ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 551.243.8

Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова)

И.В.ТАЛОВИНА[1], **Н.С.КРИКУН**[1,2]✉, **Ю.Ю.ЮРЧЕНКО**[2], **А.С.АГЕЕВ**[1]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Таловина И.В., Крикун Н.С., Юрченко Ю.Ю., Агеев А.С. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172. DOI: 10.31897/PMI.2022.45

Аннотация. Представлены структурно-геологические особенности о. Итуруп – крупнейшего острова Большой Курильской гряды, являющейся уникальным природным объектом, который может считаться геологическим эталоном. Проведенный структурно-геологический анализ на основе комплексного исследования новых данных дистанционного зондирования Земли, карт аномальных геофизических полей и других геолого-геофизических материалов с использованием современных методов моделирования позволил впервые выделить или уточнить местоположение ранее выявленных разрывных нарушений, типизировать их и определить кинематику, а также установить более достоверную пространственную связь выявленных структур с магматизмом, с этапами геологического развития региона. Построенная схема плотностного распределения зон повышенной тектонической трещиноватости показывает значимую корреляцию между распределением полезных ископаемых и ослабленными участками земной коры и может быть использована в качестве альтернативного способа прогноза полезных ископаемых исследуемой территории, особенно в удаленных и труднодоступных участках. Представленный подход может быть распространен и на другие острова Большой Курильской гряды, тем самым приблизив геологов-исследователей к получению ответов на вопросы об особенностях структурно-геологического строения и эволюции островной дуги. При этом использование специализированных программных продуктов значительно ускоряет процесс интерпретации большого массива геолого-геофизических данных.

***Ключевые слова*:** Курильская островная дуга; линеаментный анализ; Итуруп; тектоническая трещиноватость; гидротермально-магматические системы; сейсмотектоника

Благодарность. Исследование выполнено в рамках работ в ФГБУ «ВСЕГЕИ» по объекту «Создание комплектов государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 (авторский вариант) листов L-55 (Южно-Курильск (с клапаном K-55), L-56 (о. Симушир))» (Государственное задание ФГБУ «ВСЕГЕИ» 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00, выданное Федеральным агентством по недропользованию).

Поступила: 18.02.2022 ***Принята: 25.05.2022*** ***Онлайн: 13.07.2022*** ***Опубликована*: 13.07.2022**

Введение. Представления о структурно-геологическом строении Курильских островов являются дискуссионными на протяжении многих десятилетий. До окончания Второй мировой войны Южный Сахалин и Курильские острова для советских ученых оставались terra incognita. В 1951 г. при проведении первых комплексных геолого-поисковых работ на территории о. Итуруп под руководством П.А.Пьянкова было выделено два крупных разрывных нарушения, продольных общему северо-восточному простиранию острова, в его южной и центральной частях. В ходе построения государственных геологических карт различного масштаба изучением тектонических дислокаций Курильских островов последовательно занимались Ю.С.Желубовский, В.Е.Бевз, П.Ю.Ковтунович [1-3]. Особенности разрывной тектоники региона отражены в монографиях М.И.Стрельцова, К.Ф.Сергеева [4-6], в последние годы геодинамику и глубинное строение региона изучали Г.П.Авдейко и Т.К.Злобин [7-9].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.45

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

В своих работах большинство авторов выделяют две основные группы тектонических нарушений: продольные и поперечные простиранию Большой Курильской гряды, при этом постоянно пересматривают географическое распределение дислокаций, их кинематику, возраст и генезис. Неясными остаются вопросы, связанные с параметрами сейсмофокальной зоны и распределением гипоцентров землетрясений [10]. Более того, исследование элементов структурно-тектонического строения региона важно не только для понимания его геологической эволюции [5, 11, 12], но и для изучения характера распределения тектонических напряжений в его пределах, прогноза землетрясений [13, 14] и закономерностей распределения полезных ископаемых [14, 15].

Данное исследование посвящено уточнению структурно-геологического строения Курильской островной дуги как эталонного объекта островодужных систем (на примере о. Итуруп). Для этого необходимо подобрать оптимальную методику для структурно-геологического анализа с использованием геолого-геофизических данных и материалов дистанционного зондирования, расшифровать и установить особенности разрывной тектоники о. Итуруп, уточнить роль разрывных нарушений в истории геологического развития региона.

Курильская островная дуга расположена в северо-западной части Тихого океана, представляет собой дугообразную цепь островов, которые венчают вытянутое подводное поднятие и отделяют Курильскую котловину от глубоководного Курило-Камчатского желоба (рис.1). Согласно современным представлениям, дуга сформировалась на конвергентной границе Охотоморской и Тихоокеанской литосферных плит в результате субдукции последней [16-18].

Курильская островная дуга соединяет южную оконечность Камчатского полуострова с о. Хоккайдо, в то время как Курило-Камчатский глубоководный желоб связывает Алеутский и Японский преддуговые прогибы (рис.1). Курильская островная дуга (Большая Курильская гряда) представляет собой последовательность вулканических островов протяженностью 1150 км со средней шириной в 100-200 км [19].

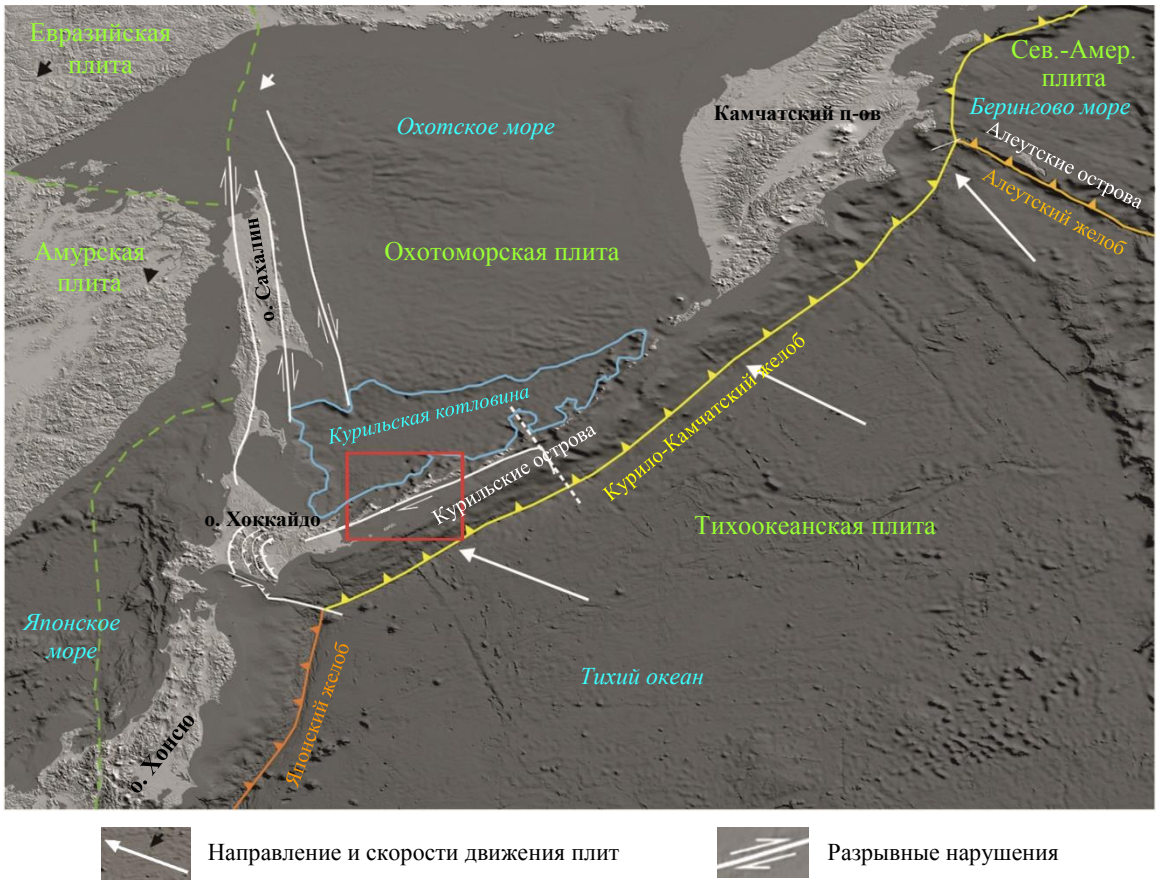


Рис.1. Тектоническая схема северо-западной окраины Тихоокеанской плиты.
Район исследования – о. Итуруп – обозначен красной рамкой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
DOI: 10.31897/PMI.2022.45
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

Объектом данного исследования является о. Итуруп – крупнейший остров Курильского архипелага, расположенный в южной его части (рис.1). Остров вытянут с северо-востока на юго-запад на 200 км, ширина его составляет от 7 до 27 км, площадь – 3175 км^2. Современный рельеф Итурупа геоморфологически очень молодой, сильно гористый с крутыми склонами и многочисленными водопадами, один из которых, Илья Муромец, входит в число самых высоких в России (141 м).

