделанный на базе m5stack под управлением микроконтроллера esp32 48

3.1 Размещение опорных участков геолого-структурных наблюдений 52
3.2 Условные обозначения: 53
3.2 Восстановленные направления осей сжатия и растяжения в области действия Хетинского разлома. Геологическая карта по [Чертовских и Шейкова, 1979] 55
3.3 Тектоническая трещиноватость и реконструкция стресс состояний в обнажениях юрских алевролитов в пунктах Хт03 и пункте Хт04 56
3.4 Схема геологического строения верховья бассейна р. Армань и восстановленные направления осей сжатия и растяжения в пунктах геолого-структурных наблюдений. Геологическая карта по [Корольков и Королькова, 1992] 59
3.5 Схема геологического строения бассейна р. Магадавен по [Аноров и др., 2001] 60

3.6 Стереограмма распределения зеркал скольжения милонитизированной зоны вокруг сместителя Магадавенского надвига. Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b] 61
3.7 Стереограмма напряжённого состояния для складчатых структур Армано-Вилигинского синклинория (сетка Вульфа, нижняя полусфера) 62
3.8 Расположение пунктов геолого-структурных наблюдений на участке «Хасын» Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] . . 65
3.9 Стереограмма распределения зеркал скольжения в отложениях момолыкичской свиты на участке «Хасын». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b] 65
3.10 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Ойра». Геологическая карта по [Юдин, 1969] 66
3.11 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтка геолого-структурных наблюдений «op-03». Сетка Вульфа, верхняя полусфера. 68
3.12 Схема расположения точек измерения тектонической трещиноватости на участке «Магадан-1». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 69
3.13 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтков геолого-структурных наблюдений «NG-04», «sokol-02». Сетка Вульфа, верхняя полусфера. 70
3.14 Стереограмма напряжённого состояния в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги (сетка Вульфа, нижняя полусфера) 72
3.15 Схема расположения точек измерения тетонической трещиноватости на участке «Дондычан». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 75

3.16 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Дондычан». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b] 76
3.17 Схема размещения пунктов изучения тектонической трещиноватости (показаны черным точками) на участке «Колхида». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 77
3.18 Локальные стресс-состояния в пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Колхида». Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b] 78
3.19 Стереограмма плотности трещиноватости для пунтка геолого-структурных наблюдений «nl-04». Сетка Вульфа, верхняя полусфера. 79
3.20 Локальные стресс-состояния в изученных пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Нелькандже». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 80
3.21 Локальные стресс-состояния в изученных пунктах геолого-структурных наблюдений на участке «Ола». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 82
3.22 Стереограмма плотности трещиноватости для пунктов геолого-структурных наблюдений «ол-01», «ол-06», «ол-07». Сетка Вульфа, верхняя полусфера. 84
3.23 Схема расположения пунктов геолого-структурных наблюдений на участке «Карамкен» Геологическая карта по [Скибина и др., 1991] 86
3.24 Стереограмма распределения зеркал скольжения кварцевых жил и тектонических трещин месторождения Карамкен. Верхняя полусфера. Ориентировка осей сжатия и растяжения расчитана программой StressGeol [Ребецкий и др., 2017b] 87
3.25 Стереограмма напряжённого состояния вулканоструктур Хасынского звена ОЧВП (сетка Вульфа, нижняя полусфера) 88

3.26 Зона рассланцевания валуна и гальки в конгломератах нагаевской толщи, рассечённые эшелонированными тектоническими трещинами, и стереограмма массовых замеров трещиноватости 91
3.27 Схема расположение пунктов изучения тектонической трещиноватости на участке «Магадан-2». Геологическая карта по [Аноров и др., 2001] 92
3.28 Стереограмма напряжённого состояния в кайнозойских впадинах (сетка Вульфа, нижняя полусфера) 93