С геологической точки зрения остров сформирован неоген-четвертичными, преимущественно вулканогенно-осадочными породами (рис.2), которые прорваны комагматичными им субвулканическими и экструзивно-жерловыми образованиями. Нижняя часть разреза неогеновых пород сложена сильно дислоцированными отложениями рыбаковской (позднемиоцен-плиоценовой) свиты, которые представлены фациально-изменчивыми основными, средними и, реже, кислыми вулканическими, вулканогенно-обломочными и вулканогенно-осадочными породами. Данные породы согласно перекрыты эффузивно-пирокластическими плиоценовыми образованиями кислого состава камуйской свиты. Четвертичные вулканиты являются продуктами извержений более 40 вулканов, восемь из которых –

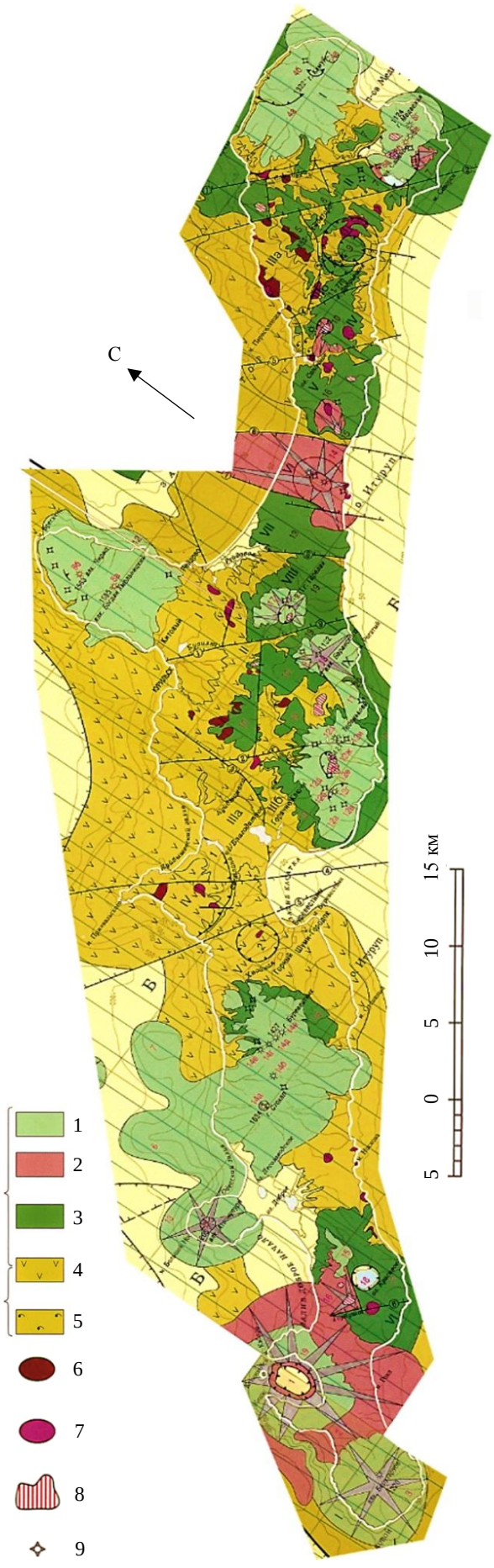


Рис.2. Геологическая схема о. Итуруп (масштаб 1:1 000 000)

1-5 – вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования

Четвертичные и плиоцен-четвертичные:
1 – субаэральных вулканов одиночных и линейно-гнездового типа неоплейстоцен-голоценовых среднего и основного состава (богатырский вулканический комплекс);
2 – субаэральных и субаквальных вулканов эоплейстоцен-позднеоплейстоценовых, представленные пирокластикой дацит-риодацитового состава (головнинский и роковский вулканический комплексы);
3 – субаэральных пологих щитообразных стратовулканов, построек линейно-гнездового типа и лавовых плато плиоцен-ранненеоплейстоценовых (фрегатский вулканический комплекс, в пределах акватории плиоцен-четвертичный сейсмовулканический комплекс) среднего и основного состава

Миоцен-плиоценовые и плиоценовые:
4 – субаквальные вулканокластические и вулканогенно-осадочные позднемиоцен-плиоценовые (рыбаковский вулканический комплекс и сейсмовулканический комплекс позднемиоцен-плиоценовый) и плиоцен-ранненеоплейстоценовые образования (фрегатский вулканический комплекс и плиоцен-четвертичный сейсмовулканический комплекс) среднего и основного состава;
5 – субаэральные эффузивно-пирокластические позднеплиоценовые образования кислого состава (камуйский вулканический комплекс)

Интрузивные и субвулканические тела неогенового возраста:
6 – кислого состава; 7 – среднего и основного состава

Экструзивные и жерловые тела четвертичного возраста:
8 – выражающиеся в масштабе схемы;
9 – не выражающиеся в масштабе схемы

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

действующие. Они представлены широким спектром пород – от базальтов и андезитов богатырской толщи до дацитов и риодацитов головнинской и роковской свит. Нижнеплейстоценовые платоэффузивы фрегатской толщи занимают *промежуточное* положение между неогеновыми и четвертичными вулканитами. Они состоят, преимущественно из потоков базальтов, андезибазальтов, реже андезитов [2, 20,21].

Методология. При проведении данного исследования применен комплексный подход. Основным интерпретационным элементом при дешифрировании космических снимков (КС) и линеаментного анализа аномальных геофизических полей является линеамент – спрямленный системно-упорядоченный элемент КС и полей, отвечающий особенностям рельефа земной поверхности и физическим неоднородностям глубинных недр – элементам пликативных дислокаций (складки и поднятия), границам между геологическими подразделениями, зонам разрывных нарушений, зонам повышенной трещиноватости и т.д. [22, 23]. По протяженности наблюдаются линеаменты: локальные (рассматриваемые в статье), региональные, трансрегиональные или суперлинеаменты, и глобальные (планетарные), на природу которых существуют различные взгляды [24, 25].

Линеаментные схемы опосредованно могут характеризовать разрывную тектонику региона исследований [26]. Часто линеаменты обнаруживаются в упорядоченности эрозионной сети (эрозионного расчленения земной поверхности), что позволяет интерпретировать их как ослабленные или проницаемые зоны. Пространственное распределение, а также плотность и количество пересечений линеаментов на единицу площади являются ключевыми факторами для выделения высокопроницаемых (наиболее трещиноватых) зон [27]. Эта позиция используется авторами данного исследования при дешифрировании данных дистанционного зондирования. Более того, применимость линеаментного анализа космических снимков для идентификации ослабленных зон земной коры на территории Курильских островов подтверждается аналогичными работами [28].

На *первом этапе исследования* производится дешифрирование предварительно обработанных материалов дистанционного зондирования. Согласно существующей методике [29, 30], оптимальными для автоматического дешифрирования с целью идентификации разрывных нарушений являются КС Sentinel-2 (интегральные снимки с разрешением 10 м в ближнем инфракрасном диапазоне) и Sentinel-1 (радиолокационные снимки с двойной поляризацией: VH – горизонтальный и VV – вертикальный приемы), которые могут быть загружены с сервиса EarthExplorer службы геологической съемки США (https://earthexplorer.usgs.gov) и сервиса Sentinel Playground от Sentinel Hub (https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground).