4.1 Сводная стереограмма ориентировок осей σ_1 и σ_3, полученных для территории Северного Приохотья 94
4.2 Угол от оси на зенит до осей σ_2 и σ_3 для изученных пунктов геолого-структурных наблюдений. Цветом показана плотность точек на диаграмме. 95
4.3 Плотность выхода направления на зенит относительно осей главных осей напряжений для изученных пунктов геолого-структурных наблюдений. Цветом показана плотность точек на диаграмме: темным оттенки красного — высокая плотность, светлые оттенки желтого — низкая плотность 96
4.4 Типы напряженных состояний на изученных участках в зависимости от положения оси на зенит относительно осей главных напряжений (см. рисунок 2.2) 97
4.5 Сводная схема активных разломов территории Северного Приохотья по [ОСР-97]. Серым цветом выделены зоны влияния разломов. Расшифровку подписей к разломам см. в таблице 4.1. Расшифровку подписей к участкам см. в таблице 3.1. 99
4.6 Диаграмма теоретических напряженных состояний, ожидаемых в геологических структурах Северного Приохотья (а) и в зоне динамических влияний активных разломов Северного Приохотья в зависимости от их ориентировок (б) 100
4.7 Семь возможных стресс-состояний для территории Северного Приохотья, действовавших на разных этапах её развития 104

4.8 Стереограммы плотностей осей сжатия и растяжения с последовательным усложнением от молодых геологических структур к более древним. Тёмный оттенок означает высокую плотность возможных ориентировок 105
4.9 Стереограммы напряжённых состояний в зависимости от приуроченности к одной из тектонических структур Северного Приохотья (сетка Вульфа, нижняя полусфера) 106

Список таблиц

3.1 Исследованные участки в различных геологических обстановках Северного Приохотья и реконструкция в них напряженных состояний 51
3.2 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в складчатых структурах Армано-Вилигинского синклинория 63
3.3 Пункты наблюдений в окрестностях Магаданского батолита и реконструкция стресс состояний 71
3.4 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в структурах Хасыно-Момолтыкичской зоны Удско-Мургальской дуги 73
3.5 Результаты анализа трещиноватости пунктов геолого-структурных наблюдений на уч. «Ола» 83
3.6 Сводная таблица ориентировок осей сжатия и растяжения для участков расположенных в вулканоструктурах Хасынского звена ОЧВП 89
3.7 Пункты наблюдений в кайнозойских отложениях участка «Магадан-2» 92

4.1 Активные разломы Северного Приохотья 99
4.2 Напряжённые состояния, теоретически ожидаемые в основных геологических структурах Северного Приохотья 103
4.3 Частота встречаемости различных напряжённых состояний в зависимости от приуроченности участка к зонам влияния активных разломов разного простирания 107
4.4 Частота встречаемости различных напряжённых состояний в зависимости от приуроченности участка к геологической структуре 108

Список литературы

1. Акинин В. В. Позднемезозойский и кайнозойский магматизм и преобразование нижней коры в северном обрамлении Пацифики : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.04 / В. В. Акинин ; ИГЕМ РАН. — М., 2012. — 43 с.

2. Акинин В. В., Апт Ю. Е. Позднекайнозойский щелочно-базитовый вулканизм на северо-востоке России // Магматизм и оруденение Северо-Востока России. — Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1997. — С. 155–174.

3. Акинин В. В., Миллер Э. Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. — 2011. — Т. 19, № 3. — С. 249–290.

4. Аноров П. Н., Юдина В. М., Зименко М. И. Государственная Геологическая карта м-ба 1 : 200 000 (нов. сер.). 2001. Магаданская серия. Листы P-56-XXXI, XXXII, O-56-1, O-56-II. Объяснительные записки. — (в печати), 2001.

5. Важенин Б. П. Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. — 205 с.

6. Васильев Н. Ю., Мострюков А. О. Закономерности развития циклов деформаций в процессах тектогенеза // Тектоника неогена: общие и региональные аспекты. — М. : Наука, 2001. — С. 90–93.