Автоматическое выявление линеаментов на используемых КС производится с помощью алгоритма LINE программного обеспечения PCI Geomatica – широко используемого модуля для автоматического извлечения линеаментов [30]. Фильтрация выявленных структур проходит в ручном режиме путем сопоставления различных автоматически дешифрированных снимков между собой с использованием ПО ArcGIS 10.2.2. Структуры, наличие и распределение которых подтверждается не более чем одним информационным слоем, устраняются. Для уточнения их местоположения применяются цифровая модель рельефа и топографические карты масштаба 1:50 000 и 1:100 000. Кроме того, для редуцирования огромного числа выявленных структур применяется операция ранжирования, основная задача которой направлена на группирование линеаментов по определенным признакам (длина, контрастность проявления на материалах дистанционного зондирования). Результатом полуавтоматического дешифрирования космических снимков является схема линеаментной сети, отображенная на цифровой модели рельефа (рис.3). По результатам замера ориентировки выявленных групп линейных структур моделируются диаграммы направлений зон локальной тектонической трещиноватости в ПО RockWorks для каждой группы отдельно (рис.4) для изучения закономерностей их простирания. Также строятся схемы плотностного распределения линеаментов с использованием встроенного инструмента «Line Density» программного пакета ArcGIS, который вычисляет плотность линейных объектов в единицах длины на единицу площади.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
DOI: 10.31897/PMI.2022.45
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

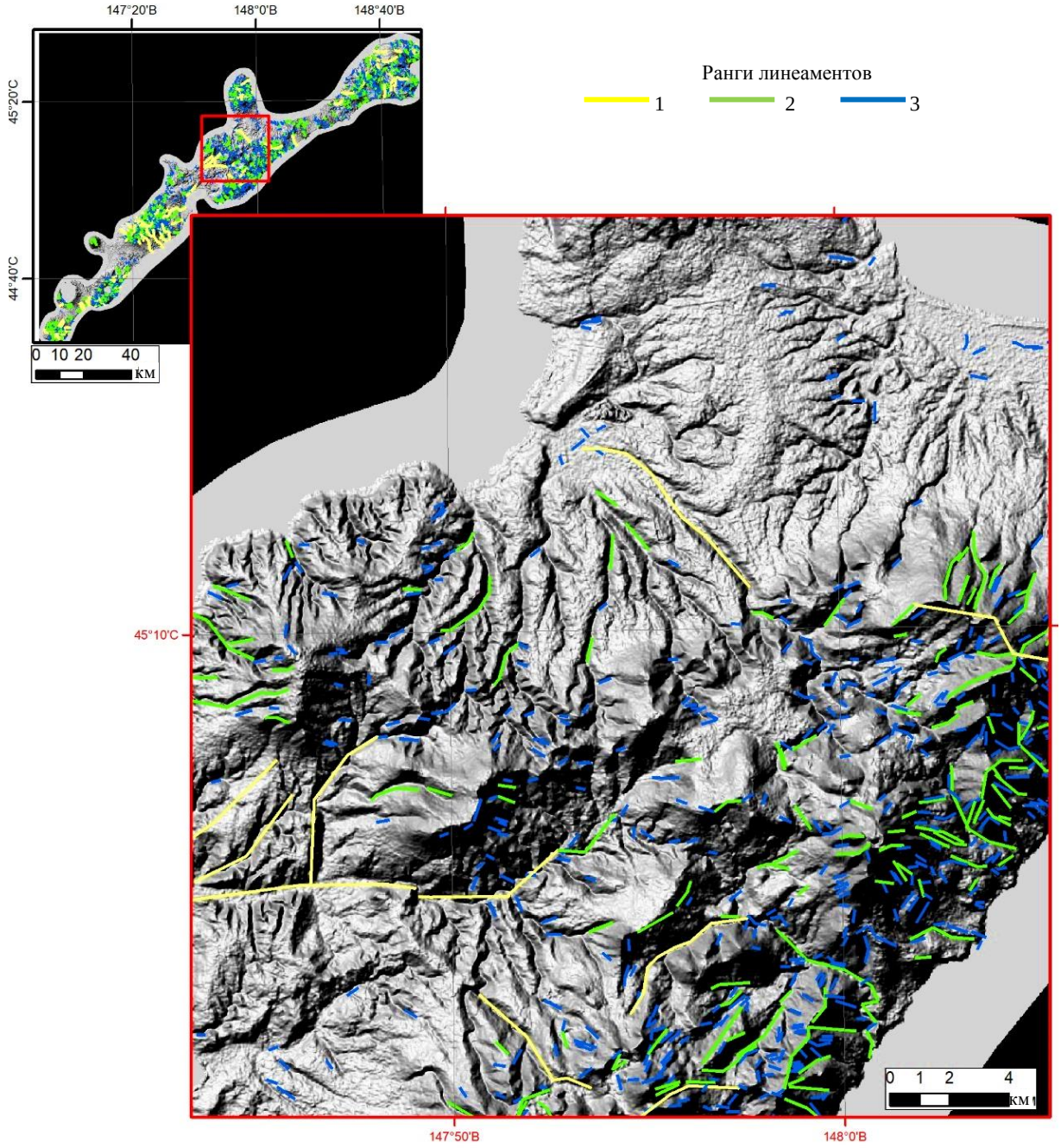


Рис.3. Схема линеаментной сети о. Итуруп (1:2 500 000; масштаб врезки 1:200 000), на цифровой модели рельефа (построена в ПО ArcGIS 10.2.2)

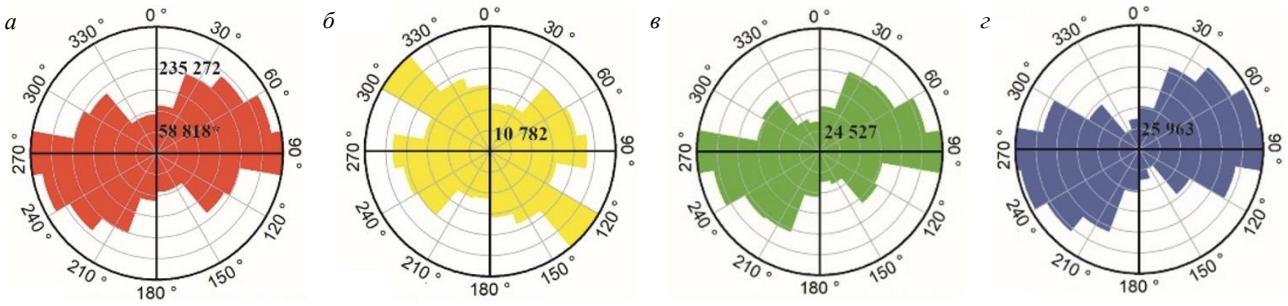


Рис.4. Направление зон тектонической трещиноватости о. Итуруп (значения указаны по сумме длины в заданном направлении в метрах): *а* – для линеаментов всех рангов; *б* – первого; *в* – второго; *г* – третьего рангов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На *втором этапе* исследования реализуется интерпретация карт трансформант аномальных геофизических полей на основе визуального (ручного) линеаментного анализа, который ориентирован на выделение характерных особенностей полей (градиентные зоны, изменение простираний аномалий и т.д.) [26]. В качестве фактического материала использовались карты аномальных магнитного и гравитационного полей и различных трансформант к ним. Оси положительных аномалий на карте горизонтальной составляющей градиента магнитного поля соответствуют границам сред с различной намагниченностью (тектонических блоков, геологических подразделений, зон повышенной трещиноватости и т.д.) [31].

На *заключительном этапе* необходимо произвести учет априорной геологической информации для доказательства тектонической природы выделенных на дистанционных и геофизических основах линеаментов. Наиболее надежным информационным слоем для подтверждения наличия тектонических нарушений являлись полевые наблюдения, выполненные авторами статьи в 2019-2020 гг. Вследствие сильной задернованности островной суши и труднодоступности некоторых участков крупные тектонические нарушения могут быть выявлены с помощью картирования косвенных признаков: наличие зон брекчирования, повышенной трещиноватости, катаклаза, сети малых разломов, оперяющих главный, источников термальных вод; гидротермальной измененности пород; выраженности в рельефе (протяженные уступы, депрессионные зоны, элементы гидросети и другие линейные формы). К сожалению, невозможно подтвердить полевыми наблюдениями каждую выявленную структуру, но для идентификации разрывных нарушений также использовались полевые наблюдения предшественников в ходе региональных и поисковых работ различных масштабов, неопубликованные и фондовые материалы разведочных работ (крупномасштабные карты, результаты бурения, электроразведки и др.). Пространственное положение каждого линеамента сопоставляется с данными геологического картирования. Кроме того, сопоставляются линеаментные схемы, составленные по КС и картам потенциальных полей. В визуальном режиме отбраковываются структуры, противоречащие геологической основе (геологическим картам, тектонических схемам и др.). Помимо этого, принималась во внимание история геологического развития региона, которую необходимо учитывать при проведении исследований, связанных с интерпретацией разнотипных данных [32].

Для построения схемы тектонических нарушений использовались данные о пространственном распределении очагов землетрясений, которые позволяют изучить характер тектонического напряжения в очаге землетрясения и его геометрию. Это необходимо для оценки кинематических параметров как отдельной тектонической дислокации, так и всей зоны. Для построений был выбран каталог механизмов очагов землетрясений за последние 10 лет по данным Японского национального исследовательского института наук о Земле и предотвращения катастрофических явлений (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, NIED). Учитывались только малоглубинные коровые землетрясения, не входящие в сейсмофокальную зону, глубина заложения которой в районе вулканического фронта Южных Курил составляет 105-110 км [33] при мощности коры в районе о. Итуруп 30-40 км [34], т.е. на земную кору и часть верхней мантии.

После окончательной верификации выделенных на линеаментных схемах структур путем сопоставления их между собой, с полевыми наблюдениями и другими данными о геологическом строении территории они были вынесены на схему тектонических нарушений о. Итуруп при использовании программных продуктов ArcGIS и RockWorks. На основе результатов построений была сформирована база данных разломов о. Итуруп.

Результаты и их обсуждение. После дешифрирования различных космических снимков (Sentinel 1-2) территории исследования и их послойного наложения друг на друга была построена схема линеаментной сети о. Итуруп, размещенная на черно-белой цифровой модели рельефа (см. рис.3). Поскольку масштаб построений составляет 1:200 000, на схеме не отмечены структуры, длина которых меньше 200 м. Важным элементом для последующей оценки распределения тектонической трещиноватости земной коры является ранжирование линеаментов на основе их длины и контрастности проявления на КС. Таким образом, на территории о. Итуруп выделено 2855 линейных структур трех рангов: 1 ранг – 108 шт. средней длины в 3352 м; 2 – 739 шт. средней длины в 1038 м; 3 – 2008 шт. средней длины в 431 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

Для оценки закономерностей распределения направлений зон локальной тектонической трещиноватости были построены роз-диаграммы для каждой выделенной группы линеаментов (рис.4), с их помощью можно установить предполагаемые причины формирования зон. Полученные данные свидетельствуют о том, что восток-северо-восточное (ВСВ) простирание структур является доминирующим для зон деструкции о. Итуруп. Объяснением преобладания такого направления (рис.4, *а*) может служить действие регионального тектонического напряжения. По результатам анализа распределения фокальных механизмов очагов землетрясений в Курильской островной дуге преобладает обстановка сжатия. Согласно представлениям Г.П.Авдейко [33], угол между направлением движения Тихоокеанской плиты и простиранием дуги в районе Южных Курил составляет 45-50°. Азимут простирания Курильской островной дуги меняется от 55° в южной ее части до 30° в районе северных Курил. Если принять в качестве среднего значения 40°, то направление движения Тихоокеанской плиты в районе о. Итуруп будет составлять: 350-355°. Азимуты смещения станций Курильской геодинамической сети за 2007-2015 гг. приблизительно для о. Итуруп составляют 305° [34]. Можно достоверно подтвердить наличие региональной компрессии в север-северо-западном (ССЗ) направлении. Следовательно, выявленное преобладание ВСВ простирания зон трещиноватости можно объяснить моделью образования ослабленных зон, ориентированных перпендикулярно оси сжатия [10]. На о. Парамушир, который находится в северной части Курильской островной дуги, отмечается СВ ориентировка зон тектонической трещиноватости [28], что можно объяснить непостоянством параметров субдукции вдоль островной дуги [33].

Для линеаментов *первого ранга* продольное (относительно оси простирания дуги) простирание не является характерным (рис.4, *б*). К этой группе относятся наиболее крупные структуры, средняя протяженность которых составляет первые километры. Как было отмечено, продольная ориентировка зон деструкции обоснована сжатием в СЗ-ССЗ направлении. При этом заложение поперечных структур может быть обусловлено чередующимися режимами растяжения и сжатия в СВ направлении [9]. Весьма вероятно, что наиболее проявленные и протяженные линейные структуры служат индикаторами разломных зон крупных разрывных нарушений, которые, согласно существующим тектоническим схемам (см. рис.2), имеют поперечное (СЗ) простирание.

Линеаменты *второго ранга* зачастую являются оперяющими структуры первого ранга, что обуславливает широкий диапазон их простирания (рис.4, *в*) и максимумы в продольном и поперечном направлениях. Длина данных структур редко превышает 2000 м и в среднем составляет 1000 м.

Линеаменты *третьего ранга* являются самой многочисленной группой, к которой относятся наименее протяженные структуры. Благодаря количеству, в разы превосходящему сумму линеаментов первого и второго рангов, их простирание формирует общий тренд (рис.4, *г*).

Важным этапом данного исследования стало построение схемы плотностного распределения линеаментов острова (рис.5). Плотность и количество пересечений линеаментов на единицу площади являются ключевыми факторами для выделения высокопроницаемых (наиболее трещиноватых зон) [27] (окрашены в красный цвет). Этим зонам соответствуют действующие вулканические постройки: хребты (Грозный, Богатырь) или одиночные вулканы (Атсонопури, Богдан Хмельницкий). Повышенной деструкцией земной коры также характеризуются участки, связанные с эксплозивным неоплейстоценовым вулканизмом: Ветровой перешеек, гора Голец. Кроме того, на схему вынесены объекты размещения полезных ископаемых (за исключением строительных материалов и титан-магнетитовых россыпей), при этом наблюдается значимая корреляция между распределением полезных ископаемых и областями повышенной концентрации и пересечений линеаментов. Таким образом, схема зон тектонической трещиноватости, построенная при помощи комплексного дешифрирования материалов дистанционного зондирования, может применяться в качестве альтернативного метода прогноза полезных ископаемых в удаленных и труднодоступных районах не только о. Итуруп, но и островной дуги в целом.