7. Ващилов Ю. Я. Глубинные разломы юга Яно-Колымской складчатой зоны и Охотско-Чаунского вулканического пояса и их роль в образовании гранитных интрузий и формировании структур (по геофизическим данным) // Сов. геология. — 1963. — № 4. — С. 54–72.

8. Вознесенский С. Д., Маннафов Н. Г. Новые материалы к характеристике Чай-Юрюинской зоны разломов // Мезозойский тектогенез: тез. докл. VII сессии Научного совета по тектонике Сибири и Дальнего Востока (26 авг.–12 сен. 1969 г.). — Магадан, 1969. — С. 88–90.

9. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчук. — Владивосток : Дальнаука, 2006.

10. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — М. : Недра, 1975. — 536 с.

11. Гладков А. С., Лунина О. В. Разломная структура и поля напряжений западной части Тункинского рифта (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. — 2004. — Т. 45, № 10. — С. 1235–1247.

12. Горячев Н. А. Удско-Мургальская магматическая дуга: геология, магматизм, металлогения // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России. — Магадан, 2005. — С. 17–37.

13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист P-56 — Сеймчан. Объяснительная записка. — Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. — 426 с.

14. Грачев А. Ф. Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1 : 5 000 000. — АООТ «Зарубежгеология», 1997.

15. Гриненко О. В., Сергеенок А. И., Белолюбский И. Н. Палеоген и неоген Северо-Востока России. Часть I. — 1998.

16. Гущенко О. И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере / Под ред. А. С. Григорьева. — М. : Наука, 1979.

17. Иванов В. В. Осадочные бассейны Северо-Восточной Азии. — Наука, 1985. — 210 с.

18. Имаев В. С., Имаева Л. П., Козьмин Б. М. Сейсмотектоника Якутии. — Москва : ГЕОС, 2000. — 226 с.

19. Ичетовкин Н. В. Глубинные разломы Примагаданского района Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и их металлогеническое значение // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. — 1978. — № 24. — С. 13–19.

20. Ичетовкин Н. В., Силинский А. Д., Фадеев А. П. Кайнозойские щелочные базальтоиды бассейнов рек Кананыги и Вилиги (Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Геология и геофизика. — 1970. — № 8.

21. Калинина Л. Ю., Смирнов В. Н., Кондратьев М. Н. Анализ пространственной связи землетрясений с сетью рельефообразующих разрывных нарушений на юго-восточном фланге Сейсмического пояса Черского // Вестник СВНЦ ДВО РАН. — 2013. — № 3. — С. 18–23.

22. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб: 1:8000000 / В. Н. Страхов, В. И. Уломов, Л. С. Шумилина и др. — Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1999.

23. Кондорская Н. В., Шебалин Н. В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. — Наука, 1977. — 536 с.

24. Кондратьев М. Н. Опыт геокинематического анализа активных разломов Охотско-Колымского региона // Сб. материалов II Межрегион. конф. молодых ученых СВКНИИ ДВО РАН. — Магадан : ООО «Полиарк», 2008. — С. 113–116.

25. Кондратьев М. Н. Поля напряжений в структурах основания Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы Второй молодежной школы-семинара / ИФЗ. — Т. 1. — М., 2011. — С. 123–129.

26. Кондратьев М. Н. Пат. 121565. Электронный магнитный компас. // Полезные модели и изобретения. — 2012. — № 30). — С. 2.

27. Кондратьев М. Н. Структурные модель формирования золоторудного месторождения Каральвеем // Третья тектонофизическая конференция в

ИФЗ РАН. Тетонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : Тез. докл. Всерос. конф. — в 2-х т. Т. 2. — М. : ИФЗ, 2012а. — С. 313–316.

28. Кондратьев М. Н., Ползуненков Г. О. Пат. 137609. Геологический электронный компас. // Полезные модели и изобретения. — 2013. — № 5). — С. 2.