Важную роль для верификации тектонической природы выявленных линеаментов играли *полевые наблюдения*, в ходе которых были отмечены тектонические нарушения (рис.6), соответствующие извлеченным структурам:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.45

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

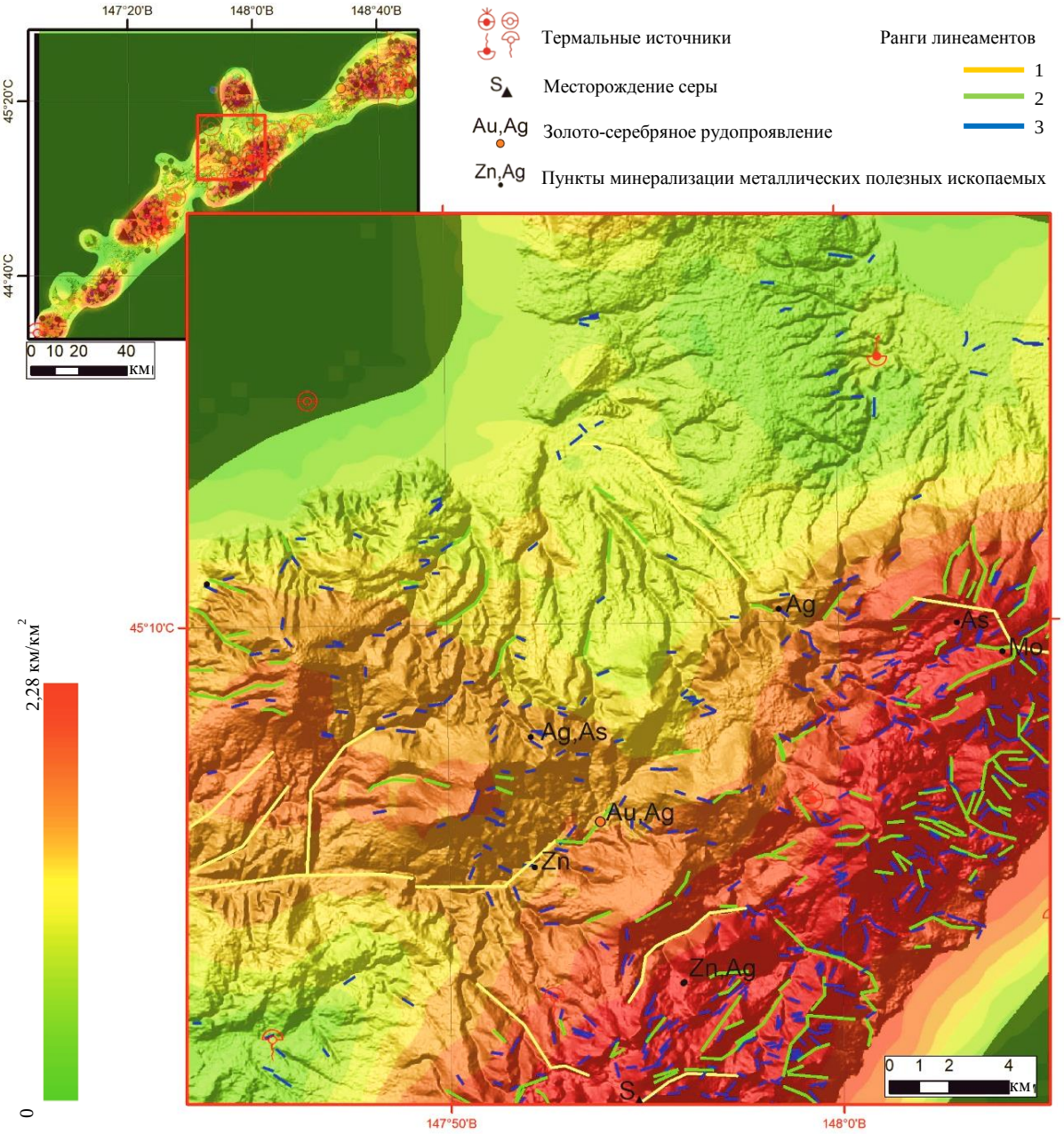


Рис.5. Схема распределения зон локальной тектонической трещиноватости верхней части земной коры о. Итуруп (1:2 500 000, масштаб врезки 1:200 000)

• В северной части врезки (рис.7) в районе бухты Оля отмечена серия линеаментов, отнесенных к третьему рангу. В ходе полевых работ авторами закартирована серия разломов (рис.6, *а*, *б*) и связанная с ними зона полиметаллической минерализации (Pm). Нарушения имеют субвертикальное падение при ВЮВ и ЮВ простирании. Согласно схеме дешифрирования, длина соответствующего дизъюнктиву линеамента не превышает первые сотни метров. Сильная выветрелость и измененность вмещающих пород не позволяет достоверно установить их кинематику.

• На охотоморском побережье о. Итуруп в 1,5 км южнее мыса Исопараури на схеме (рис.7) выявлен линеамент второго ранга протяженностью около 1200 м, отмеченный по руслу безымянного ручья. В ходе полевых работ в этом месте отмечается сильная трещиноватость коренных пород, которая увеличивается по мере приближения к устью ручья. Закартированы малые разломы различной направленности, которые, вероятно, оперяют главный дизъюнктив, проходящий по долине ручья, и трещины раздвига, по которым происходило внедрение даек, с крутыми близвертикальными падениями (рис.6, *в*, *г*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
DOI: 10.31897/PMI.2022.45
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

• В ходе дешифрирования в среднем течении р. Куйбышевка отмечен линеамент первого ранга. Наличие тектонического нарушения, проходящего по руслу этой реки, подтверждается работами предшественников и полевыми наблюдениями авторов статьи (рис.6, *д*). Вмещающие породы в бортах сильно трещиноваты (рис.6, *е*), протяженность некоторых трещин составляет до 10 м, главный разлом оперен серией маломощных и малопротяженных сбросов (рис.6, *ж*). Присутствуют зоны брекчирования мощностью от первых метров до первых десятков метров.

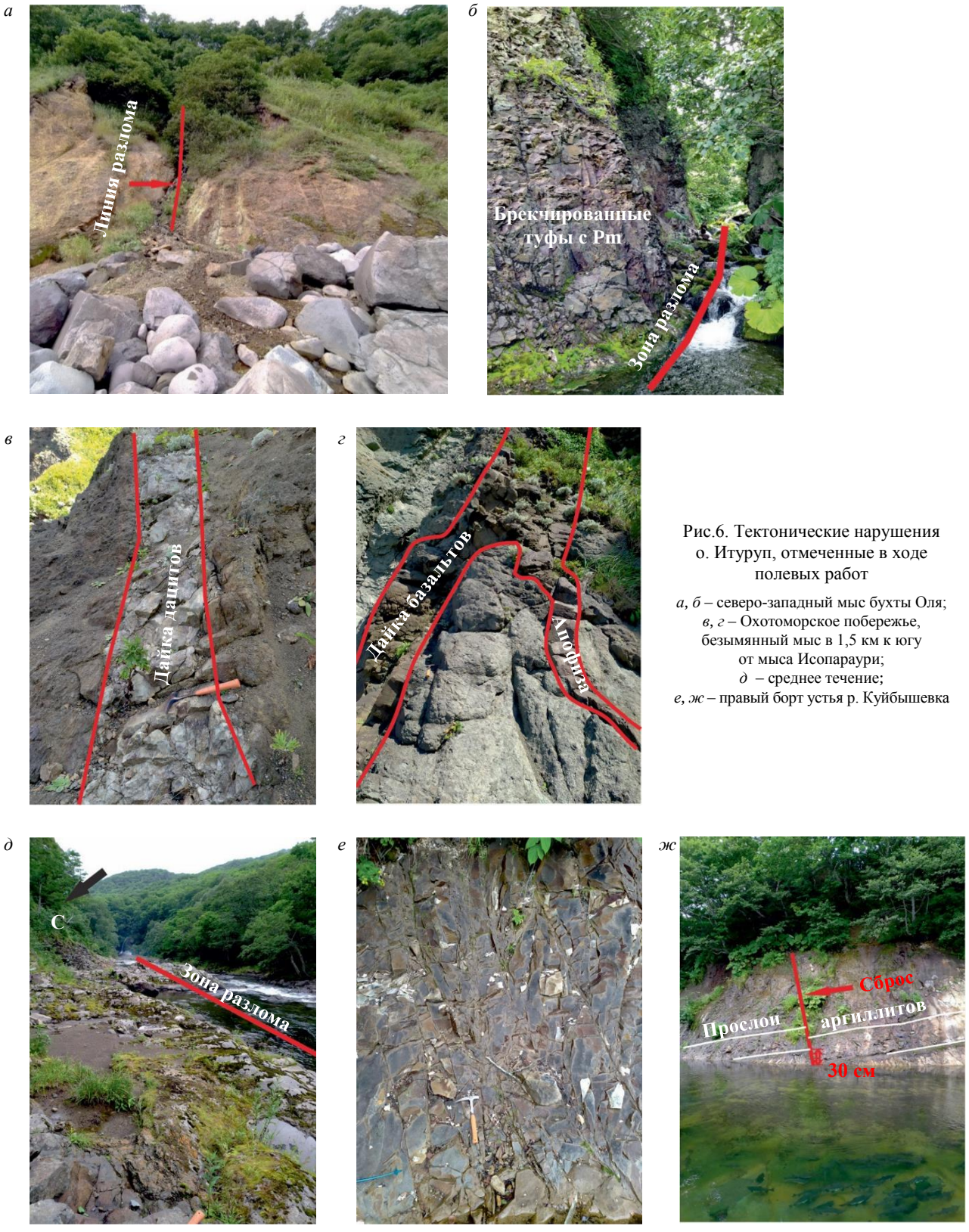


Рис.6. Тектонические нарушения о. Итуруп, отмеченные в ходе полевых работ

а, б – северо-западный мыс бухты Оля; *в, г* – Охотоморское побережье, безымянный мыс в 1,5 км к югу от мыса Исопараури; *д* – среднее течение; *е, ж* – правый борт устья р. Куйбышевка