29. Кондратьев М. Н., Ползуненков Г. О. Цифровой геологический компас и перспективы его использования при решении задач полевой структурной геологии // Приборы. — 2014. — № 4 166). — С. 45–49.

30. Кондратьев М. Н., Смирнов В. Н. Кинематический анализ Хетинского активного разлома // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: докл. науч. симпоз., 1–4 июня 2010, г. Хабаровск / ИтиГ им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН. — Хабаровск, 2010. — С. 206–208.

31. Корольков В. Г., Королькова А. М. Государственная геологическая карта. Масштаб 1: 1 000 000. (нов. сер.) Лист O-56 — Магадан; P-56, -57 — Сеймчан : объяснительная записка. — Спб. : ВСЕГЕИ, 1992. — 112 с.

32. Котляр И. Н., Русакова Т. Б. Меловой магматизм и рудоносность Охотско-Чукотской области: геолого-геохронологическая корреляция. — СВКНИИ ДВО РАН, 2004. — 152 с.

33. Кузнецов В. М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (Третье поколение), лист P–56 — Сеймчан. — ВСЕГЕИ, ОАО «Магадангеология», 2007.

34. Кузьмин С. Б. Оценка ширины зон активных разломов методами неотектоники и структурной геоморфологии (на примере Восточного Саяна и Западного Прибайкалья) // Геотектоника. — 1998. — № 1. — С. 70–78.

35. Лунина О. В., Гладков А. С. Разломно-блоковое строение и напряженное состояние земной коры Гусиноозерской впадины и прилегающей территории (западное Забайкалье) // Геотектоника. — 2009. — № 1. — С. 78–96.

36. Мальков Б. И. Схема развития юго-восточной части Яно-Колымской геосинклинальной системы // Мезозойский тектогенез : Материалы VII сессии

Научного совета по тектонике Сибири и Дальнего Востока. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ СО АН СССР. — 1971. — С. 17–19.

37. Натапов Л. М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (нов. сер.). Лист P-54, 55 — Оймякон, O-55: объяснительная записка. — СПб., 1999.

38. Николаев П. Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей напряжений // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1977. — № 12. — С. 103–115.

39. Николаев П. Н. Системный подход в анализе и картировании полей тектонических напряжений // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. — Апатиты, 1982. — С. 18–35.

40. Оксман В. С. Тектоника коллизионного пояса Черского (Северо-Восток Азии). — М. : ГЕОС, 2000. — 269 с.

41. Осипов А. П. Позднемезозойское тектоно-магматическое развитие западной части Охотско-Колымского водораздела. — Новосибирск : Наука, 1975. — 159 с.

42. Полин В. Ф., Сахно В. Г., Молл-Столкап Е. Дж. Охотско-Чукотский вулкано-плутонический пояс (альб - кампан) // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России : в 2-х кн. — Владивосток : Дальнаука, 2006. — Т. 1. — С. 260–273.

43. Ребецкий Ю. Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных анпряжений Юго-Восточной Азии Океании // ДАН. — 1997. — Vol. 354, no. 1. — P. 101–104.

44. Ребецкий Ю. Л. Метод катакластического анализа сколов для восстановления современных и палеонапряжений // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. — Москва : Наука, 2000. — С. 311–325.

45. Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. — ВСЕГЕИ, 2017а. — 234 с.

46. Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. — ВСЕГЕИ, 2017b. — 234 с.

47. Русакова Т. Б. Момолтыкичская свита: геология и возраст // Чтения памяти академика К. В. Симакова : тез. докл. Всерос. науч. конф. (Магадан, 25–27 нояб. 2009 г.). — Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2009. — С. 90–91.

48. Семинский К. Ж. Внутренняя структура разломных зон. Тектонофизический аспект. — Новосибирск : СО РАН, 2003. — 242 с.

49. Семинский К. Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал. — 2005. — Т. 27, № 1. — С. 85–96.