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.45

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158-172
© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

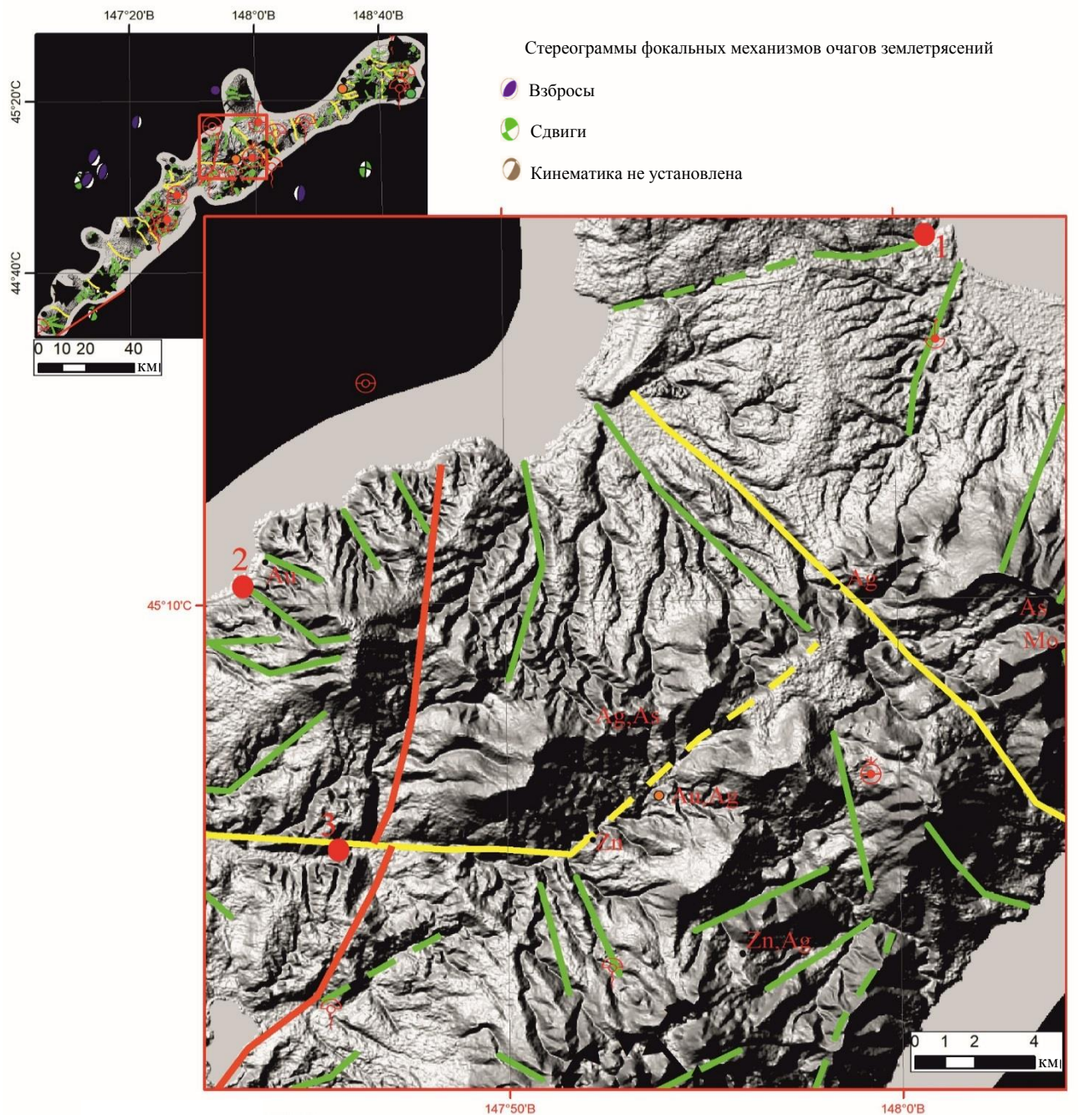


Рис.7. Схема тектонических нарушений о. Итуруп с объектами размещения полезных ископаемых, за исключением строительных материалов и титан-магнетитовых россыпей (1:2 500 000, масштаб врезки 1:200 000)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев, 2022

Результаты анализа распределения фокальных механизмов очагов землетрясений показывают, что наряду с многочисленными подвижками взбросовой кинематики отмечаются структуры со сложной морфологией (сбросо- и взбросо-сдвиги) (см. рис.7). Кинематические параметры сейсмических подвижек подтверждают общую обстановку сжатия в регионе. В частности, это хорошо проявляется по гипоцентрам землетрясений в Курильской котловине. К сожалению, на островную сушу приходится сравнительно небольшое количество очагов. Тем не менее, с использованием карты горизонтальной составляющей градиента магнитного поля установлена кинематика и доказана современная активность наиболее крупных продольных структур в прибрежной акватории. Масштаб, элементы залегания и морфология этих тектонических дислокаций позволяет предположить, что их заложение происходило одновременно в одном тектоническом режиме. Наличие нарушений данной группы в пределах островной суши и характер взаиморасположения относительно дислокаций других групп позволяет говорить об их более раннем формировании.

Для построения схемы тектонических нарушений о. Итуруп (рис.7) схема линеаментной сети (см. рис.3) сопоставлялась с проинтерпретированными картами аномальных геофизических полей, результатами собственных полевых наблюдений и полевых наблюдений предшественников, с существующими тектоническими и геологическими картами региона и другими источниками геолого-геофизической информации. В итоге при почти 3000 выделенных линеаментов на различных космических снимках и около 300 на картах трансформант аномального магнитного поля выявлено и подтверждено наличие 212 разрывных нарушений на территории исследования. На схему были вынесены объекты размещения полезных ископаемых с использованием общепринятых условных обозначений для того, чтобы оценить рудоконтролирующую роль тектонических нарушений и особенности распределения различных генетических типов минерального сырья и дизъюнктивных структур.

В ходе построений на основе простирания времени заложения и масштаба структур, было выявлено три группы тектонических нарушений. Поскольку масштаб построений 1:1 000 000, на схемах не отображены многочисленные разломы длиной менее 1 км.

Разломы первого порядка являются наиболее глубинными и протяженными дислокациями на территории исследований. К данной группе отнесено два разрывных нарушения: в центральной части острова (Рубчиковский сброс [20]) и в прибрежной акватории (вероятно, фрагмент крупного сброса, ограничивающего Большую Курильскую гряду от Среднекурильского прогиба). Эти структуры перекрыты вышележащими отложениями, поэтому слабо фиксируются на КС, но надежно выделяются на картах аномальных геофизических полей. Опираясь на северо-восточное (продольное) простирание и наиболее раннее заложение, их формирование, вероятно, можно связать с образованием Курильской котловины в раннем миоцене в ходе рифтогенеза [18]. Однако, распределение современных сейсмических подвижек показывает сжатие в пределах задугового бассейна (рис.7), что может быть обусловлено сложным характером субдукции Тихоокеанской плиты, вероятно с элементами проскальзывания. На островах Кунашир и Уруп, расположенных в пределах Южно-Курильского сегмента островной дуги, фиксируются плутонические массивы прасоловского плагиогранит-диоритового комплекса, при этом ряд авторов [5, 6] предполагает ключевую роль продольных разломов при распределении интрузивных тел на территории Курильских островов. Согласно последним оценкам [35, 36], возраст пород прасоловского комплекса, отобранных в северной части о. Кунашир, составляет ~31 млн лет (ранний олигоцен). Таким образом, для продольных разломов справедливо предположить заложение на границе палеогена и неогена. Для разломов первого порядка характерна сложная сбросовая, реже сдвиговая (южная часть о. Итуруп), кинематика, которая устанавливается по фокальным механизмам очагов землетрясений и морфологии аналогичного им продольного Центрально-Кунаширского сброса, расположенного на соседнем о. Кунашир [20]. Несмотря на то, что Рубчиковский сброс был выявлен ранее, в рамках данного исследования установлено его взаимоотношение с Куйбышевским разломом – структурой второго порядка.

К *разломам второго порядка* относятся структуры, длина которых более 5-6 км, зачастую они осложнены разрывными нарушениями третьего порядка. Это структуры ярко выражены на КС, реже на других материалах, при этом в той или иной мере подтверждающиеся КС (наличием линеаментов первого ранга или линейным распределением линеаментов более высоких рангов)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и/или полевыми наблюдениями (зонами брекчирования, повышенной трещиноватости, катаклаза, гидротермальной измененности пород, надежно трассирующиеся в рельефе при помощи оценки морфотектонических признаков, глубоких U-образных долин рек и др.). Совпадают с положительными аномалиями на карте горизонтальной составляющей градиента магнитного поля. На геологических основах такие разрывные нарушения сопровождаются субвулканическими телами плиоценового возраста, что позволяет предположить их достаточно глубинное заложение и неогеновый возраст. Такого рода глубинные долгоживущие разломы являются подводящими каналами для металлоносных растворов, формирующих рудную минерализацию. Например, золото-серебряное проявление Перевальное в центральной части врезки (рис.7) связано с телами кварцитов, представляющих собой штокверки, возникшие на пересечении разломов северо-восточного и субмеридионального простирания (согласно неопубликованным материалам П.Ю.Ковтуновича). Достоверно можно утверждать, что разрывные нарушения данной группы моложе разломов первого порядка, так как смещают их на некоторых участках (например, Куйбышевский разлом в центральной части о. Итуруп). Разломы второго порядка на территории исследования имеют преимущественно поперечное, т.е. СЗ простирание при этом характеризуются сбросовой, сбросо-сдвиговой, реже взбросовой кинематикой (см. рис.2) и определяют структурное строение острова (разбивают остров на систему поднятий и прогибов) [20]. Большинство из них активны и сейчас, что подтверждается распределением очагов малоглубинных землетрясений, выходами термальных источников и характерной проявленностью в рельефе. В рамках исследования на построенной схеме авторами уточнено местоположение некоторых структур (Тебеньковский, Рейдовский, Добрынинский сбросы и др.) наличие нескольких разломов, выделяемых ранее, не было подтверждено. Кроме этого, уточнена разрывная тектоника наименее изученного и труднодоступного Медвежьего полуострова. Предполагается наличие ряда поперечных структур в районе хребта Богатырь и Доброго перешейка.

Разломы третьего порядка – это структуры, длина которых редко превышает 5 км. Среди выделенных групп данные структуры являются наиболее молодыми и наименее глубинными. Соответствуют линеаментам второго ранга либо линейно распределенным линеаментам третьего ранга, часто выступают в качестве оперяющих разломы второго порядка. Слабо выражены на картах геофизических полей. Тем не менее, надежно фиксируются в ходе полевых работ, но отличаются от главных меньшей мощностью зон дробления и изменения пород. Сконцентрированы в районах с действующей вулканической активностью, поэтому, несмотря на размер, выражаются в рельефе по гидросети, уступам и другим рельефным формам (например, в окрестностях хребта Богатырь на побережье Охотского моря отмечаются по многочисленным водопадам в скалистом берегу). Имеют сложную кинематику и невыдержанное простирание. Характерные геоморфологические признаки подтверждают их современную активность. Кроме того, разломы третьего порядка являются подводящими каналами для циркуляции растворов, разгрузка которых происходит в виде термальных источников и парогидротерм. Например, месторождение Океанское в восточной части врезки (рис.7), где на небольших термальных фумарольных полях наблюдаются выходы сернистых парогазовых струй и термальных источников, с деятельностью которых связано отложение самородной серы (согласно неопубликованным материалам П.Ю.Ковтуновича). Существует гипотеза [6] о том, что дислокации, развитые на склонах и у подножий вулканических хребтов, свидетельствуют о наличии глубинных разломов, которые могут служить подводящими каналами для магматического расплава, что обеспечивает линейно-гнездовой вулканизм в пределах Курильских островов. Однако результаты построений не позволяют ни подтвердить, ни опровергнуть данную теорию. Несмотря на то, что эти разрывные нарушения являются самой многочисленной группой на территории острова, их большая часть не была отмечена на ранее опубликованных картах. Тем не менее по результатам анализа первичных материалов более половины структур данной группы отнесены к последнему изданию Государственной геологической карты масштаба 1:200 000. Это можно связать с тем, что разломы третьего порядка легко фиксируются в ходе полевых работ, так как являются наиболее молодыми и приурочены к современной вулканической и тектонической активности. Кроме того, в центральной части острова в XX в. проведены крупномасштабные разведочные и поисковые работы, в отчетах к которым отмечена часть структур данной группы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Помимо этого, на острове фиксируются кольцевые структуры, представленные четвертичными и поздненеогеновыми (кальдера Цирк на полуострове Медвежий) кальдерами, связанными с эксплозивным вулканизмом.

Выводы. Для изучения структурно-геологического строения о. Итуруп был применен комплексный подход, основанный на дешифрировании материалов дистанционного зондирования и интерпретации карт аномальных геофизических полей. Представленный подход с использованием специализированных программных продуктов значительно ускоряет процесс интерпретации для идентификации элементов структурно-тектонического строения, при этом полученные результаты не противоречат, а дополняют существующие представления о геологическом строении территории, т.е. использование инновационных подходов является необходимым фактором для развития минерально-сырьевой базы в регионе [23]. Однако подтверждение тектонической природы выявленных структур и использование полученных данных для изучения глубинного строения территории может выполняться лишь при комплексном геолого-геофизическом анализе результатов дешифрирования, при этом привлечение большего количества источников геолого-геофизической информации повышает достоверность и надежность итоговых результатов. Использование данной методики с целью установления параметров выделенных разломов представляет трудность, особенно в плохо обнаженных районах, которую можно преодолеть путем использования результатов более детальных геологических и геофизических работ.

Построенная схема разрывных нарушений позволяет уточнить структурно-геологические особенности строения о. Итуруп, так как на ней выделены разрывные нарушения, не зафиксированные ранее. Для ранее отмеченных нарушений уточнены местоположение и связь с историей геологического развития региона. Подтверждена рудоконтролирующая роль выявленных структур на территории исследований. Глубинные долгоживущие разломы являются подводящими каналами для металлоносных растворов, разгрузка которых происходит в виде термальных источников и парогидротерм, несущих с собой минерализацию цветных, редких и благородных металлов. С зонами трещиноватости и разрывных нарушений в вулканических породах связаны выходы термальных вод. В зависимости от времени заложения и масштаба на территории исследования установлены три группы разломов. Наиболее крупные и глубинные структуры первого порядка, вероятно, сформировались в начале неогена (конце палеогена ?), на самых ранних этапах развития территории исследования; заложение разрывных нарушений второго порядка произошло в неогене, они формируют структурное строение острова и разбивают его на систему прогибов (Ветровой блок, блок Рока) и поднятий (Сибеторский, Куйбышевский блоки) [20]; разломы третьего порядка, в первую очередь, приурочены к центрам развития современного вулканизма (хребты Богатырь, Грозный и др.).