50. Семинский К. Ж., Бурзунова Ю. П. Тектонофизический подход к анализу приразломных хаотических сетей трещин // Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. Вып. 3. — СО РАН, Инс-т земн. коры, 2005. — С. 158–162.

51. Семинский К. Ж., Бурзунова Ю. П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика. — 2007. — Т. 48, № 3. — С. 330–343.

52. Сим Л. А. Определение регионального поля напряжений по данным о локальных полях напряжений на отдельных участках (на примере зоны сочленения Мезенской синеклизы и Среднего Тимана) // Изв. ВУЗов. Геол. и разв. — 1982. — № 4. — С. 35–40.

53. Сим Л. А. Краткий обзор состояния изученности палеотектонических напряжений по геологическим индикаторам // Геодинамика и тектонофизика. — 2013. — № 4 (3). — С. 341–361.

54. Симаков А. С. О крупном разломе в бассейне р. Колымы // Материалы по геологии Северо-Востока СССР. — 1949. — С. 63–70.

55. Симаненко В. П. Удско-Мургальский вулкано-плутонический пояс (юра - ранний мел) / В. П. Симаненко, Н. А. Горячев, В. Г. Сахно, С. Г. Бялобже-

ский // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России : в 2-х кн. — Владивосток : Дальнаука, 2006. — Т. 1. — С. 247–259.

56. Скибина Л. Б., Юдина Г. М., Кожуховская Н. М. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1 : 50 000 Карамкенского рудного района. Ольская серия. Карамкенская группа листов (P-56-122-А, Б, В, Г; P-56-123-В; P-56-134-А, Б; P-56-135-А, Б; P-56-136-А). — 1991.

57. Смирнов В. Н. Морфотектоника областей горообразования Северо-Востока Азии : Дисс... доктора наук : 25.00.24 / В. Н. Смирнов ; МГУ. — Москва, 1995a. — 350 с.

58. Смирнов В. Н. Морфотектоника областей горообразования Северо-Востока Азии : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра георг. наук : 25.00.24 / В. Н. Смирнов ; МГУ. — Москва, 1995b. — 42 с.

59. Смирнов В. Н. Северо-Восток Евразии // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. — М. : Пробел, 2000. — С. 120–133.

60. Смирнов В. Н. Геологическое строение, новейшая тектоника и сейсмическая активность // Ландшафты, климат и природные ресурсы Тауйской губы Охотского моря. — Владивосток : Дальнаука, 2006. — С. 39–50.

61. Смирнов В. Н., Глушкова О. Ю., Пахомов А. Ю. Оползневые процессы в зоне Нагаевского активного разлома (район г. Магадана) // Геоморфология на рубеже XXI века. IV Щукинские чтения. — М. : Геогр. факультет МГУ, 2000. — С. 340–343.

62. Смирнов В. Н., Калинина Л. Ю. Анализ пространственной связи землетрясений с элементами новейшей структуры на юго-восточном фланге сейсмического пояса Черского // Геология, география, биологическое разнообразие и ресурсы северо-востока россии. Магадан, 12-14 октября 2016 г. — Магадан : Северо-Восточный научно-исследовательский институт ДВО РАН, 2016. — С. 58–60.

63. Смирнов В. Н., Калинина Л. Ю. Количественный анализ связи землетрясений с относительной амплитудой активных разломов на юго-восточном флан-

ге сейсмического пояса Черского // Вестник СВНЦ. — 2017. — № 2. — С. 24–29.

64. Смирнов В. Н., Кондратьев М. Н. Поле напряжений и внутренняя структура Хетинского активного разлома // Вестник СВНЦ ДВО РАН. — 2011. — № 4. — С. 65–72.

65. Смирнов В. Н., Кондратьев М. Н. Поля тектонических напряжений в структурах основания Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Северное Приохотье) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. — 2013. — № 4. — С. 23–27.

66. Смирнов В. Н., Кондратьев М. Н., Колегов П. П. Крупная палеосейсмодислокация в юго-восточной части сейсмического пояса Черского (Северное Приохотье) // Доклады Академии наук. — 2018. — Т. 479, № 4. — С. 422–4245.

67. Сурков В. С., Ларичев А. И., Старосельцев В. С. Предварительные геологические результаты по Магаданскому участку опорного геофизического профиля 2-ДВ (п-ов Кони – о. Врангеля) // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Т. 1. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. — 2003. — С. 72–75.

68. Сурков В. С. Глубинное строение юго-западной части Охотско-Чукотского региона по результатам комплексных геолого-геофизических исследований вдоль геотраверса 2-ДВ / В. С. Сурков, В. С. Старосельцев, А. С. Сальников и др. // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 8. — С. 63–67.

69. Трушнин А. В., Изох Э. П. Опыт систематики дифференцированных габброидов Магаданского массива // Геологическая эволюция и строение Азиатского континента и окраинных морей северо-западной части Тихого океана. СВКНИИ ДВО АН СССР. — Магадан, 1991. — С. 65–66.

70. Умитбаев Р. Б. Охотско-Чаунская металлогеническая провинция (строение, рудоносность, аналоги). — М. : Наука, 1986. — С. 285.

71. Чернышев С. Н. Трещины горных пород. — М. : Наука, 1983. — С. 240.

72. Чертовских Г. Н., Шейкова В. Т. Геологическая карта СССР м-ба 1 : 200 000. Лист P-56-XXVI. Объяснительная зависка. — Магадан, 1979. — 92 с.

73. Юдин С. С. Государственная Геологическая карта масштаба 1 : 200 000. Магаданская серия. Лист O–56–I: объяснительная записка. — Л., 1969.

74. Юдин С. С., Измайлов Л. И. Челомджа-Ямский глубинный разлом // ДАН СССР. — 1966. — Т. 166, № 5.

75. Caruso M. Application of Magnetic Sensor in Navigation Systems. — SAE Technical Paper 970602, 1997.

76. GRASS GIS: a multi-purpose Open Source GIS / M. Neteler, M.H. Bowman, M. Landa, M. Metz // Environmental Modelling & Software. — 2012. — Vol. 31. — P. 124–130.

77. Fujita K. Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia / K. Fujita, B. M. Koz'min, K. G. Mackey et al. // Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov. SMSPS. — 2009. — P. 117–145.

78. Hindle D., Fujita K., Mackey K. Current deformation rates and extrusion of the northwestern Okhotsk plate, northeast Russia // Geophysical research letters. — 2006. — Vol. 33, no. 2.

79. Hindle D., Mackey K. Earthquake recurrence and magnitude and seismic deformation of the northwestern Okhotsk plate, northeast Russia // Journal of Geophysical Research. — 2011. — no. 116. — P. 1–12.

80. Itoh H. Magnetic Field Sensor and Its Application to Automobiles. — SAE Technical Paper 800123, 1980.

81. Oxman V. S., Prokopiev A. V. Structural-kinematic evolution of the arcuate orogenic belt of the Chersky mountain system // Curved Orogenic belts: Their nature and significance. — Buenos-Aires, 1995. — P. 27–31.

82. Pant B. B. Magnetoresistive Sensors // Scientific Honeyweller. — Fall 1987. — Vol. 8, no. 1. — P. 29–34.

83. Steblov G. M. First geodetic observations of a deep earthquake: The 2013 Sea of Okhotsk Mw 8.3, 611 km-deep event / G. M. Steblov, G. Ekström, M. G. Kogan et al. // Geophysical Research Letters. — 2014. — Vol. 41, no. 4. — P. 3826–3823.

84. STMicroelectronics Inc. Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass. — AN3192, 2010.

86. Turcotte D. L., G. Schubert. Geodynamics. 2 ed. — Cambridge, 2014.

87. Zobl F., Brunner F. K., Wieser A. Development of a digital geological compass // The Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. — 2007. — Vol. 40, no. 3. — P. 301–308.