При линеаментном анализе КС установлено доминирующее восток-северо-восточное простирание зон трещиноватости (см. рис.3). Преобладание такого простирания можно объяснить моделью образования ослабленных зон, ориентированных перпендикулярно оси сжатия. Обстановка сжатия в север-северо-западном направлении подтверждается распределением современных тектонических подвижек.

На схеме зон распределения локальной тектонической трещиноватости верхней части земной коры (см. рис.5) видно, что наибольшими значениями характеризуются современные вулканические постройки, с этими участками также связаны области концентрации полезных ископаемых. Это обусловлено тем, что тектоническая трещиноватость может распространяться на большие глубины, образуя пути для восходящих потоков магматических расплавов и растворов глубокой циркуляции к поверхности Земли. Таким образом аналогичные схемы могут применяться в качестве альтернативного способа прогноза полезных ископаемых на Курильских островах в труднодоступных регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000 (серия Курильская). Листы L-55-XXII, XXIII. Объяснительная записка. М.: Союзгеолфонд, 1980. 96 с.

2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия): Лист L-(54), (55); K-(55) – Южно-Сахалинск. Объяснительная записка. СПб: Роскомнедра, ВСЕГЕИ, 1995. 146 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. Государственная геолеогическая карта СССР масштаба 1:1 000 000. Лист К-55, L-55 (Южная группа Курильских островов). М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по геологии и охране недр, 1956. 29 с.

4. Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Под ред. К.Ф.Сергеева, М.Л.Красного. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 л.

5. *Сергеев К.Ф.* Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.

6. *Стрельцов М.И.* Дислокации южной части Курильской островной дуги. М.: Наука, 1976. 132 с.

7. *Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулкано-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64-80.

8. *Злобин Т.К., Полец А.Ю.* Особенности пространственно-временного распределения очагов сильных землетрясений и типов сейсмодислокаций перед катастрофическими Симуширскими землетрясениями 2006-2007 гг. // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 4. С. 460-464. DOI: 10.7868/S0869565213160238

9. *Злобин Т.К., Полец А.Ю., Поплавская Л.Н., Сафонов Д.А.*Особенности современной глубинной сейсмотектоники литосферы Южных Курил (района о-ва Итуруп) по механизмам очагов землетрясений // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 35-40.

10. *Nakamura K.* Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation principle and proposal // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1977. Vol. 2. P. 1-16. DOI: 10.1016/0377-0273(77)90012-9

11. *Трифонов В.Г.* Неотектоника подвижных поясов. М.: ГЕОС, 2017. 180 с.

12. *Bolshakova N.V., Fedorova K.S.* The possibilities of using a qualitative interpretation of the potential fields for creating a zonal-block model of the northern flank of the Okhotsk sea region // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics, April 2021. Vol. 2021. P. 1-7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152157

13. *Агеев А.С., Илалова Р.К., Таловина И.В., Дурягина А.М.* Связь между пространственным распределением тектонических дислокаций Байкало-Становой сдвиговой зоны и источниками минеральных вод региона // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 173-180. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-173-180

14. *Злобин Т.К., Полец А.Ю.* Очаговые зоны катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (Mw = 8.3) и 13 января 2007 г. (Mw = 8.1) и глубинное строение земной коры Средних Курил // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 54-63.

15. *Калинин, Д.Ф., Егоров А.С., Большакова Н.В.* Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: «Науки о Земле». 2022. № 1. Вып. 53. С. 59-75. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75

16. *Авдейко Г.П., Арешев Е.Г., Богданов Н.А. и др.* Тектоническая карта Охотоморского региона. М.: Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 2000.

17. *Grave de J., Zhimulev F.I., Glorie S. et al.* Late Palaeogene emplacement and late Neogenee-Quaternary exhumation of the Kuril island-arc root (Kunashir island) constrained by multi-method thermochronometry // Geoscience Frontiers. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 211-220. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.05.002

18. *Schellart W.P., Jessell M.W., Lister G.S.* Asymmetric deformation in the backarc region of the Kuril arc, northwest Pacific: new insights from analogue modeling // Tectonics. 2003. Vol. 22. Iss. 5. P. 1-18. 1047. DOI: 10.1029/2002TC001473

19. *Martynov Yu.A., Khanchuk A.I., Kimura J.-I. et al.* Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks in the Kuril Island Arc // Petrology. 2010. Vol. 18. P. 489-513. DOI: 10.1134/S0869591110050048

20. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 :200 000; Издание второе. Серия Курильская. Листы L-55-XXII, XXVIII, XXXIV (Курильск), L-55-XXIII, XXIX (Рейдово), L-55-XXXIII (влк. Тятя), K-55-II, 55-XXXII (Южно-Курильск). СПб: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2002. 298 с.

21. *Пискунов Б.Н.* Природа базальтоидов Большой и Малой Курильских гряд // Литосфера. 2004. № 3. С. 97-109.

22. *Кузьмин Ю.О., Никонов А.И., Шаповалова Е.С.* Особенности структурного дешифрирования линеаментов с учетом современной геодинамики разломов // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2016. № 13. С. 1-21. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art13

23. *Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic border region // Geological Society of America Bulletin. 1904. Vol. 15. № 1. P. 483-506. DOI: 10.1130/GSAB-15-483

24. *Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 140 с.

25. *Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Гончаров М.А. и др.* Линеаменты, планетарная трещиноватость и регматическая сеть: суть явлений и терминология // Геотектоника. 2014. № 2. С. 75-88. DOI: 10.7868/S0016853X14020052

26. *Егоров А.С.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии: По результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотраверсов России: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2000. 51 с.

27. *Таскин В.В.* Краткий обзор зарубежного опыта применения линеаментного анализа в геологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Т. S 32. № 12. С. 138-144.

28. *Хубаева О.Р., Бергаль-Кувикас О.В., Сидоров М.Д.* Идентификация разрывных нарушений северной части о. Парамушир (Курильские острова, Россия) и их взаимосвязь с гидротермально-магматическими системами: 3d моделирование тектонической раздробленности // Геотектоника. 2020. № 6. С. 77-90. DOI: 10.31857/S0016853X20060077

29. *Adiri Z., El Harti A., Jellouli A. et al.* Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas // Advances in Space Research. 2017. Vol. 60. Iss. 11. P. 2355-2367. DOI: 10.1016/j.asr.2017.09.006

30. *Aminov Javhar, Xi Chen, Anming Bao et al.* Comparison of Multi-Resolution Optical Landsat-8, Sentinel-2 and Radar Sentinel-1 Data for Automatic Lineament Extraction: A Case Study of Alichur Area, SE Pamir // Remote Sensing. 2019. Vol. 11 (778). 29 p. DOI: 10.3390/rs11070778

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

31. *Senchina N.P., Ermolin E., Ingerov O.* Integration of ground audio-magnetotelluric (AMT) and airborne magnetic surveys for exploration of gold-bearing quartz veins // Conference Proceedings, 3rd EAGE International GeoBaikal Conference 2014 – Exploration and Field Development in East Siberia, August 2014. Vol. 2014. P. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.20141753

32. *Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н.* Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 447-458. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.447

33. *Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А.* Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 249-267.

34. *Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Фролов Д.И.* Современная геодинамика Курильской зоны субдукции // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 23-28.

35. *Litvinenko V.S., Sergeev I.B.* Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector // Studies on Russian Economic Development. 2019. Vol. 30. P. 637-645. DOI: 10.1134 / S107570071906011X

36. *Piip V.B., Rodnikov A.G.* The Sea of Okhotsk crust from deep seismic sounding data // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. Vol. 6. № 1. P. 1-14.

***Авторы*: И.В.Таловина,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0003-4132-7010* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Н.С.Крикун,** *аспирант, nskrikun@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0350-4987* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия; Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия*), **Ю.Ю.Юрченко,** *канд. геол.-минерал. наук, заведующий отделом, https://orcid.org/0000-0002-9603-0129* (*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия*), **А.С.Агеев,** *канд. геол.-минерал. наук, ассистент, https://orcid.org/0000-0002-9265-9771* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0